

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Blida 1  
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales  
Département de Navigation Aérienne

Filière : Aéronautique  
Option : CNS/ATM

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:  
**MASTER ACADEMIQUE**

Thème

Etude et réalisation d'un simulateur I.L.S  
(Instrument Landing System)

Présenté par :

SLAMA Amina  
HAMED ABDELOUAHAB Naëla Shahrazed

Dirigé par :

M.ZABOT.A: Promoteur  
M.RAHNI.L.: Co-promoteur

2015/2016

01/10/16

ENNA





**Tous  
droits  
réservés**

## *Remerciements*

*Nous tenons à remercier en premier lieu le DIEU tout puissant, de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener à bien et à terme ce travail.*

*A notre CHER professeur M.MEGUELATI, l'expression de notre profonde reconnaissance pour les facilités qu'il nous a accordées pour l'accomplissement du présent travail, et son soutien, et dont l'aide nous a été indispensable sur le plan scientifique et humain. On lui présente également notre plus sincère gratitude pour la confiance et la sympathie qu'il nous a accordée au cours de ces mois de travail.*

*On tient particulièrement à remercier notre promoteur M.ZABOUB.*

*Une grande partie du travail s'est déroulé au niveau de L'aéroport d'Alger*

*HOUARI BOUMEDIENE.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à M. TIRANE, qui a suivi de très près ce travail, pour son aide et tous ses efforts.*

*Un remerciement particulier est adressé au M. RAHNI, notre encadreur.*

*Nous remercions également M. AIDOUD Le directeur de DSA*

*M. ZERMANI le chef service radionavigation*

*Et tout l'équipe de ENNA au niveau de l'aéroport ainsi que la direction technique à HUSSEIN DEY.*

*Enfin il nous est agréable de remercier chaleureusement la directrice et tous les enseignants de l'institut.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse ,qui s'est sacrifiée pour ma réussite et mon bonheur, à ma mère .*

*A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager et me donner l'aide et à me protéger.*

*Que dieu les garde et les protège.*

*A mon unique frère Mohamed*

*A mes adorables petites sœurs Selma, Lina Nadira*

*A ma chère sœur et binôme « le nuage » Naëla*

*A mes meilleures amis, Asma ,Sabrina, céline ,Wisseem, Houssame eddine ,Mustapha ,et à tous les étudiants de la promo  
CNS /ATM .*

*Amina Sarah*

## Dédicace

Je dédie ce mémoire

A ma magnifique mère qui est mon pilier, qui a partagé cette aventure avec moi et pour qui il n'y a pas de mots pour exprimer ma gratitude envers elle pour tout ce qu'elle a fait durant ces vingt-quatre années

A mon cher père qui est un exemple pour moi dans ce domaine et qui m'a épaulé pour mener à bien ce projet

A ma douce mamie qui attendait ce moment avec impatience

A mon adorable grand frère Emir, qui même de loin m'a soutenu et au petit Naël, le plus adorable des neveux.

A Malek, mon fiancé qui a toujours cru en moi et qui m'a toujours dit que j'étais la meilleure

A mon cher binôme Sarah, avec qui j'ai partagé ces cinq années et qui est une sœur pour moi

A mes enseignants et à tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

# Naëla

## Résumé

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire concerne l'étude théorique du système d'atterrissage aux instruments en vue de son application pour la simulation des signaux ILS.

Ce logiciel est un outil de simulation des rayonnement ILS, illustrant la partie émission du Localizer.

Divers réglages sont possible afin d'évaluer leurs effets sur le rayonnement, de ce fait ce logiciel est conçu à des fin pédagogique.

## Abstract

This work concern the theoretical research of the Instrument Landing System to applicat it for ILS signals simulations.

This software provides simulation of ILS radiation, showing transmission side of Localizer.

Many setting are possible in order to evaluate their effects, also it's primarily designed for pedagogical needs.

## ملخص

هذا العمل يندرج في إطار دراسة نظرية لنظام الهبوط بالأجهزة هذه الدراسة تكمن في تطبيق التشبيه النظري لإشارات هذا النظام.

إن هذا البرنامج هو أداة التشبيه النظري لإشعاعات هذا النظام ولتوضيح جزء الإرسال لجهاز اللوكاليزر.

بإمكاننا التحكم في عدة محاولات للضبط حتى يتسنى لنا تقييم اثرهم على الإشعاع وقد انجز هذا المشروع من اجل اهداف بيداغوجية.

## Sommaire

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SOMMAIRE .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>LISTE DES FIGURES .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>ACRONYMES .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>CHAP 1 : MOYENS DE RADIONAVIGATION .....</b>                             | <b>10</b> |
| 1.1 INTRODUCTION .....  | 10        |
| 1.2 HISTORIQUE .....  | 10        |
| 1.3 CLASSIFICATION OPERATIONNELLE DES MOYENS DE RADIONAVIGATION .....       | 10        |
| 1.4 LES MOYENS DE RADIONAVIGATION .....                                     | 11        |
| 1.4.1 <i>Radiocompas automatique ADF</i> .....                              | 11        |
| 1.4.2 <i>Radiophare Omnidirectionnel VHF VOR</i> .....                      | 12        |
| 1.4.3 <i>Equipement de mesure de distance DME</i> .....                     | 15        |
| 1.4.4 <i>Instrument Landing System ILS</i> .....                            | 16        |
| 1.4.5 <i>Système mondial de navigation par satellite (GNSS)</i> .....       | 20        |
| 1.5 CONCLUSION .....  | 21        |
| <b>CHAP 2 : LES ANTENNES .....</b>  | <b>23</b> |
| 2.1 INTRODUCTION .....  | 23        |
| 2.2 LA PROPAGATION EN ESPACE LIBRE .....                                    | 23        |
| 2.3 LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES ANTENNES .....                     | 25        |
| 2.3.1 <i>Le diagramme de rayonnement</i> .....                              | 25        |
| 2.3.2 <i>Directivité</i> .....  | 26        |
| 2.3.3 <i>Gain</i> .....   | 27        |
| 2.3.4 <i>Surface équivalente des antennes</i> .....                         | 27        |
| 2.3.5 <i>Equation de transmission de Friis</i> .....                        | 28        |
| 2.4 LES TYPES D'ANTENNES .....  | 28        |
| 2.4.1 <i>Dipôle élémentaire ou doublet de Hertz</i> .....                   | 29        |
| 2.4.2 <i>Antenne log-périodiques LPDA (Log Periodic Dipole Array)</i> ..... | 30        |
| 2.4.3 <i>Réseaux d'antennes</i> .....                                       | 32        |
| 2.5 CONCLUSION .....  | 37        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CHAP 3 : ETUDE ET ANALYSE DU SYSTEME ILS</b> .....  | <b>38</b> |
| 3.1 INTRODUCTION .....   | 38        |
| 3.2 DEFINITION DE LA TRAJECTOIRE D'APPROCHE ET D'ATTERRISSAGE .....                          | 38        |
| 3.3 SECTEURS D'ALIGNEMENT.....   | 39        |
| 3.4 LE LOCALIZER .....   | 40        |
| 3.4.1 <i>Couverture en azimut</i> .....  | 40        |
| 3.4.2 <i>Principe de la définition radioélectrique du plan vertical d'axe de piste</i> ..... | 40        |
| 3.4.3 <i>Génération des signaux</i> .....  | 44        |
| 3.4.4 <i>Réseau d'aériens</i> .....  | 47        |
| 3.4.5 <i>Emission bifréquence</i> .....  | 51        |
| 3.5 CONFIGURATION TYPIQUE D'UNE STATION SOL .....  | 54        |
| 3.6 LE GUIDE .....   | 57        |
| 3.6.1 <i>Principe de la définition radioélectrique du plan oblique de descente</i> .....     | 57        |
| 3.6.2 <i>Récepteur de bord : DDM et SDM</i> .....  | 57        |
| 3.6.3 <i>Secteur d'alignement de descente</i> .....  | 57        |
| 3.6.4 <i>Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture</i> .....                    | 58        |
| 3.6.5 <i>Principes généraux : Glide image</i> .....  | 58        |
| 3.6.6 <i>Glide "Null Reference"</i> .....  | 60        |
| 3.7 CONCLUSION .....   | 66        |
| <b>CHAP 4 : INTERFACE DE SIMULATION DES SIGNAUX ILS (SIMLOG)</b> .....                       | <b>68</b> |
| 4.1 INTRODUCTION .....   | 68        |
| 4.2 DESCRIPTION DE L'INTERFACE.....  | 68        |
| 4.3 LA FENETRE SIMLOG .....  | 69        |
| 4.4 LE "LOCALIZER".....  | 69        |
| 4.4.1 <i>Fenêtre principale LOC_1</i> .....  | 69        |
| 4.5 FENETRE LOC_2 DE CONFIGURATION PISTE .....   | 72        |
| 4.5.1 <i>Fenêtre LOC_3 de configuration paramètres des antennes</i> .....                    | 73        |
| 4.5.2 <i>Fenêtre LOC_4 des schémas-blocs des émetteurs</i> .....                             | 77        |
| 4.5.3 <i>Fenêtre LOC_5 des diagrammes de rayonnement</i> .....                               | 78        |
| 4.6 LE "GLIDE".....  | 79        |
| 4.6.1 <i>Fenêtre principale GLIDE_1</i> .....  | 79        |
| 4.6.2 <i>Fenêtre GLIDE_2</i> .....   | 80        |
| 4.7 FENETRE LOC_6 DE SIMULATION DE L'INFLUENCE DES OBSTACLES SUR LE SIGNAL LOC.....          | 81        |
| 4.8 MODE D'UTILISATION DE L'INTERFACE.....   | 82        |
| 4.9 ORGANIGRAMME DE L'INTERFACE .....  | 84        |
| 4.10 QUELQUES RESULTATS DE SIMULATION .....  | 85        |
| <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....   | <b>88</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....   | <b>89</b> |





## Liste des figures

---

|           | Page  |    |
|-----------|---|----|
| Fig. 1.1  | Information QDM donnée par le VOR                                     | 12 |
| Fig. 1.2  | Schéma synoptique d'un récepteur VOR                                  | 14 |
| Fig. 1.3  | Principe de DME   | 15 |
| Fig. 1.4  | Composantes du système ILS  | 16 |
| Fig. 2.1  | Déplacement d'onde électromagnétique                                  | 24 |
| Fig. 2.2  | Diagramme de rayonnement typique en 3D et 2D                          | 26 |
| Fig. 2.3  | Directivité des antennes  | 27 |
| Fig. 2.4  | Catégories d'antennes   | 29 |
| Fig. 2.5  | Dipôle élémentaire  | 30 |
| Fig. 2.6  | Dipôle demi-onde  | 30 |
| Fig. 2.7  | Schéma d'un réseau de dipôles log-périodique                          | 31 |
| Fig. 2.8  | les différents types des réseaux                                      | 32 |
| Fig. 2.9  | Réseau linéaire   | 32 |
| Fig. 2.10 | Influence de la distance d  | 34 |
| Fig. 2.11 | Influence du nombre de source   | 35 |
| Fig. 2.12 | Influence de la phase   | 35 |
| Fig. 2.13 | Réseau Localizer utilisant les antennes log périodiques               | 35 |
| Fig. 2.14 | Méthode de Dolph-Tchebychev   | 36 |
| Fig. 3.1  | Définition de l'axe ILS   | 38 |
| Fig. 3.2  | Fenêtre d'approche  | 38 |
| Fig. 3.3  | Couverture azimutale du localizer                                     | 39 |
| Fig. 3.4  | Synoptique du récepteur de bord du Localizer                          | 40 |
| Fig. 3.5  | Variation de la DDM et de la SDM en fonction de $\alpha$              | 42 |
| Fig. 3.6  | Schémas du secteur d'alignement et DDM                                | 43 |
| Fig. 3.7  | Gabarit des courbes DDM et SDM  | 44 |
| Fig. 3.8  | Allures des diagrammes pair et impair                                 | 44 |
| Fig. 3.9  | Schéma de principe d'un localizer 5 antennes                          | 47 |
| Fig. 3.10 | DDM et SDM du réseau de 5 antennes et un demi-secteur de $3^\circ$    | 49 |
| Fig. 3.11 | DDM et SDM du réseau de 5 antennes et un demi-secteur de $1,8^\circ$  | 49 |
| Fig. 3.12 | Réseau 14 antennes  | 50 |
| Fig. 3.13 | DDM et SDM du réseau de 14 antennes et un demi-secteur de $1,8^\circ$ | 51 |
| Fig. 3.14 | Schéma d'un Multitrajets  | 52 |
| Fig. 3.15 | Gabarit du localizer en approche et atterrissage                      | 54 |
| Fig. 3.16 | Schéma synoptique d'une station ILS                                   | 55 |
| Fig. 3.17 | Secteur d'alignement de descente                                      | 58 |
| Fig. 3.18 | Gabarit de la DDM du Glide  | 58 |
| Fig. 3.19 | Principe de l'antenne image   | 59 |
| Fig. 3.20 | Diagramme rayonnement en site de A1                                   | 60 |
| Fig. 3.21 | Diagramme rayonnement en site de A2                                   | 61 |
| Fig. 3.22 | Diagramme de rayonnement en site du P+BL                              | 62 |
| Fig. 3.23 | Diagramme de rayonnement en site du BLS                               | 64 |
| Fig. 3.24 | Diagramme de rayonnement en site du Clearance                         | 65 |
| Fig. 3.25 | Circuit de distribution d'un Type M                                   | 66 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Fig. 4.1  | Fenêtre SIMLOG  | 69 |
| Fig. 4.2  | Fenêtre LOC_1   | 69 |
| Fig. 4.3  | Fenêtre LOC_2   | 72 |
| Fig. 4.4  | Fenêtre LOC_3 : Paramètres électriques                                | 74 |
| Fig. 4.5  | Fenêtre LOC_3 : Paramètres mécaniques                                 | 76 |
| Fig. 4.6  | Fenêtre LOC_4   | 77 |
| Fig. 4.7  | Fenêtre LOC_5   | 78 |
| Fig. 4.8  | Fenêtre GLIDE_1   | 79 |
| Fig. 4.9  | Fenêtre GLIDE_2   | 80 |
| Fig. 4.10 | Fenêtre LOC_6   | 81 |
| Fig. 4.11 | Interconnexion des fenetres de l'interface                            | 83 |
| Fig. 4.12 | Organigramme de l'inteface  | 84 |
| Fig. 4.13 | Diagrammes P+BL et BLS directif du réseau INDRA 16                    | 85 |
| Fig. 2.14 | Diagrammes P+BL et BLS directif et clearance du réseau INDRA 16       | 85 |
| Fig. 2.15 | DDM du réseau INDRA 16 antennes                                       | 85 |
| Fig. 2.16 | Comparaison des diagrammes P+BL directif des Glides à 2 et 3 antennes | 85 |
| Fig. 2.17 | Effet d'un obstacle sur la DDM  | 87 |
| Fig. 2.18 | Résultats de la simulation  | 87 |

**Liste des tableaux**

---

|             | <b>Page</b>   |    |
|-------------|---|----|
| Tableau 1.1 | Appariement des fréquences Loc et Glide                   | 17 |
| Tableau 1.2 | Catégories d'ILS  | 19 |
| Tableau 3.1 | Variation de la DDM et de la SDM                          | 46 |
| Tableau 3.2 | Alimentation pour obtenir le diagramme pair $P(\alpha)$   | 48 |
| Tableau 3.3 | Alimentation pour obtenir le diagramme impair $F(\alpha)$ | 48 |
| Tableau 3.4 | Alimentation pour obtenir le diagramme impair $P(\alpha)$ | 50 |
| Tableau 3.5 | Alimentation pour obtenir le diagramme impair $F(\alpha)$ | 50 |
| Tableau 3.6 | Alimentation d'un glide Null Reference                    | 61 |
| Tableau 3.7 | Alimentation d'un glide Type M                            | 62 |

## Acronymes

---

|        |  |
|--------|--|
| BLS    | Bande latérales seules                           |
| CSB    | Carrier Side Band                                |
| DDM    | Différence des taux de modulation                |
| DME    | Distance Measurement Equipment                   |
| ENAC   | Ecole Nationale de l'Aviation Civile             |
| ENNA   | Etablissement National de la Navigation Aérienne |
| GNSS   | Global Navigation Satellite System               |
| GP     | Glide Path                                       |
| GPS    | Global Positioning System                        |
| ILS    | Instrument Landing System                        |
| MLS    | Microwave Landing System                         |
| NDB    | Non Directional Beacon                           |
| OACI   | Organisation de l'aviation civile                |
| P+BL   | Porteuse + bandes latérales                      |
| RAD    | Radioalignement de descente                      |
| RAP    | Radioalignement de piste                         |
| RVR    | Runway Visibility Range                          |
| SBO    | Side Band Only                                   |
| SDM    | Somme des taux de modulation                     |
| SIMLOG | Simulateur des signaux Loc et Glide              |
| VOR    | VHF Omni Range                                   |
| NM     | Nautical Mile                                    |

## INTRODUCTION GENERALE

---

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 (annexe 10 -télécommunication). 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.

La radioélectricité fut d'abord utilisée dans la navigation maritime (navires) puis pour les avions et c'est ainsi que naquit la radionavigation, technique révolutionnaire, utilisant des ondes radio pour obtenir une information de position.

L'ENNA (Etablissement National de la Navigation Aérienne), sur qui repose la responsabilité en termes de sécurité sur le plan aérien est composé de nombreux départements, parmi eux, le département de la radionavigation, 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 l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile), ces simulateurs n'étant pas gratuits et ayant une durée de vie limitée, nous nous sommes penchées sur ce problème, afin de réaliser une application d'un simulateur d'une des aides à la navigation, qui est le système d'approche et d'atterrissage ILS.

Le présent manuscrit résume un travail de recherche effectué dans le but de contribuer à la modélisation avancée et au développement d'un outil de simulation dynamique. Il est organisé de la manière suivante :

Le chapitre 1 est composé d'une description générale des moyens de radionavigation qui sont encore actifs.

Dans le chapitre 2, nous présentons la théorie générale des antennes en insistant plus particulièrement sur les réseaux utilisés dans l'ILS.

Le chapitre 3, traite de la théorie du système ILS et ses différents composants.

En dernier, le chapitre 4, le cœur du projet, présente la description générale de notre application réalisée via le logiciel MATLAB ainsi que les résultats qui découlent de nos tests.

---

## Chap 1 : MOYENS DE RADIONAVIGATION

---

### 1.1 Introduction

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, pour fournir des indications fiables sur la position de l'avion dans l'espace.

### 1.2 Historique

De nombreux systèmes de radionavigation se sont succédés, voici leur classification historique :

- 1920 : apparition du radiocompas Non Directional Beacon-NDB
- 1935-1940 : parution du radar
- 1940-1945 : création des premiers systèmes hyperboliques qui sont le LORAN et le Decca. Deux années après le VOR fût homologué, puis ça était le tour de l'ILS.
- Durant les années 2000, le GPS débarqua mais hélas, il n'a pas été homologué.

### 1.3 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 ( $D > 300 \text{ NM}$ )**

Les aides à grande distance 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 ( $D < 300 \text{ NM}$ )**

Les aides à moyenne distance sont utilisées pour la navigation sur routes aériennes et dont la précision est de quelques NM 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 à la visibilité radioélectrique et fonction de l'altitude de vol.



- **Aides à courte distance, approche et atterrissage**

Les aides à courte distance, approche et atterrissage sont 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. [8]

#### **1.4 Les moyens de radionavigation**

##### **1.4.1 Radiocompas automatique ADF**

La goniométrie au sol en moyenne fréquence n'est plus pratiquée par contre la goniométrie est toujours utilisée à bord des avions, sous forme automatique (radiocompas automatique) à partir d'émissions LF-MF au sol par radiophares L (Locator) et radiobalises NDB (Non Directional Beacon). [1]

Le radiocompas automatique de bord est un indicateur embarqué de gisement. Il fait partie des aides à la navigation courte et moyenne distance. [5]

Son principe de fonctionnement est le suivant :

- **La station émettrice au sol**

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.

- **A 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, par 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. [2].

- **Avantages et inconvénients de l'ADF**

- Bonne portée et précision acceptable
- Moyen universel et « tous usages » ; matériel peu complexe et coûteux, à bord et au sol.
- Inutilisable par temps très orageux
- Difficilement utilisable à distance, de nuit.
- 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.

#### 1.4.2 Radiophare Omnidirectionnel VHF VOR

Le but du radiophare omnidirectionnel VOR 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.1.1) . 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.

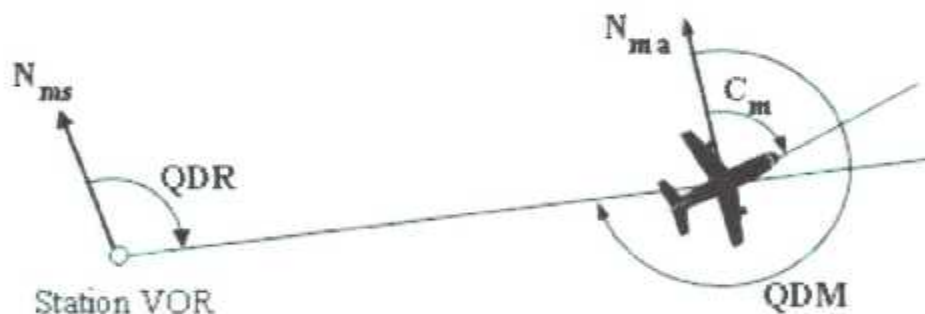


Fig. 1.1 : Information QDM donnée par le VOR

Le radiophare émet dans les bandes 108-112 MHz (partagée avec ILS) et 112-118 MHz (exclusive) et dont le signal rayonné définit 360 directions en azimuth (radiales) autour de la station, avec une erreur moyenne de 1° à 3°. [1]

L'émission se fait en polarisation horizontale. Un système VOR se compose de :

- Un émetteur au sol
- Un récepteur à bord associé à un instrument qui affiche où l'avion se situe angulairement, par rapport à l'émetteur.[2]

Il fournit le QDR, grâce à la station d'émission et ceci dans toutes les directions.

**• Classification des émetteurs VOR**

Il existe 2 types de VOR, dont le fonctionnement est identique, mais dont 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 aérodrome ; la portée est limitée à 50 Km environ ; 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 aérodrome, beaucoup plus fréquemment dans la nature, 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]

**• Principe de fonctionnement du VOR**

Le signal VOR est constitué d'une porteuse VHF dont les modulations portent deux signaux 30 Hz avec lequel l'information de QDR va être transmise :

- Un signal 30 Hz de référence (REF) dont la phase est indépendante de l'azimut via une antenne omnidirectionnelle.
- Un signal 30 Hz dit variable (VAR) dont la phase est égale à l'azimut magnétique de la direction de rayonnement.

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), 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. [1]

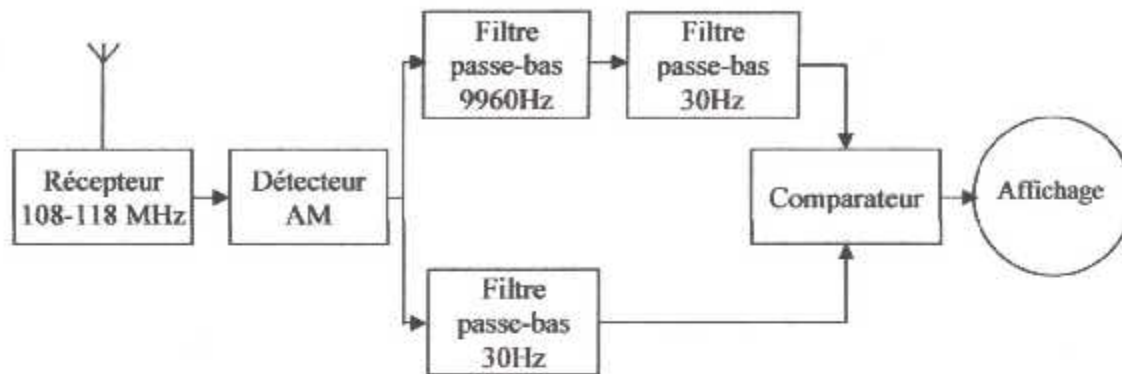


Fig. 1.2 : Schéma synoptique d'un récepteur VOR

La figure 1.2 donne un aperçu du fonctionnement du récepteur VOR à bord de l'avion. Tout d'abord, les ondes électromagnétiques VHF sont reçues par l'antenne, le signal de la balise désirée est synchronisé, amplifié et filtré dans les premiers étages du récepteur.

Le détecteur AM (Modulation d'Amplitude) réalise ensuite une démodulation AM de la porteuse afin de récupérer les deux signaux la modulant en amplitude, soit le premier des deux 30 Hz et la « sous porteuse » de 9960 Hz (qui, elle, transporte le second signal 30 Hz, la modulant alors en FM).

La branche du bas est la récupération, par un filtre passe-bas dédié, du premier signal 30 Hz AM.

La branche du Haut est le filtrage passe-bande du signal 9960 Hz, puis la démodulation en fréquence du second signal 30 Hz FM.

La fonction comparateur est là pour calculer le déphasage entre les deux signaux 30 Hz et ainsi pouvoir interpréter l'angle du radial sur lequel se situe l'avion. L'information est ensuite filtrée, pour éliminer les bruits parasites et envoyé vers l'afficheur.

#### • Avantages et inconvénients du VOR

Le VOR est une balise, il peut donc servir un nombre infini d'avion sans risque de saturation comme en radiotéléphonie ; la précision de l'information atteint 2°. Ses caractéristiques sont celles des émissions VHF. L'émission n'est pas perturbée par les éléments atmosphériques ou géologiques (contrairement aux émissions MF) et donne au pilote une information correcte en permanence.

La portée est radioélectrique, donc c'est un système de navigation à courte distance. Elle est limitée à basse altitude.

### 1.4.3 Equipement de mesure de distance DME

Le DME est un moyen de radionavigation qui donne une mesure continue de la distance oblique entre un avion et une balise au sol constituant la station DME. L'équipement de bord mesure le temps d'aller-retour d'impulsions émises à bord, reçues et transmises par la station au sol.

Le DME utilise une portion de bande UHF autour de 1000 MHz soit comprise entre 960 MHz et 1215 MHz. Un système DME se compose de :

- Un interrogateur à bord
- Un transpondeur au sol

Les DME sont généralement placés aux mêmes endroits que les VOR, grâce au couplage du DME à un VOR, on peut connaître la position exacte de l'aéronef ; le VOR indique sa position angulaire par rapport à la balise et le DME donne la distance oblique par rapport à la même balise.

Son principe de fonctionnement est le suivant (fig. 1.3) :

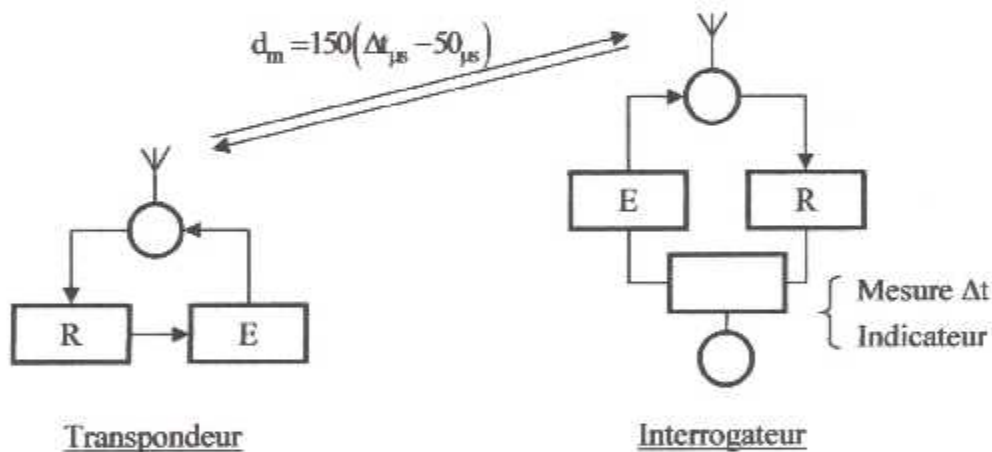


Fig. 1.3 : Principe de DME

#### • Interrogateur de bord

Il permet :

- d'émettre des impulsions courtes de  $3,4\mu s$
- de reconnaître et poursuivre les impulsions réponses, mesurer l'intervalle de temps  $\Delta t$  séparant les impulsions émises et reçues et en déduire la distance  $d$ .

- **Transpondeur au sol**

Il permet :

- de recevoir les impulsions d'interrogation de tous les avions, retransmettre des impulsions de réponses avec un retard fixe par rapport aux interrogations de 50 $\mu$ s.
- de transmettre sous forme d'impulsions un indicatif de la station.

#### 1.4.4 Instrument Landing System ILS

L'ILS est un système permettant l'atterrissage aux instruments par visibilité réduite en fournissant une information de situation par rapport à la trajectoire nominale de descente, et une information de distance par rapport au seuil de piste.[5]

Le système comporte trois équipements distincts (fig. 1.4) :

- Localizer (Loc), (LLZ) dit Radioalignement de piste (RAP)
- Glide Path (GP) ou Glide Slope(GS) dit Radioalignement de descente (RAD)
- Les Markers (MKR)

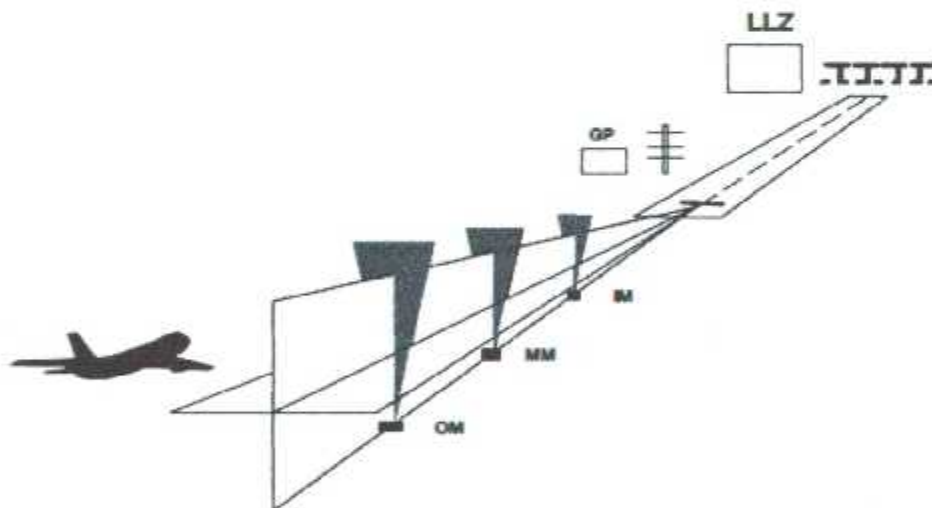


Fig. 1.4 : Composantes du système ILS

Ils fonctionnent dans les gammes de fréquences suivantes :

- **Localizer (LLZ) 108 – 112 MHz**

La fréquence étant fixe et prise entre 108,10 MHz et 111,95 MHz avec la première décimale impaire (Ex: 108,10 – 108,15 – 108,30 – 108,35 etc...).

- **Glide Path (GS ou GP) 328.6 – 335.4 MHz**

On dispose de 40 canaux. Les canaux LOC et GP sont appariés (Annexe 10 OACI).

La sélection de fréquences des récepteurs de bord se fait alors grâce à un dispositif de commande unique. Les canaux du localizer sont appariés à ceux du Glide, un exemple est donné dans le tableau 1.1.

| Fréquence Localizer (MHz) | Fréquence Glide (MHz) |
|---------------------------|-----------------------|
| 108.1                     | 334.7                 |
| 108.15                    | 334.55                |
| 108.3                     | 334.1                 |
| 108.35                    | 333.95                |

Tableau 1.1 : Appariement des fréquences Loc et Glide

Les markers fonctionnent tous sur la même fréquence de 75 MHz avec un taux de modulation de 95 %. [6]

#### • Localizer

Le localizer fournit les informations de guidage dans le plan horizontal. Ce dernier émet, grâce à un réseau d'antennes directrices situées dans le prolongement de la piste, un faisceau radioélectrique permettant de fournir au pilote une indication d'écart horizontal par rapport à l'axe de piste.

Il y a deux types de localizer :

- Single Antenna
- Capture Effect

Les antennes des anciens localizer rayonnaient de l'énergie vers l'arrière (lobes de rayonnement secondaires), ce qui créait un faisceau semblable à celui émis vers l'avant.

Ce rayonnement parasite pouvait être utilisé pour :

- le guidage lors des départs
- les approches de non-précision appelées approches localizer « back course ».

Sur les nouveaux systèmes LOC, une émission localizer en back-course est possible grâce à des antennes spécifiques permettant de reconstituer le faisceau arrière.

Le faisceau arrière est différent du faisceau avant :

- Son gain n'est pas aussi élevé que celui du faisceau avant
- Sa précision est plus faible
- Aucun glide-slope disponible

**• Glide Slope**

Le glide slope appelé simplement glide fournit au pilote une information d'écart par rapport au plan de descente. Il émet des faisceaux radioélectriques dans le prolongement de l'axe de piste, permettant de fournir au pilote une indication d'écart vertical par rapport à la pente de descente nominale.

Le glide est composé de deux ou trois antennes polarisées horizontalement, disposées verticalement sur un pylône situé sur l'un des côtés au travers de la zone de toucher des roues.

La réflexion du sol est nécessaire afin de constituer le diagramme de rayonnement du Glide.

Il existe cinq principaux types de glide qui sont :

- Null-reference,
- Sideband-reference
- Réseau Type M
- Endfire
- Waveguide

Les trois premiers sont appelés des systèmes à effet d'image (image glide slope system). Ils utilisent la réflexion du sol pour générer leur diagramme de rayonnement dans l'espace.

La stabilité de leur diagramme dépend beaucoup des conditions météorologiques (exemple : un terrain enneigé ou abondamment mouillé, va modifier le diagramme de rayonnement).

Les deux derniers sont référencés comme systèmes sans image (non image glide slope system) car ils n'utilisent pas le sol pour réaliser le diagramme de rayonnement.

Ils sont employés lorsque les conditions du terrain sont telles qu'un système image est inutilisable. Leurs antennes sont radicalement différentes et ne dépassent pas 1,5 mètre de hauteur

Si le terrain environnant l'aérodrome est trop dénivelé, on utilisera des variantes permettant de compenser ce défaut.

**• Markers (MKR)**

Les markers sont des radiobornes donnant des repères de distance au seuil de piste le long d'un axe ILS, par des signaux auditifs et visuels. L'avion aura en plus à connaître la progression sur cette trajectoire, donc sa distance par rapport au seuil de piste, pour effectuer les changements de configuration de vol préparatoires à l'atterrissage (réduction de vitesse, train d'atterrissage, volets ...).



De ce fait la trajectoire d'approche est radioélectronicienne balisée en trois points par trois radiobalises ou MARKERS, respectivement nommés ; balise intérieure (I.M Inner Marker), balise médiane (M.M Middle Marker), balise extérieure (O.M Outer Marker)

On peut remarquer qu'une telle information distance est discontinue et n'est pas optimale, on peut associer à L'ILS un D.M.E d'approche en remplacement des markers, dans ce cas l'information distance est continue, on utilise un D.M.E d'approche à rayonnement directionnel.

L'ensemble LLZ + GS +MKR sont les constituants de L'ILS, de nos jours, l'"inner marker" n'est presque plus utilisé.

Le système d'identification par indicatif en code morse en est un moyen de s'assurer du bon fonctionnement de l'ILS (sauf dans certains cas de panne et lors de sa maintenance).

Un équipement de contrôle et surveillance est présent sur les installations. Il sert à contrôler les émissions en permanence et permet d'avertir en cas de panne.

Un balisage spécifique pour les ILS catégories III, permet d'assurer le maximum de précision aux signaux envoyés et éviter que un aéronef ne s'approche trop près des antennes qui pourrait déformer le rayonnement radio électrique des antennes.

#### • Catégories de l'ILS

On distingue plusieurs catégories d'ILS selon la hauteur de décision (HD) permise (hauteur à laquelle le pilote remet les gaz s'il ne voit pas la piste) ainsi que la portée visuelle de piste (RVR : Runway Visibility Range) minimale autorisée.

En fonction de l'équipement en place et de l'environnement de la piste (balisage, mise à disposition d'informations météorologiques, etc...), on distingue plusieurs catégories d'utilisation des ILS. Ces différentes catégories sont définies par une portée visuelle de piste et une hauteur de décision minimale (tableau 1.2).

| Catégories | CAT I   | CAT II      | CAT III A      | CAT III B      | CAT III C  |
|------------|---------|-------------|----------------|----------------|------------|
| HD         | ≥ 200ft | 100 à 200ft | Moins de 100ft | Moins de 50 ft | Non défini |
| RVR        | ≥ 550m  | ≥350m       | 200 m          | 75m            | Non défini |

Tableau 1.2 : Catégories d'ILS

Cependant, l'ILS présente certaines faiblesses qui génèrent des contraintes opérationnelles. Elles sont dues en premier lieu à la susceptibilité des signaux aux perturbations radioélectriques (émissions FM dont la bande est proche de celle de l'ILS, par exemple). En second lieu, l'ILS est aussi sensible aux réflexions de signaux émis par des bâtiments proches ou par les avions près des émetteurs. En cas de faible visibilité (CAT.III), il est ainsi nécessaire de réduire le «débit» de la piste pour protéger les avions en approche finale des perturbations engendrées par les avions précédemment posés.

Cela conduit à imposer un espacement important (au minimum 8 NM soit environ 15 km) entre les appareils en approche.

Un système de contrôle automatique coupe le rayonnement et génère une alarme en cas de décalage des axes nominaux, de distorsion des faisceaux au-delà des valeurs définies pour la catégorie d'ILS ou de baisse de la puissance normale de rayonnement.

Une autre limitation vient du fait que l'ILS ne définit qu'une seule trajectoire d'approche. De plus, le secteur de guidage ILS est relativement étroits, ce qui induit des contraintes pour la «capture » de l'axe d'approche. Face à ces insuffisances, un nouveau système a été développé : le MLS (Microwave Landing System). Le MLS offre une couverture beaucoup plus large en surface et en volume, d'où des conditions d'utilisation plus souples que l'ILS. De plus, le système est, par conception, très peu sensible aux perturbations radioélectriques.

Cependant, sa mise en œuvre fut, dans un premier temps, limitée par manque de justification économique et par les perspectives offertes par les systèmes spatiaux (GPS).[6]

#### **1.4.5 Système mondial de navigation par satellite (GNSS)**

Le GNSS fournit aux aéronefs des données de position et des données temporelles. Ces données sont dérivées des mesures de pseudo distance entre l'aéronef muni d'un récepteur GNSS et les sources de signaux basées sur les satellites ou au sol.

##### **• Éléments du GNSS**

Le service de navigation du GNSS sera fourni à l'aide des éléments suivants, installés au sol ou à bord des satellites ou de l'aéronef, et pouvant être combinés de diverses façons :

- le système mondial de localisation (GPS) qui est un système de navigation par satellite mis en œuvre par les États-Unis, assurant le service de localisation standard (SPS) qui est le niveau de précision en positionnement, en vitesse et en temps assuré à tout utilisateur du (GPS), quel que soit le point du globe considéré.

- le système mondial de navigation par satellite (GLONASS) Système mondial de navigation par satellite mis en œuvre par la Fédération de Russie. fournissant les signaux de navigation du canal de précision standard (CSA) qui est le niveau de précision en positionnement, en vitesse et en temps assuré à tout usager du GLONASS, quel que soit le point du globe considéré.
- le système de renforcement embarqué (ABAS) système qui renforce l'information provenant des autres éléments du GNSS par les données disponibles à bord de l'aéronef et/ou qui l'intègre à ces données.
- le système de renforcement satellitaire (SBAS) système de renforcement à couverture étendue dans lequel l'utilisateur reçoit l'information de renforcement directement d'un émetteur basé sur satellite.
- le système de renforcement au sol (GBAS) système de renforcement dans lequel l'utilisateur reçoit l'information de renforcement directement d'un émetteur au sol.
- le système régional de renforcement au sol (GRAS) système de renforcement dans lequel l'utilisateur reçoit l'information de renforcement directement d'un émetteur faisant partie d'un groupe d'émetteurs au sol assurant la couverture d'une région.

Le récepteur GNSS embarqué système de détermination de la position et du temps, qui se compose d'une ou de plusieurs constellations de satellites, de récepteurs placés à bord des aéronefs et d'un contrôle de l'intégrité, renforcé selon les besoins pour obtenir la qualité de navigation requise dans la phase d'exploitation considérée.

#### • Principe de fonctionnement

Un système de positionnement par satellites fournit sur un récepteur les coordonnées géographiques (longitude, latitude), la vitesse de déplacement et l'heure à son utilisateur. Cette information est obtenue en mesurant la distance à un instant donné entre le récepteur de l'utilisateur et un satellite artificiel dont la position dans l'espace est connue avec précision. En combinant la mesure simultanée de la distance d'au moins quatre satellites, le récepteur est capable par trilatération de fournir la position et l'altitude avec une précision de l'ordre d'une dizaine de mètres et la vitesse avec une précision de quelques cm/s.

#### 1.5 Conclusion

Les moyens de radionavigation servent en quelque sorte d'éclaireurs dans les airs. Ils permettent aux pilotes IFR de suivre la trajectoire correcte, quelles que soient les conditions météorologiques.

Les moyens qu'on a cités sont parmi les plus importants dans la radionavigation. En ce qui concerne l'ILS, il n'a pas été détaillé car il sera expliqué en profondeur dans le chapitre 3.

## Chap 2 : LES ANTENNES

### 2.1 Introduction

Typiquement, une antenne consiste en un agencement d'éléments métalliques, connectés électriquement au récepteur ou à l'émetteur. Un courant oscillant, à travers l'antenne par un émetteur, crée un champ magnétique autour des éléments de l'antenne ainsi qu'un champ électrique le long des éléments. Ces champs variables rayonnent de l'antenne vers l'espace comme une onde de champ électromagnétique. Inversement, lors de la réception, les champs électriques et magnétiques d'une onde radio à l'arrivée exercent une force sur les éléments de l'antenne et créent des courants oscillants dans l'antenne.

### 2.2 La propagation en espace libre

Comme la propagation en espace libre est souvent prise comme référence, nous avons rassemblé dans le présent chapitre certaines formules pertinentes.

#### • Les équations de Maxwell

La répartition des champs électrique et magnétiques dans l'espace produite par une distribution de charges et de courants peut être déterminée en résolvant les équations de Maxwell. En outre, celles-ci permettent de déterminer comment l'onde électromagnétique se propage dans l'espace.

Pour un milieu homogène et isotrope les équations se présentent comme suit :

$$- \text{Equation de Maxwell-Gauss : } \operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.1)$$

$$- \text{Equation de Maxwell-Thompson : } \operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad (2.2)$$

$$- \text{Equation de Maxwell-Faraday : } \operatorname{rot}(\vec{E}) = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (2.3)$$

$$- \text{Equation de Maxwell-Ampère : } \operatorname{rot}(\vec{H}) = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (2.4)$$

avec  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  : les champs  $\vec{B}$  : le flux magnétique

$\rho$  : densité volumique de charge  $\epsilon$  : permittivité électrique (F/m).

$\mu$  : perméabilité magnétique (H/m)  $\sigma$  : conductivité électrique du milieu (S/m).

### • Equations de la propagation

La résolution des équations de Maxwell va nous permettre de déterminer l'équation de propagation des champs. Nous ne considérerons ici que le cas d'un milieu de propagation sans pertes caractérisé par une constante diélectrique et magnétique réelle, où il n'y a donc aucune charge et courant. En combinant alors les équations de Maxwell-Ampère et de Maxwell-Faraday, il est possible d'écrire les 2 équations différentielles dites de propagation :

$$\Delta \vec{E} - \mu\epsilon \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} = 0 \quad (2.5)$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\epsilon \frac{d^2 \vec{H}}{dt^2} = 0 \quad (2.6)$$

Les solutions de ces deux équations permettent de déterminer les champs électriques  $E$  et magnétique  $H$  formant l'onde électromagnétique. Leurs expressions sont de la forme :

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re}_e \{ \vec{E}_0 e^{-jkz} e^{j\omega t} \} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz) \quad \text{avec} \quad \vec{E}_0 = E_x \vec{x} + E_y \vec{y} \quad (\text{V/m})$$

$$\vec{H}(r, t) = \text{Re}_e \{ \vec{H}_0 e^{-jkz} e^{j\omega t} \} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kz) \quad \text{avec} \quad \vec{H}_0 = H_x \vec{x} + H_y \vec{y} \quad (\text{A/m})$$

avec  $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$

La figure 2.1 illustre une onde électromagnétique dans laquelle :

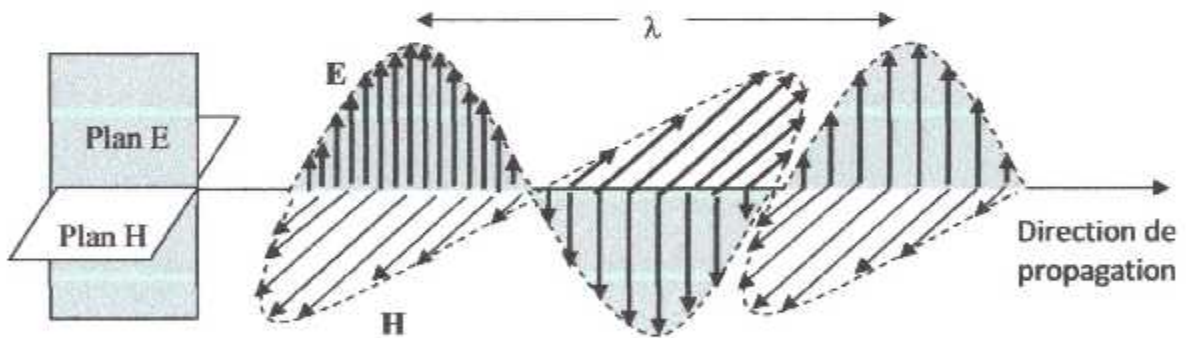


Fig. 2.1 : Déplacement d'onde électromagnétique

- Les deux champs sont en quadrature dans l'espace et en phase dans le temps.
- En espace libre, les directions de  $E$  et de  $H$  définissent deux plans en quadrature, l'intersection de ces deux plans donne la direction de propagation de l'onde. Cette propagation se fait en ligne droite.

La direction de la propagation d'une OEM sont données par la vecteur de Poynting :

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.7)$$

E et H sont orthogonaux. P forme un trièdre orthogonal direct avec E et H.

Le module de P est une densité de puissance par unité de surface.

$$|\vec{P}| = \frac{1}{2} |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| = \frac{1}{2 \times 120\pi} |\vec{E}|^2 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.8)$$

### • Vitesse de propagation

La vitesse de propagation de l'onde dans le vide est égale à la vitesse de la lumière, soit  $c = 3.10^8 \text{m/s}$

La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique est fonction de la nature du milieu dans lequel se propage cette onde par la relation :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (\text{m/s}) \quad (2.9)$$

avec  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  et  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

$\epsilon_r$  Permittivité électrique relative

$\mu_r$  Perméabilité magnétique relative ( $\mu_r = 1$  pour les milieux non magnétiques)

### • Longueur d'onde

C'est la distance parcourue par l'onde pendant une période T du signal :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (\text{m}) \quad (2.10)$$

## 2.3 Les principales caractéristiques des antennes

Une antenne peut être caractérisée par plusieurs paramètres fondamentaux. Les principaux sont :

### 2.3.1 Le diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement montrent en coordonnées tridimensionnelles la variation des champs ou celle de la densité de puissance à une distance fixe r dans les directions ( $\theta, \varphi$ ).

Si on désigne par U, la densité de puissance par unité d'angle solide rayonnée par l'antenne, alors :

$$r(\theta, \varphi) \propto \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{\max}} \quad \text{est le diagramme de rayonnement de puissance normalisé} \quad (2.11)$$

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{E_{\max}} = \sqrt{r(\theta, \varphi)} \text{ est le diagramme de rayonnement de champ normalisé} \quad (2.12)$$

La figure 2.2 montrent un diagramme en trois dimensions et une coupe de ce diagramme.

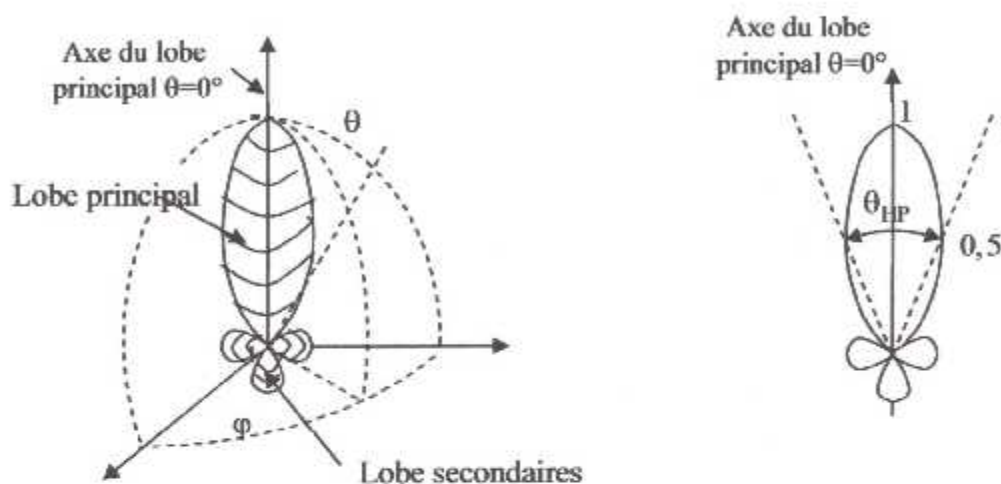


Fig. 2.2 : Diagramme de rayonnement typique en 3D et 2D

Une caractéristique principale des diagrammes possédant un lobe principal est leur ouverture mi-puissance notée  $\theta_{HP}$  qui représente l'angle compris entre les deux directions de rayonnement moitié de la puissance maximale. Pour les antennes très directives, presque la totalité de la puissance est concentrée dans cette ouverture.

### 2.3.2 Directivité

La directivité d'une antenne mesure le degré de concentration de l'énergie rayonnée dans une direction donnée. Pour ce faire, on compare le rayonnement de l'antenne par rapport à l'antenne isotrope fictive alimentée avec le même courant, d'où la définition de la directivité  $D$

$$D(\theta, \varphi) \square \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{\text{iso}}} = \frac{U(\theta, \varphi)}{P_r / 4\pi} \quad (2.13)$$

$U_{\text{iso}}$  est la densité de puissance rayonnée par l'antenne isotrope identique dans toutes les directions et  $P_r$  la puissance totale rayonnée.

Une antenne directive possède un ou deux lobes nettement plus importants que les autres qu'on nomme «lobes principaux». Elle sera d'autant plus directive que le lobe le plus important sera étroit (fig. 2.3).



$$\frac{R_n}{R_{n-1}} = \frac{L_n}{L_{n-1}} = \tau < 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (2.20)$$

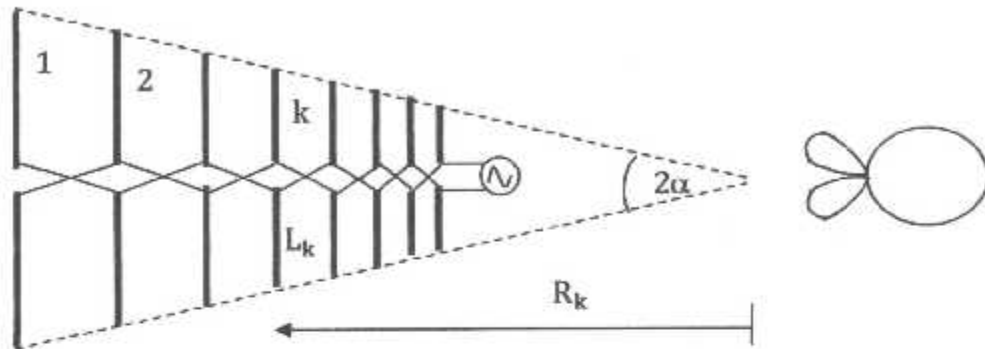


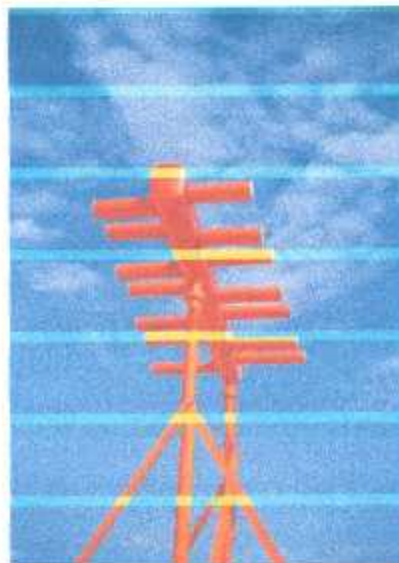
Fig. 2.7: Schéma d'un réseau de dipôles log-périodique.

Les fréquences haute et basse sont déterminées par les longueurs des éléments du réseau les plus basses et les plus hautes respectivement.

L'excitation est assurée par une ligne symétrique, les éléments adjacents sont connectés alternativement sur des brins opposés, L'attaque se fait du côté des brins les plus courts, le signal se propageant ainsi jusqu'au brin accordé, le dipôle suivant agissant alors comme un réflecteur et les précédents comme des directeurs, Ainsi , le rayonnement est unidirectionnel , le maximum apparaissant dans l'axe de l'antenne et dans la direction des éléments les plus courts.

Le gain de ce type d'antenne est de l'ordre de 10 dB pour des valeurs de  $\tau$  proche de 1.

La photo suivante est celle d'une antenne réelle de type LPDA de gain 9,5dB



### 2.4.3 Réseaux d'antennes

Un objectif important en télécommunications est d'améliorer le rapport signal/bruit à la réception. Cette amélioration peut être obtenue en utilisant des antennes directives à grand gain en émission et en réception

Une antenne réseau est un ensemble d'antennes identique (appelées éléments) distribuées dans un espace, de façon uniforme ou non, et reliées entre elles au niveau du récepteur, ce dernier utilise donc à un même instant les données provenant de tous les éléments pour ne fournir qu'une seule donnée de sortie.

Les antennes réseaux permettent avec l'utilisation de processeurs dédiés au traitement du signal numérique de plus en plus puissants et à cout de plus en plus abordable de synthétiser des diagrammes de rayonnement en fonction de nombreux paramètres :

- Direction du signal.
- Puissance et direction des interférences.
- Niveau des lobes secondaires.

Les éléments du réseau peuvent être arrangés de plusieurs manières : en ligne, en rectangle, en cercle... (fig. 2.8).

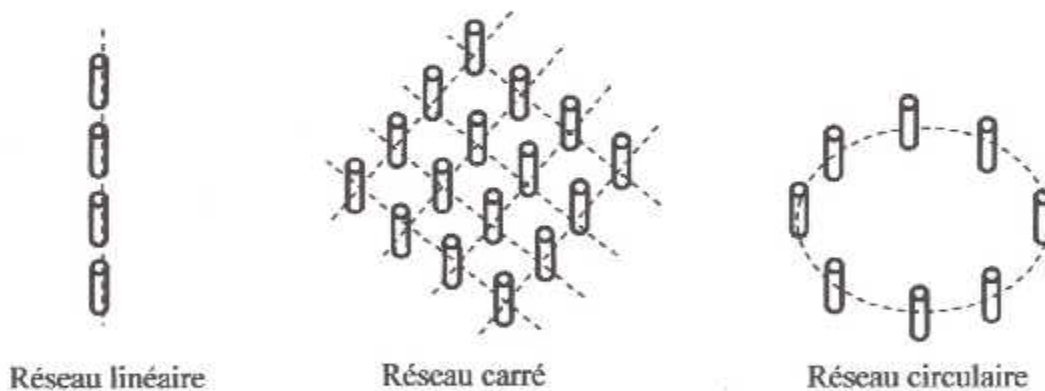


Fig. 2.8 : Les différents types des réseaux

D'une façon générale, le diagramme de champ lointain d'un réseau est donné par le diagramme de rayonnement de l'élément simple multiplié par le facteur de réseau.

• **Facteur de réseau d'un réseau linéaire**

Un réseau linéaire est un alignement constitué de N sources isotropes équidistantes d'une distance constante d. Le déphasage des courants d'excitation est progressif avec un pas constant  $\phi$  (fig. 2.9).

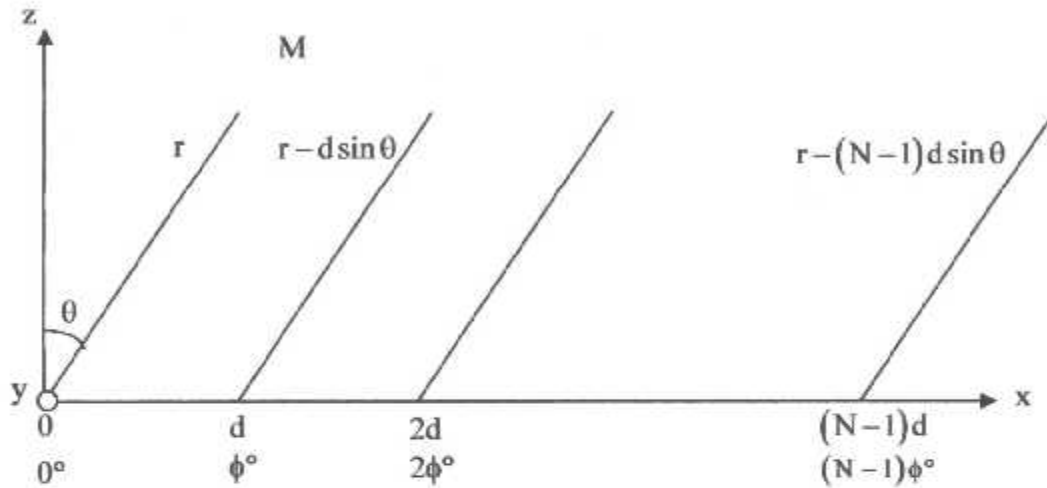


Fig. 2.9 : Réseau linéaire

Le courant alimentant l'antenne N° n est de la forme :  $I_n = A_n e^{jn\phi} I_0$

Le champ total rayonné par les N sources est la somme des champs individuels :

$$\frac{e^{jkr}}{r} I_0 \left( A_0 + A_1 e^{j(kd \sin \theta + \phi)} + A_2 e^{2j(kd \sin \theta + \phi)} + A_3 e^{3j(kd \sin \theta + \phi)} + \dots \right)$$

On définit le facteur de réseau par :

$$F_r(\theta) = \left| A_0 + A_1 e^{j(kd \sin \theta + \phi)} + A_2 e^{2j(kd \sin \theta + \phi)} + A_3 e^{3j(kd \sin \theta + \phi)} + \dots \right|$$

En posant  $\psi = kd \sin \theta + \phi$ , on aura :

$$F_r(\psi) = \left| A_0 + A_1 e^{j\psi} + A_2 e^{2j\psi} + A_3 e^{3j\psi} + \dots \right| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{jn\psi} \right| \tag{2.21}$$

• **Cas d'une distribution de courant uniforme**

Dans le cas d'une distribution uniforme, tous les courants ont même amplitude ( $A_i = Cste$ ).

Le facteur de réseau devient dans ce cas:

$$F_r(\psi) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \right| = \left| \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right| \tag{2.22}$$

### • Diagramme de rayonnement

Le diagramme est de révolution autour de l'axe de l'alignement. L'espace visible est défini par l'ensemble des valeurs de  $\psi$  qui correspondent à des directions de l'espace réel soit :

$$\psi \in [-kd + \phi, kd + \phi]$$

Le maximum de champ se produit pour  $\psi = 0$ , soit  $\phi = -kd \sin \theta_0$  et donc

$$\theta_0 = \text{Arcsin} \left( \frac{\phi}{kd} \right)$$

Les premiers nuls ont lieu lorsque  $\frac{N\psi}{2} = \pm m\pi$  ( $m=1,2,\dots$ )

### • Influence de la distance d

En général, on ne doit pas avoir un dédoublement du lobe principal dans la zone balayée. Le nombre de lobes principaux dans l'espace réel dépend de la distance d entre les sources :

- Si  $d \leq \lambda/2$ , il y a un seul lobe principal
- Si  $d \geq \lambda$ , il y a plus d'un lobe principal. Les lobes en plus s'appellent lobes de réseau.

Pour l'éviter, on doit écrire  $\psi \leq \pm 2\pi$ , ce qui donne :

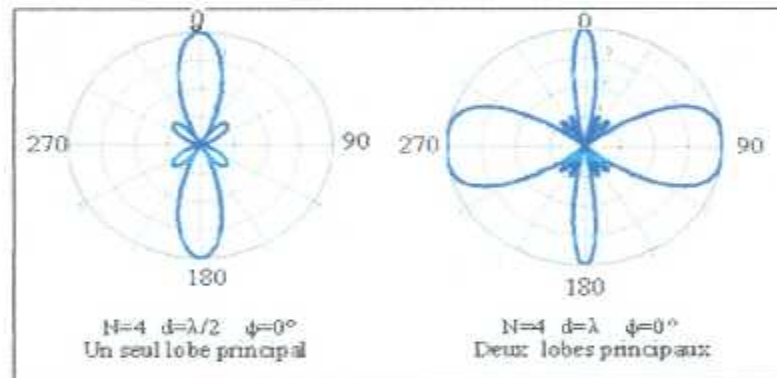
$$d < \frac{\lambda}{1 + |\sin \theta_M|}$$


Fig. 2.10: Influence de la distance d

### • Influence du nombre de sources

Pour une distance d constante, l'augmentation de N augmente la directivité et donc par une diminution l'ouverture du lobe principal mais cela se traduit aussi par une augmentation du nombre de lobes secondaires (Fig. 2.11).

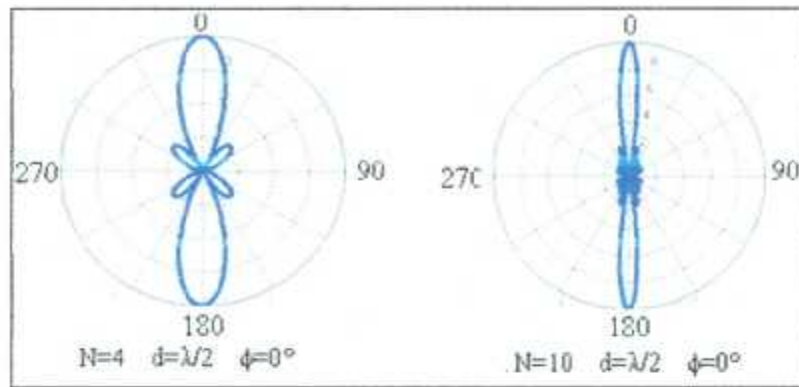


Fig. 2.11 : Effet du nombre de source

- **Influence du déphasage  $\phi$**

Une phase variable permet d'orienter le lobe de broadside ( $\theta_0 = \pm 90^\circ$ ) à endfire ( $\theta_0 = 180^\circ$ ). c'est le principe utilisé dans les antennes à balayage électronique (Fig. 2.12).

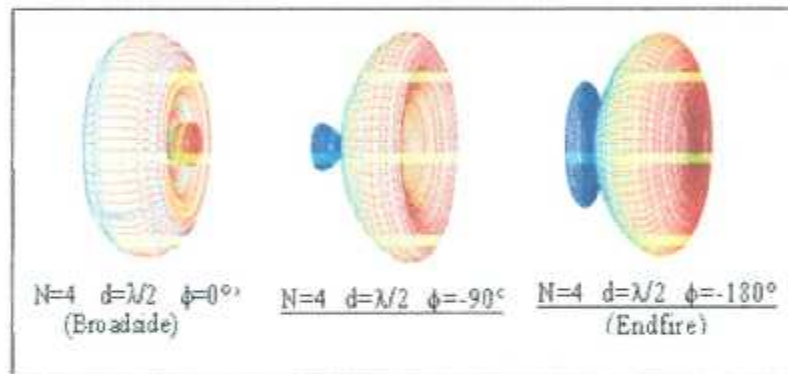


Fig. 2.12 : Influence de la phase

La photo (Fig. 2.13) montre un réseau d'antennes de type log-périodique utilisées dans le localizer.

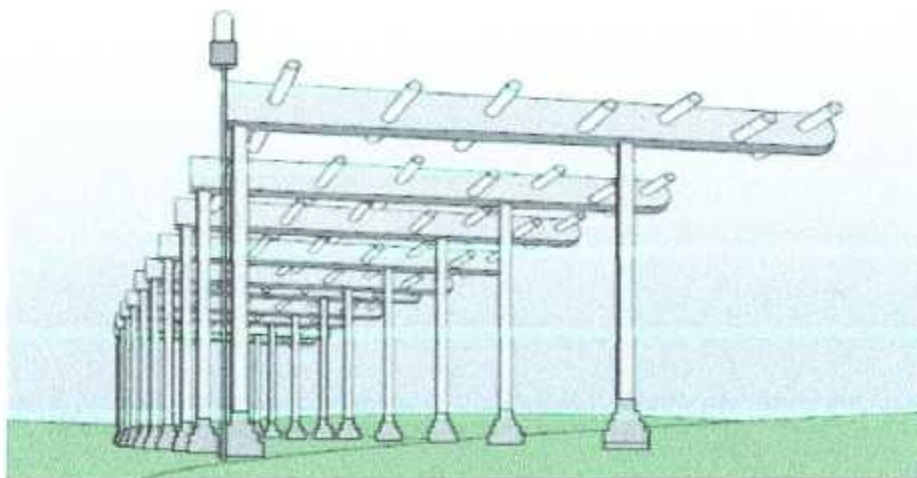


Fig. 2.13 : Réseau Localizer utilisant les antennes log périodiques

- **Diminution du niveau des lobes secondaires**

Dans les applications des antennes, on cherche le plus souvent des digrammes avec des lobes secondaires les plus faibles possibles pour éviter les réflexions et les interférences.

Dans les réseaux linéaires à excitation uniforme, le rapport entre le lobe principal et le premier lobe secondaire est d'environ 13dB, ce qui est beaucoup. Pour l'améliorer, on a recours à des excitations non uniformes qui consistent à alimenter le réseau d'antennes avec des courants d'amplitudes décroissantes du centre vers les bords.

De nombreuses méthodes sont utilisées pour synthétiser de tels réseaux. On donne ici trois exemples.

- **Méthode binomiale**

Les coefficients d'excitation sont donnés par l'expression  $A_n = \frac{(N-1)!}{(N-n)!(n-1)!}$

Dans cette méthode, les lobes secondaires ont des niveaux très bas, par contre la largeur du lobe principal est grande avec une plage de variation des amplitudes des courants d'excitation trop élevée.

- **Méthode de Dolph-Tchebychev**

Cette méthode basée sur les polynômes Tchebychev permet d'obtenir une ouverture minimale pour un niveau relatif R de lobes secondaires donné (fig. 2.14). Elle est utilisée pour réaliser des réseaux de faible dimension.

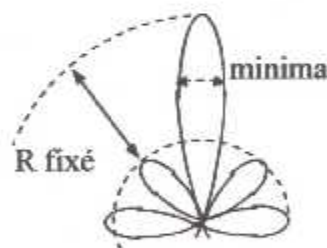


Fig. 2.14 : Méthode de Dolph-Tchebychev

- **Méthode des séries de Fourier**

Cette méthode consiste à identifier le facteur de réseau à une série de Fourier, ce qui permet de déterminer les courants d'excitation.

## Chap 3 : ETUDE ET ANALYSE DU SYSTEME ILS

### 3.1 Introduction

Ce chapitre décrit la partie théorique sur le système ILS, introduit au premier chapitre. Il met en évidence les différentes caractéristiques (DDM, SDM, couverture et diagrammes de rayonnement) du localizer et du glide.

### 3.2 Définition de la trajectoire d'approche et d'atterrissage

On peut définir la trajectoire d'approche et d'atterrissage comme l'intersection d'un plan vertical passant par l'axe de piste avec le plan oblique qui passe par le point d'impact (ou toucher des roues) et fait avec le plan horizontal de piste l'angle utilisé par l'avion pour effectuer sa descente (fig. 3.1).

- Le radioalignement de piste (RAP) ou "Localizer" définit radioélectriquement le plan vertical passant par l'axe de piste.
- Le radioalignement de descente (RAD) ou "Glide Path" définit le plan oblique de descente.

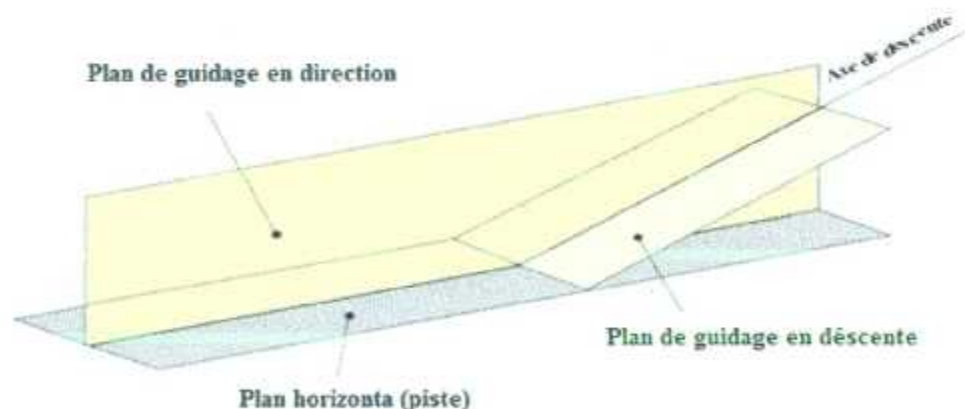


Fig. 3.1 : Définition de l'axe ILS

L'avion aura aussi à connaître sa progression sur cette trajectoire, donc sa distance par rapport au seuil de piste (qui est la zone de toucher des roues) pour effectuer les changements de configuration de vol préparatoires à l'atterrissage (réduction de vitesse, train, volets ...).

De ce fait, la trajectoire d'approche est radioélectriquement balisée en 3 points par 3 radiobornes (ou "Markers") respectivement nommées "balise intérieure", "balise intermédiaire" et "balise extérieure" ("Inner, Middle et Outer Marker").

### 3.3 Secteurs d'alignement

Les informations RAP. et RAD. se matérialisent à bord par une double information d'écart (regroupées sur le même indicateur).

Une aiguille verticale indique l'écart angulaire de la direction Localizer / avion par rapport au plan RAP (ou axe de piste) et dévie dans le sens de la correction à effectuer pour rejoindre le plan. Une aiguille centrée correspond à une correction nulle : l'avion est sur l'axe de piste.

Au delà d'un certain écart, compris entre  $\pm 1,5^\circ$  et  $\pm 3^\circ$  (en fonction de la longueur de la piste), l'aiguille reste en butée à droite ou à gauche.

On distingue 2 zones d'utilisation :

- Le secteur de guidage proportionnel : appelé secteur d'alignement de piste. C'est la zone de l'espace de part et d'autre du plan à l'intérieur de laquelle l'indicateur dévie proportionnellement à l'écart angulaire.
- Le secteur de guidage complémentaire : appelé aussi couverture. C'est la zone de l'espace où les signaux Localizer continuent à être reçus normalement mais l'aiguille reste en butée.

De la même façon, une aiguille horizontale indique l'écart angulaire de la direction point d'impact / avion par rapport au plan R.A.D. Elle indique le sens de la correction à effectuer pour rejoindre le plan de descente.

On retrouve aussi les 2 mêmes zones d'utilisation vues précédemment.

Le volume commun aux secteurs d'alignement de piste et de descente définit une pyramide dite de sécurité, centrée sur l'axe d'approche et dont la section (par des plans verticaux perpendiculaires à la direction de l'axe de la piste) constitue la fenêtre d'approche (fig.3.2).

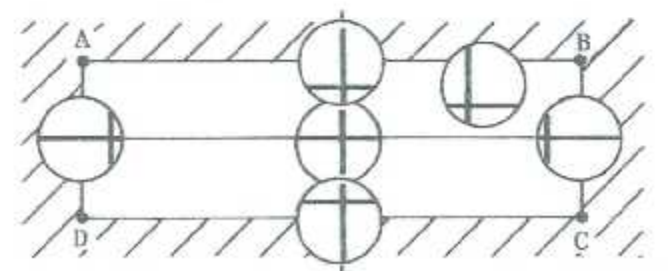


Fig. 3.2 : Fenêtre d'approche



### 3.4 Le localizer

#### 3.4.1 Couverture en azimuth

La couverture au-delà du secteur  $\pm 35^\circ$  par rapport à l'axe de piste n'est pas obligatoire. Si elle existe, la portée correspondante sera de 10NM. Les portées indiquées sont des portées minimales (Fig. 3.3).

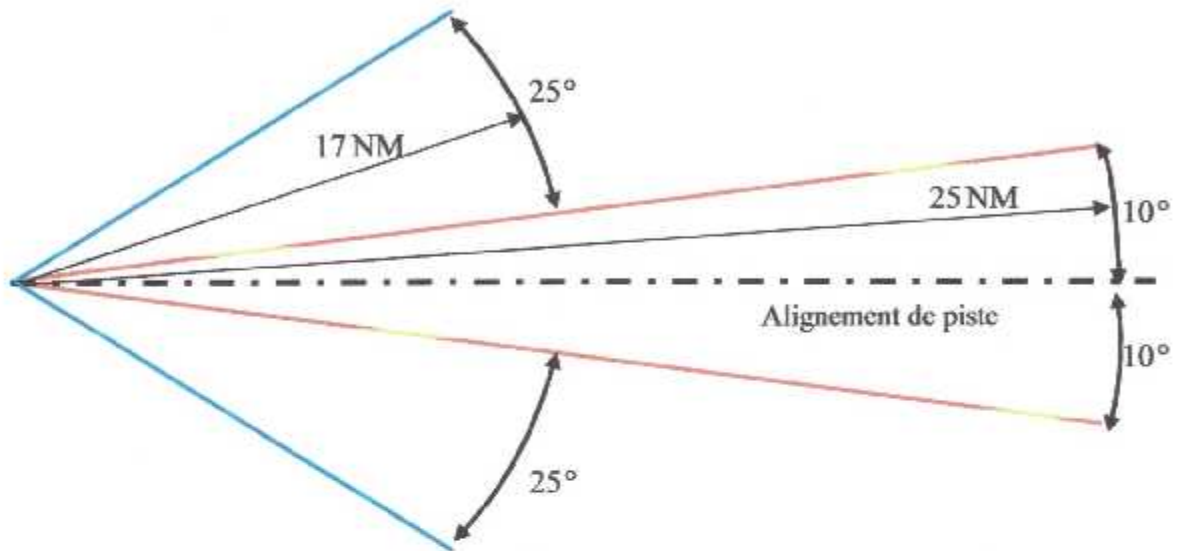


Fig. 3.3 : Couverture azimuthale du localizer

- **Couverture en site**

Les signaux Localizer doivent être reçus à l'intérieur du volume délimité par un plan incliné à  $7^\circ$  sur l'horizontale et aux distances spécifiées précédemment en azimuth.

#### 3.4.2 Principe de la définition radioélectrique du plan vertical d'axe de piste

- **Signal rayonné : variation des taux de modulation d'espace**

Le plan est défini à l'aide d'un signal VHF modulé en amplitude simultanément par du 90Hz et du 150Hz. Cette modulation respecte les critères suivants :

- La variation des taux de modulation  $M_{90}$  et  $M_{150}$  est symétrique de part et d'autre du plan vertical d'axe à définir.
- Dans ce même plan (sur l'axe de piste), les taux de modulation seront égaux :  

$$M_{90} = M_{150} = 20\%$$
- Par convention, vu du sens d'approche,  $M_{90}$  prédominera à gauche du plan. Inversement,  $M_{150}$  sera prédominant à droite du plan.

### • Récepteur de bord : DDM et SDM

Le récepteur de bord (Fig. 3.4) reçoit donc un signal VHF modulé en amplitude par du 90Hz et du 150Hz (l'indicatif n'est pas utilisé pour définir le plan). Ces deux fréquences BF mélangées en sortie de détection forment le signal Localizer composite. Il faut alors les séparer par filtrage. Les tensions alternatives 90 et 150 obtenues sont redressées et transformées en tensions continues  $V_{90}$  et  $V_{150}$  dont on fera la différence dans un premier circuit et la somme dans un second.

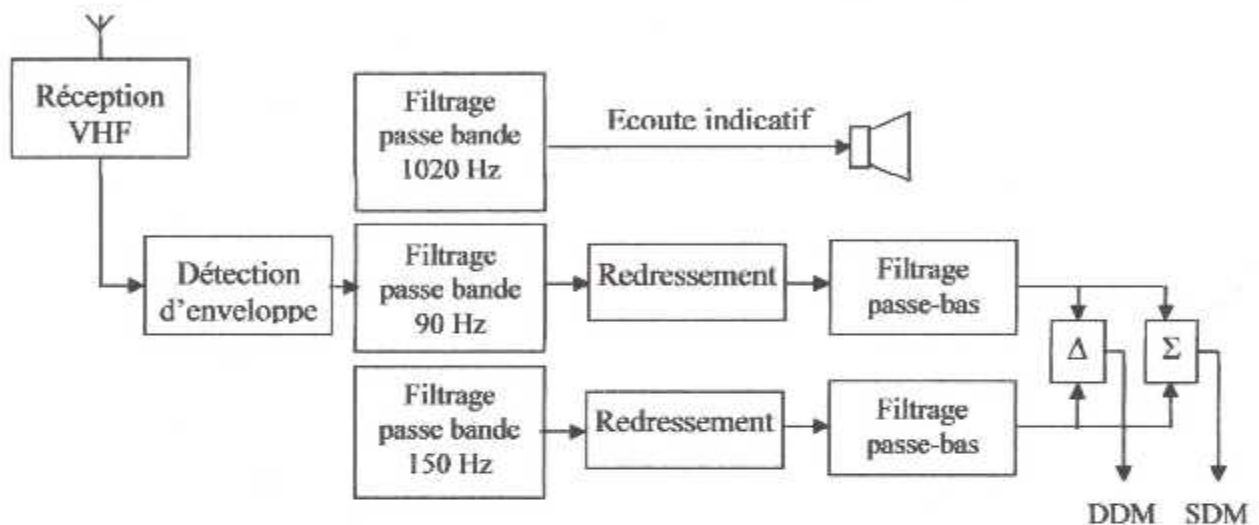


Fig. 3.4 : Synoptique du récepteur de bord du Localizer

Si le récepteur est réglé par une CAG efficace, les variations du niveau des fréquences 90Hz et 150Hz du signal composite ne résulteront que des variations des taux de modulation  $M_{90}$  et  $M_{150}$  du signal VHF d'entrée. Après redressement et filtrage,  $V_{90}$  et  $V_{150}$  varient comme les modules  $|M_{90}|$  et  $|M_{150}|$  :

$$V_{90} = C \cdot |M_{90}| \quad \text{et} \quad V_{150} = C \cdot |M_{150}| \quad C : \text{une constante}$$

d'où une différence des taux de modulation :

$$\Delta = V_{150} - V_{90} = C \cdot (|M_{150}| - |M_{90}|)$$

et une somme des taux de modulation :

$$\Sigma = V_{150} + V_{90} = C \cdot (|M_{150}| + |M_{90}|)$$

La constante  $C$  est normalisée : pour une différence à l'entrée du récepteur de 15,5% entre les taux de modulation  $M_{150}$  et  $M_{90}$ , la tension devra être de 150 mV aux bornes d'une résistance de  $1000\Omega$  (ou 150  $\mu\text{A}$  traversant ces  $1000\Omega$ ).

La tension  $\Delta$  obtenue en sortie de redressement et filtrage est directement représentative par sa valeur et son signe de la position du récepteur par rapport au plan (axe de piste).

Du fait de la relation normalisée entre  $V_{90} / V_{150}$  et  $|M_{90}| / |M_{150}|$ , la tension  $\Delta$  prend le nom de différence de modulation, notée DDM :

$$\text{DDM} = |M_{150}| - |M_{90}| \quad (3.1)$$

De même, la tension  $\Sigma$  prend le nom de somme de modulation, notée SDM :

$$\text{SDM} = |M_{150}| + |M_{90}| \quad (3.2)$$

Les variations de la DDM et de la SDM en fonction de l'angle d'azimut  $\alpha$  sont illustrées en figure 3.5. L'axe des ordonnées peut aussi être gradué en unités de courant de déviation (en microampère)

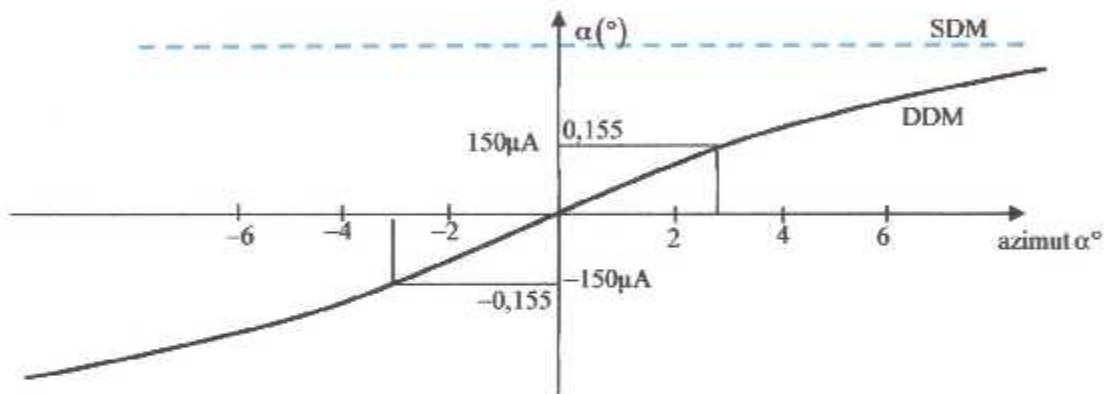


Fig. 3.5 : Variation de la DDM et de la SDM en fonction de  $\alpha$

On peut remarquer que la SDM reste constante et égale à 0,4 (ou 40%) dans la zone d'azimut considérée. Toute diminution de la SDM ne peut résulter que d'une diminution de  $M_{150}$  ou de  $M_{90}$ . A toute diminution significative sera associé l'apparition d'un drapeau d'alarme (ou "Flag") indiquant la non validité de l'information affichée.

- **Variation de la DDM dans le secteur d'alignement de piste**

Les courants alimentant l'indicateur de déviation  $\pm 150\mu\text{A}$  correspondent à une  $\text{DDM} = \pm 15,5\%$  (ou 0,155) et aussi à la mise en butée de l'aiguille de l'indicateur de bord à droite ou à gauche. Ils délimitent ainsi les bords droit et gauche du secteur d'alignement de piste. A l'intérieur de ce secteur, la DDM doit varier linéairement en fonction de l'écart latéral au seuil de piste (Fig. 3.6) :

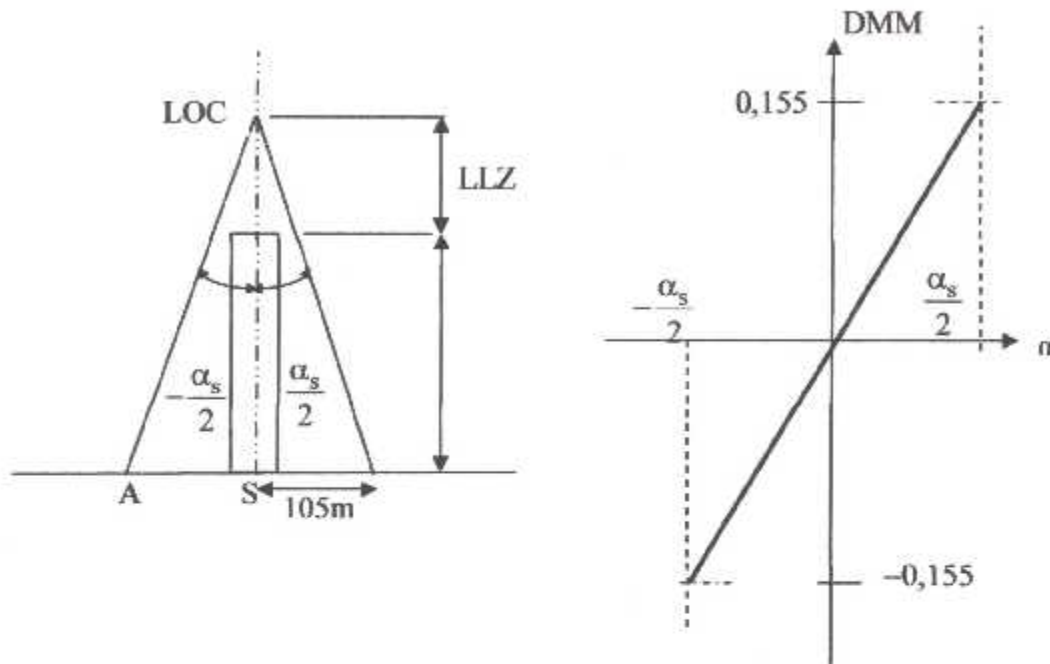


Fig. 3.6 : Schémas du secteur d'alignement et DDM

On peut calculer la valeur de l'angle d'ouverture du secteur localizer de la façon suivante :

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_s}{2}\right) = \frac{105}{L + LLZ} \quad (3.3)$$

• **Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture**

Il importe que dans tout le reste de l'espace où le localizer est normalement reçu l'aiguille d'indicateur ne décolle jamais de sa butée (et donc ne puisse pas venir se recentrer) et que la SDM ne suscite jamais une indication d'alarme. On définit les valeurs minimales en dessous desquelles ces paramètres ne doivent pas descendre dans la zone d'espace où le localizer est normalement reçu par un gabarit. Ce gabarit est le suivant (fig. 3.7) :

- Variation linéaire entre  $\pm 150 \mu\text{A}$  (15,5%) à l'intérieur du secteur d'alignement de piste.
- Variation sensiblement linéaire jusqu'à la valeur de  $\pm 175 \mu\text{A}$  (18%) et maintien de cette valeur jusqu'à  $\alpha = \pm 10^\circ$ .
- De  $\alpha = \pm 10^\circ$  jusqu'aux limites en azimuth de la couverture VHF, la DDM sera toujours supérieure à  $150 \mu\text{A}$  (15,5%).
- La SDM restera supérieure à 40% dans le secteur d'alignement et supérieure à 30% ailleurs.

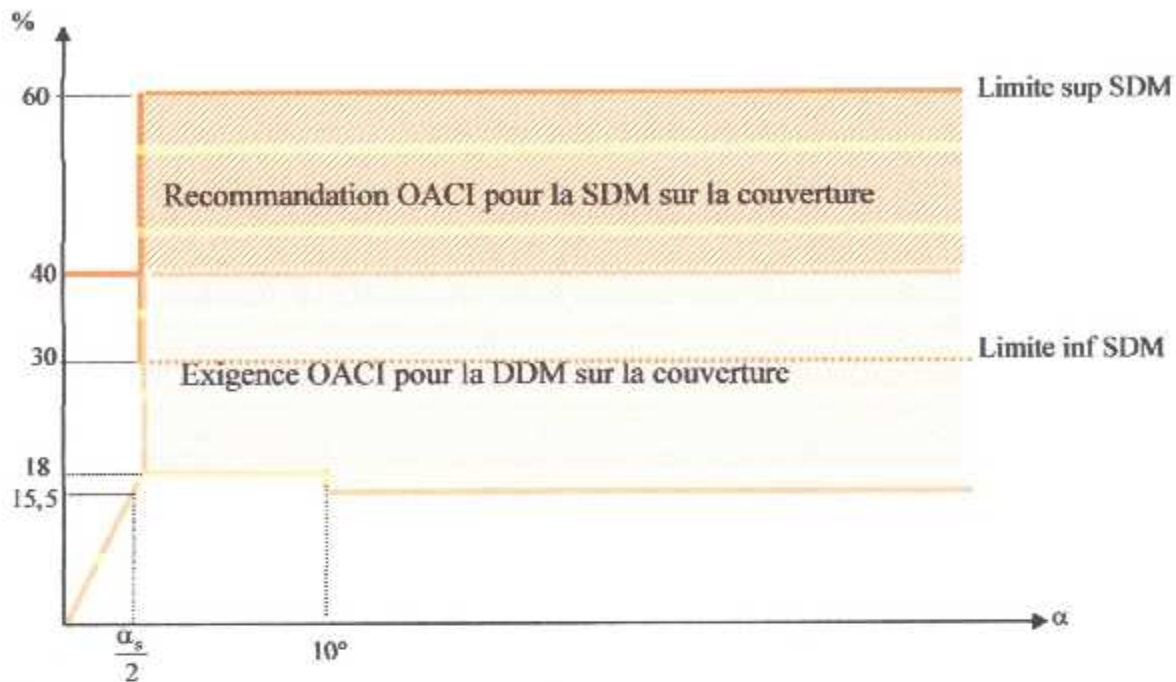


Fig. 3.7 : Gabarit des courbes DDM et SDM

### 3.4.3 Génération des signaux

Dans tous les cas, le fonctionnement d'un RAP ou Localizer se ramène à l'émission de 2 types de signaux générés au niveau de la baie électronique à partir des modulateurs et des cartes électronique spéciales.

- **Signal porteuse modulée en amplitude rayonné selon un diagramme pair**

Un diagramme pair signifie que par rapport à l'axe de la piste (azimut  $\alpha=0$ )  $P(-\alpha) = P(\alpha)$

Le signal d'émission est de la forme :

$$s(t) = \cos \omega t [1 + M_{90} \sin 3\Omega t + M_{150} \sin 5\Omega t]$$

avec  $\Omega = 2\pi \cdot 30 \text{ rad/s}$  et  $M_{90} = M_{150} = 0,2$

Ce signal est souvent noté "P+BL" en français (Porteuse et Bandes Latérales) ou "CSB" (Carrier Side Band) en anglais.

Le champ rayonné est alors de la forme :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_r P [1 + M_{90} \sin 3\Omega t + M_{150} \sin 5\Omega t]$$

où  $P(\alpha)$  noté  $P$  est le diagramme pair dans lequel est rayonné ce champ.

$$\text{et } \varepsilon_r = \frac{1}{r} \cos \left( \omega t - \frac{2\pi r}{\lambda} \right)$$

ou encore  $\varepsilon_0 = \varepsilon_r [P + 0,2P \sin 3\Omega t + 0,2P \sin 5\Omega t]$

En posant  $0,2P=F$  on obtient :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_r P + \varepsilon_r F \sin 3\Omega t + \varepsilon_r F \sin 5\Omega t = \varepsilon_p + \varepsilon_{BL90} + \varepsilon_{BL150} \quad (3.4)$$

Le signal modulé en amplitude équivaut donc à l'émission simultanée :

- d'un champ de porteuse  $\varepsilon_p$  rayonnée selon le diagramme pair  $P(\alpha)$
- d'un champ bandes latérales  $\varepsilon_{BL90}$  rayonné selon le diagramme pair  $F(\alpha)$
- d'un champ bandes latérales  $\varepsilon_{BL150}$  rayonné selon le diagramme pair  $F(\alpha)$

Les 3 champs sont en phase VHF entre eux.

• **Signaux bandes latérales 90 Hz et 150 Hz rayonnés selon un diagramme impair**

Un diagramme impair signifie que par rapport à l'axe de la piste :  $F'(-\alpha) = -F'(\alpha)$

Le signal d'émission est de la forme :

$$d(t) = k \sin(5\Omega t) \cos(\omega t) + k \sin(3\Omega t) \cos(\omega t - \pi)$$

$$\text{ou } d(t) = k \cos(\omega t) [\sin(5\Omega t) - \sin(3\Omega t)]$$

$d(t)$  est souvent noté "BLS" en français (Bandes Latérales Seules) ou "SBO" en anglais

(Side Band Only) et il est rayonné par un diagramme  $F'$  impair. Le champ rayonné est de la forme :

$$\varepsilon_{BLS} = \varepsilon_r [kF' \sin 5\Omega t - kF' \sin 3\Omega t] = \varepsilon_r kF' \sin(5\Omega t) - \varepsilon_r kF' \sin(3\Omega t) = \varepsilon_{BLS150} + \varepsilon_{BLS90} \quad (3.5)$$

$$\text{avec toujours : } \varepsilon_r = \frac{1}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$$

Le diagramme  $F'(\alpha)$  est en phase VHF avec le diagramme  $P(\alpha)$  à droite de l'axe, et en opposition de phase VHF à gauche de l'axe.

• **Champ globalement rayonné**

Le champ résultant rayonné est donc la somme des champs définis aux deux dernières parties du chapitre :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_p + \varepsilon_{BL150} + \varepsilon_{BL90} + \varepsilon_{BLS150} + \varepsilon_{BLS90} = \varepsilon_r \left[ P + (F + kF') \sin(5\Omega t) + (F - kF') \sin(3\Omega t) \right] \\ \Rightarrow \varepsilon &= \varepsilon_r P \left[ 1 + \frac{F + kF'}{P} \sin(5\Omega t) + \frac{F - kF'}{P} \sin(3\Omega t) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Cette expression est celle d'un signal modulé en amplitude par du 90Hz et du 150Hz avec les taux de modulation respectifs :

$$M_{90} = \frac{F - kF'}{P} = 0,2 - \frac{kF'}{P} \tag{3.7}$$

$$M_{150} = \frac{F + kF'}{P} = 0,2 + \frac{kF'}{P} \tag{3.8}$$

On remarquera que ces deux taux de modulation sont la somme des deux taux de modulation partiels :

- le premier est le rapport de la bande latérale émise selon le diagramme pair (F) par rapport au diagramme de la porteuse (P) et qui vaut 0,2.
- le second est le rapport de la bande latérale émise selon le diagramme impair (F') par rapport au diagramme de la porteuse (P).

Ceci est illustré dans la figure 3.8.

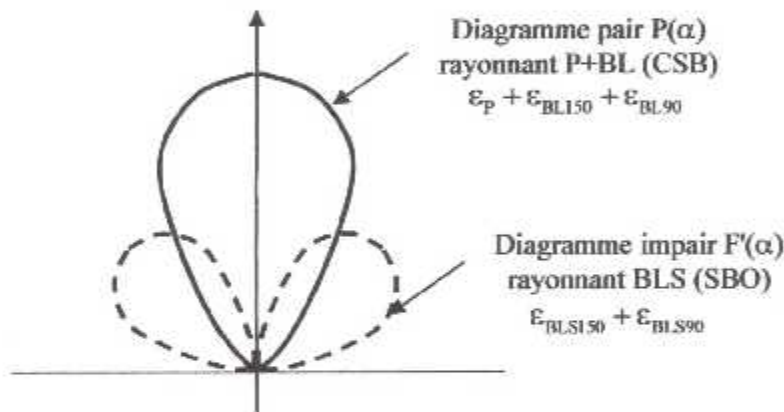


Fig. 3.8 : Allures des diagrammes pair et impair en coordonnées polaires

• Expression de la DDM et de la SDM

Ces deux quantités sont élaborées dans le récepteur de bord, et par définition :

$$DDM(\alpha) = |M_{150}| - |M_{90}| \tag{3.9}$$

$$SDM(\alpha) = |M_{150}| + |M_{90}| \tag{3.10}$$

Deux cas sont à considérer selon que  $|F| < |kF'|$  ou que  $|F| > |kF'|$ . Le tableau 3.1 résume les résultats dans ces deux cas.

|   |   |   |                           |
|---|---|---|---------------------------|
| $ F  >  kF' $<br>(secteur d'alignement) | $ M_{90}  = \frac{F - kF'}{P} = 0,2 - \frac{kF'}{P}$<br>$ M_{150}  = \frac{F + kF'}{P} = 0,2 + \frac{kF'}{P}$ | $DDM(\alpha) = \frac{2kF'}{P}$<br>$SDM(\alpha) = 0,4$ | DDM > 0 à droite de l'axe |
| $ F  <  kF' $<br>(zone d'inversion)     | $ M_{90}  = -\frac{F - kF'}{P}$<br>$ M_{150}  = \frac{F + kF'}{P}$  | $DDM(\alpha) = 0,4$<br>$SDM(\alpha) = \frac{2kF'}{P}$ | SDM > 0                   |

Tableau 3.1: Variation de la DDM et de la SDM

Ces diverses relations du tableau dites équations fondamentales de l'ILS montrent que l'information de guidage (la DDM) dépend directement de l'allure des diagrammes pair  $P(\alpha)$  et impair  $F'(\alpha)$ .

Pour que l'ensemble du système RAP ne surmodule pas (ce qui altérerait la qualité des signaux 90 et 150 qui servent à la navigation), il faut que la somme des taux de modulation reste inférieure à 1: indicatif + phonie +  $M_{150}$  +  $M_{90}$  < 1.

#### 3.4.4 Réseau d'aériens

Pour fabriquer les diagrammes pair  $P(\alpha)$  et impair  $F'(\alpha)$  vus dans les paragraphes précédents, on utilise un seul réseau linéaire constitué de  $N$  antennes équidistantes et selon le mode d'excitation des antennes, on obtient l'un ou l'autre des diagrammes .

Il existe plusieurs types de réseaux d'antennes selon le nombre, allant de 3,5,...,21 antennes selon e fabricant.

Pour donner une idée de la réalisation de ces réseaux, nous présentons ici le cas simple d'un réseau Localizer à cinq antennes et d'un réseau Localizer plus élaboré à 13 antennes.

##### • Localiser 5 antennes

La figure 3.9 suivante montre la position relative des antennes d'un réseau linéaire constitué de 5 éléments identiques de diagramme de rayonnement  $f(\alpha)$  : un élément central noté C, deux éléments situées à gauche de C notées G1, G2 et deux à droite notés D1 et D2.

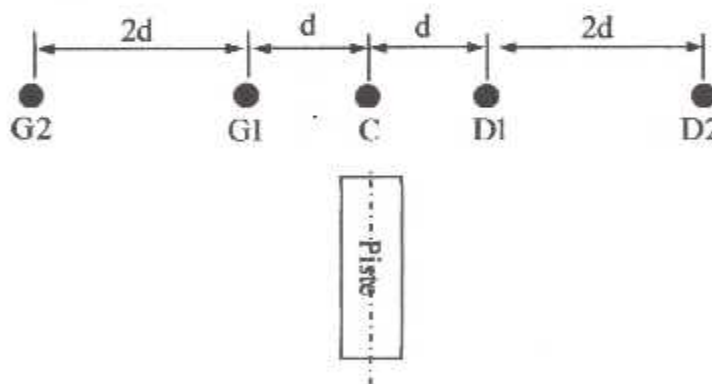


Fig. 3.9 : Schéma de principe d'un localizer 5 antennes



– Obtention du diagramme pair  $P(\alpha)$

Pour obtenir le diagramme pair  $P(\alpha)$ , on alimente uniquement l'antenne centrale selon le tableau 3.2 :

| Antennes  | G1 | G2 | C | D1 | D2 |
|-----------|----|----|---|----|----|
| Amplitude |    |    | 1 |    |    |
| Phase     |    |    | 0 |    |    |

Tableau 3.2 : Alimentation pour obtenir le diagramme pair  $P(\alpha)$

On aura donc :

$$P(\alpha) = f(\alpha) \quad \text{et} \quad F(\alpha) = 0,2P(\alpha)$$

– Obtention du diagramme impair  $F'(\alpha)$

Pour obtenir le diagramme impair, on alimente les antennes gauche G1, G2 et droite D1, selon le tableau 3.3 :

| Antennes  | G1         | G2         | C | D1          | D2          |
|-----------|------------|------------|---|-------------|-------------|
| Amplitude | $k_2/2$    | $k_1/2$    |   | $k_1/2$     | $k_2/2$     |
| Phase     | $90^\circ$ | $90^\circ$ |   | $-90^\circ$ | $-90^\circ$ |

Tableau 3.3 : Alimentation pour obtenir le diagramme impair  $F'(\alpha)$

On aura donc :

$$kF'(\alpha) = 2f(\alpha) \left[ k_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right) + k_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} 3d \sin \alpha\right) \right]$$

– Expression de la DDM

En zone de non inversion :

$$DDM(\alpha) = \frac{2kF'(\alpha)}{P(\alpha)} = 4 \left[ k_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right) + k_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} 3d \sin \alpha\right) \right]$$

$$SDM(\alpha) = 0,4$$

La figure 3.10 montre l'allure de la DDM et SDM obtenues avec les valeurs suivantes :

$$d = 0,4\lambda, k_1 = 0,12 \quad \text{et} \quad k_2 = 0,06$$

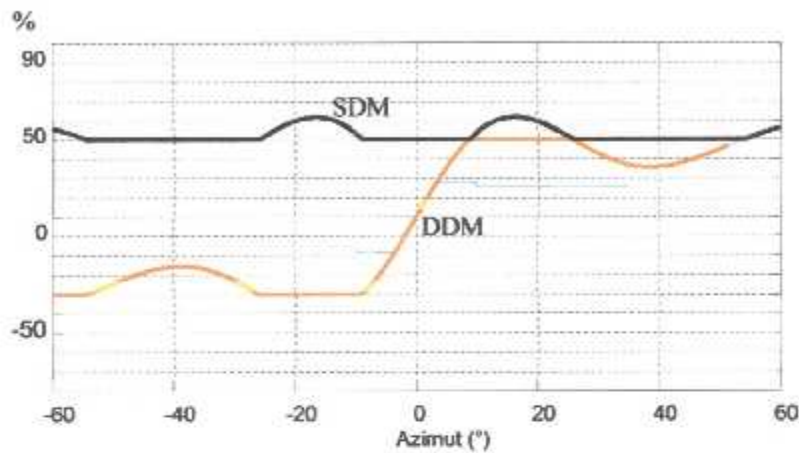


Fig. 3.10 : DDM et SDM du réseau de 5 antennes et un demi-secteur de 3°

Ces valeurs correspondent à un demi-secteur d'alignement de 3° soit. Nous voyons ici que la SDM maximum est autour de 60%. Si on rajoute les 10% de l'indicatif et les 30% de l'éventuelle phonie, on est à 100% de modulation : donc on n'est pas en surmodulation.

Dans la figure 3.11, on a représenté la DDM et SDM pour un demi-secteur d'alignement de 1,8° qui correspond à une piste de longueur 3000m.

Nous voyons ici que la SDM maximum est autour de 85%. Si on rajoute les 10% de l'indicatif et les 30% de l'éventuelle phonie, on est en surmodulation.

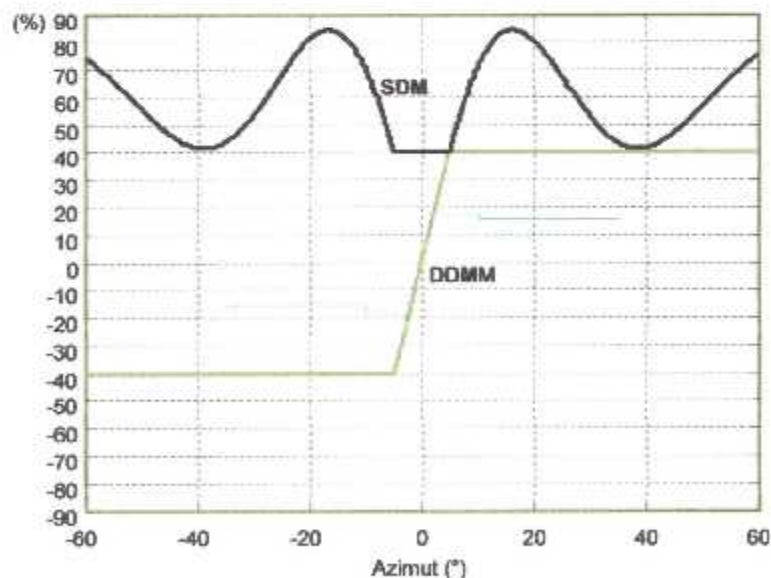


Fig. 3.11 : DDM et SDM du réseau de 5 antennes et un demi-secteur de 1,8°

Pour remédier à cette situation, on doit utiliser des diagrammes directifs en augmentant le nombre d'antennes du réseau.

• Réseau à 14 antennes

Dans le réseau Thales monofréquence à 14 antennes, les antennes sont régulièrement espacées de la distance  $d$  comme le montre la figure 3.12.

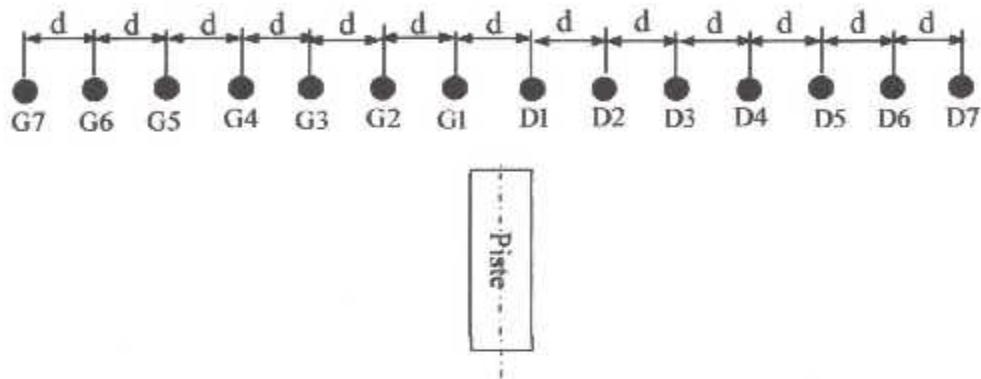


Fig. 3.12 : Réseau 14 antennes

Les tableaux 3.4 et 3.5 donnent les coefficients d'alimentation pour l'obtention des diagrammes pair et impair.

| Ant       | G7   | G6   | G5   | G4    | G3    | G2    | G1  | D1  | D2    | D3    | D4    | D5   | D6   | D7   |
|-----------|------|------|------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|-------|------|------|------|
| Amp (%)   | 3,12 | 5,24 | 14,6 | 18,17 | 36,44 | 41,66 | 100 | 100 | 41,66 | 36,44 | 18,17 | 14,6 | 5,24 | 3,12 |
| Phase (°) | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0   | 0   | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    |      |

Tableau 3.4 : Alimentation pour obtenir le diagramme impair  $P(\alpha)$

| Ant       | G7   | G6   | G5   | G4   | G3    | G2    | G1  | D1  | D2    | D3    | D4   | D5   | D6   | D7   |
|-----------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|------|------|------|------|
| Amp (%)   | 14,5 | 35,9 | 37,2 | 53,7 | 63,05 | 77,73 | 100 | 100 | 77,73 | 63,05 | 53,7 | 37,2 | 35,9 | 14,5 |
| Phase (°) | 90   | 90   | 90   | 90   | 90    | 90    | 90  | -90 | -90   | -90   | -90  | -90  | -90  | -90  |

Tableau 3.5 : Alimentation pour obtenir le diagramme impair  $F'(\alpha)$

$P(\alpha)$  est obtenu par le groupement des 14 antennes alimentées en phase.

$F'(\alpha)$  est obtenu par le groupement des 14 antennes alimentées par paire en opposition de phase.

La figure 3.13 montre l'allure de la DDM et SDM obtenues avec la valeur  $d = 0,4\lambda$  et pour un demi-secteur d'alignement de  $1,8^\circ$ . On peut remarquer qu'il n'y a pas de surmodulation comme c'était le cas avec un réseau de cinq antennes.

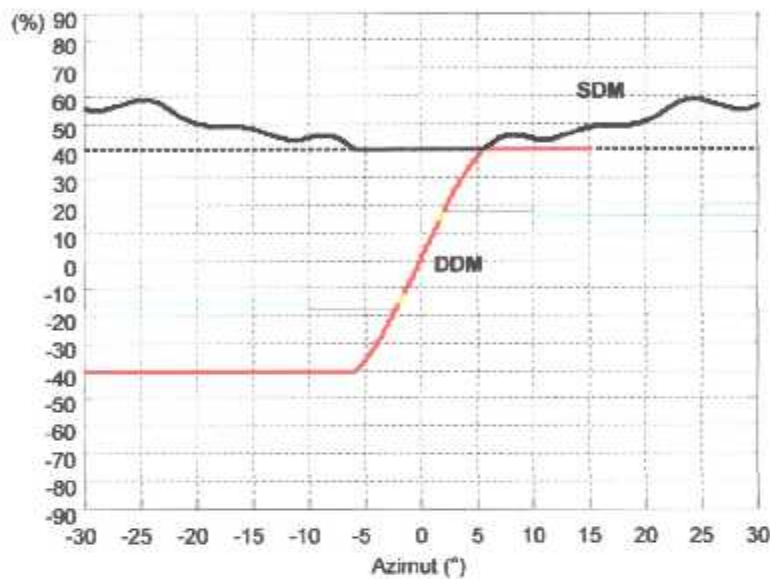


Fig. 3.13 : DDM et SDM du réseau de 14 antennes et un demi-secteur de  $1,8^\circ$

### 3.4.5 Emission bifréquence

- **Objectif**

La présence de nombreux bâtiments à proximité de la piste (hangars, tour de contrôle, aérogare...) constitue autant de plan de réflexions parasites pour le signal rayonné par le localizer (Fig. 3.14). Il paraît inconcevable de supprimer ces bâtiments. Il faut donc trouver une solution permettant de limiter l'impact de ces réflexions parasites sur la structure de l'axe afin que cette dernière respecte les gabarits imposés par l'OACI.

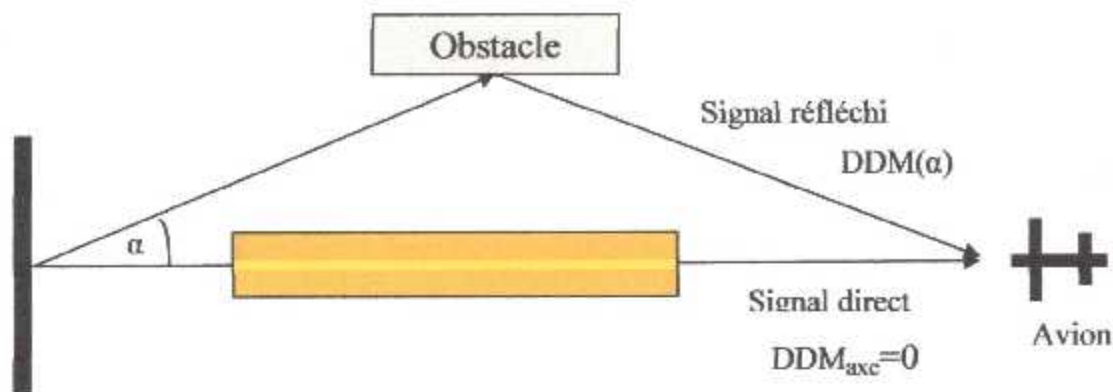


Fig. 3.14 : Schéma d'un Multitrajets

On va donc utiliser un diagramme plus directif autour de l'axe et afin d'assurer la couverture azimutale, on rayonnera un second diagramme pour couvrir cette zone.

#### • Principe utilisé

On rayonne deux types de diagrammes sur deux fréquences porteuses distinctes à l'intérieur de la voie VHF du localizer. Le récepteur de bord recevra les deux signaux, mais si la différence de puissance entre eux est supérieure à 10 dB, le récepteur se calera sur le plus puissant et rejettera l'information portée par l'autre signal. Dans le cas d'un écart de puissance plus faible, le signal décodé par le récepteur sera une combinaison des deux signaux reçus.

On va donc émettre deux types de signaux distincts :

- Un signal rayonné selon un diagramme directif autour de l'axe. Ce signal est appelé signal directif ou bien signal course Sa fréquence porteuse est  $f = f_0 - \Delta f$ . Le diagramme de rayonnement du directif sera calculé de façon à apporter la meilleure réjection possible des lobes secondaires. Les signaux directifs rayonnés sont du type "P+BL" et "BLS".
- Un signal qui permet d'assurer la couverture au-delà de  $|\alpha| = 10^\circ$ . Le diagramme est atténué autour de l'axe afin d'assurer la prédominance du directif. Ce signal est appelé **clearance**.
- Sa fréquence porteuse est  $f = f_0 + \Delta f$ . Comme dans le cas du directif, les signaux émis sont de type "P+BL" et "BLS".  $\Delta f$  est généralement compris entre 4 et 5 kHz
- Les équations de génération des signaux en bifrécence sont les mêmes qu'en monofréquence avec des fréquences porteuses différentes.

La DDM en bifréquence peut être calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$DDM = \left(1 + \frac{R^2}{2}\right) DDM_{\text{signal fort}} + \frac{R^2}{2} DDM_{\text{signal faible}} \quad \text{avec } R = \frac{P_{\text{clr}}}{P_{\text{crs}}} \quad (3.11)$$

#### • Evaluation de l'apport du bifréquence

On appelle amplitude de coude AC, la perturbation maximum en  $\mu\text{A}$  due à un signal réfléchi sur le signal direct (sur l'axe en général).

L'étude théorique permet de mettre en équation celle-ci et de poser en première approximation :

$$\text{– En monofréquence : } AC_{\text{mono}} = \frac{1}{2} \rho \frac{P_{\alpha}}{P_{\text{axe}}} DDM_{\alpha} \quad (3.12)$$

$$\text{– En bifréquence : } AC_{\text{bi}} = \frac{1}{2} \left[ \rho \frac{P_{\alpha}}{P_{\text{axe}}} \right]^2 DDM_{\alpha} \quad (3.13)$$

avec :

- $\rho$ : coefficient de réflexion de l'obstacle ( $\rho \leq 1$ ).
- $P_{\alpha}$  : puissance de la porteuse dans l'azimut de l'obstacle  $\alpha$ .
- $P_{\text{axe}}$  : puissance de la porteuse sur l'axe.
- $DDM_{\alpha}$  : valeur de la DDM dans l'azimut  $\alpha$ .

Sachant que  $\rho \leq 1$  et que  $\frac{P_{\alpha}}{P_{\text{axe}}} \leq 1$ , on voit très vite que l'amplitude de coude va être

nettement réduite en bifréquence par rapport au monofréquence.

#### • Environnement de l'ILS

Il faut savoir qu'il y a des servitudes radioélectriques autour d'un ILS :

- Zone primaire : interdiction d'ouvrages dans une zone proche du localizer et du glide (Rayon de 100 mètres centré sur le réseau du localizer).
- Zone secondaire : interdiction d'obstacles de toute nature limités à une hauteur de 2% de "d" (distance entre l'obstacle et les antennes). Pour un localizer CAT III bifréquence : rayon de 300 mètres centré sur le réseau du localizer.
- Secteur de dégagement : Obstacle limité à une hauteur de 12 mètres le long de la piste sur une largeur de 300 mètres de part et d'autre de l'axe de piste.

• **Gabarit du localizer**

Comme on l'a vu au-dessus, l'environnement aéroportuaire est la cause principale des perturbations sur la valeur de la DDM (Multitrajets). Si ces perturbations sont trop importantes et que la DDM dépasse le gabarit, on pourra mettre un ILS bifréquence, augmenter le nombre d'antennes.

L'OACI a édicté un certain nombre de tolérances en ce qui concerne la DDM en divers points jalonnant la trajectoire d'atterrissage.

La figure 3.15 récapitule ces tolérances pour la CAT.III. Il est stipulé dans l'annexe 10 de l'OACI, que dans 95% du temps, la valeur de la DDM doit rester à l'intérieur du gabarit pour un avion aligné sur l'axe de piste.

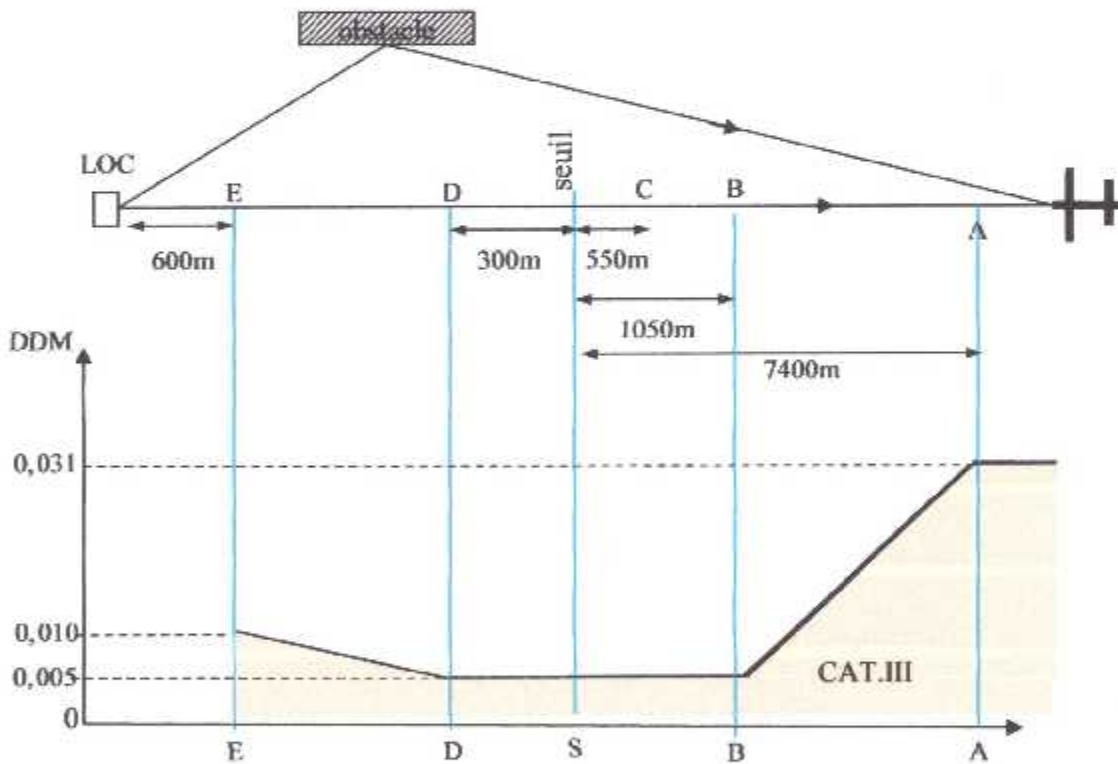


Fig. 3.15 : Gabarit du localizer en approche et atterrissage

**3.5 Configuration typique d'une station sol**

Vue de l'extérieur, une station localizer sol est composée des éléments suivants :

- Un réseau d'aériens, centré sur le prolongement de l'axe de piste, à environ 300 mètres de l'extrémité de celle-ci.

- La baie électronique générant les signaux P+BL et BLS à transmettre aux antennes et les dispositifs de contrôle de bon fonctionnement.
- D'un boîtier situé derrière le réseau d'antenne. Il comprend un coffret de distribution des signaux aux différentes antennes et un coffret de recombinaison permettant la surveillance des signaux émis.
- D'un abri décalé de l'axe de piste contenant les arrivées et la distribution d'énergie et la climatisation. (Fig. 3.16).

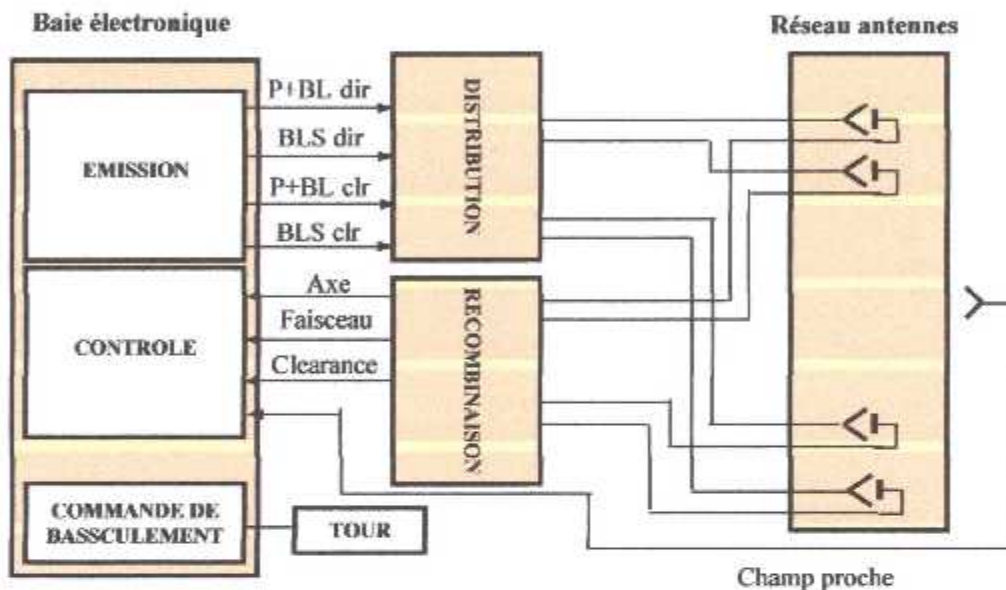


Fig. 3.16: Schéma synoptique d'une station ILS

#### • Distributeur de puissance

Les signaux sont reçus à partir de la baie par le distributeur de puissance (le répartiteur de puissance). Ce dernier est un composant de l'unité de la distribution globale, Ce circuit permet de diviser et déphaser les signaux "P+BL" et "BLS" pour qu'ensuite ils attaquent chaque antenne.

Il se compose des principaux sous-groupes suivants :

- des adaptateurs.
- 2 cartes à circuit imprimé (une carte de répartition de puissance pour les CSB et une autre pour les SBO) .
- Groupe de Coupleurs.



- **Recombinaison : réseau intégral**

Ce réseau est aussi un composant de l'unité de distribution. Ce réseau a pour fonction de combiner les signaux du réseau d'antenne à partir d'une probe d'une manière à obtenir des signaux semblables à ceux transmis par le champ lointain (Far Field).

Il se compose des principaux sous-groupes suivants :

- Carte à circuit imprimé
- Coupleurs, sommateurs
- Compensateurs de phase, Déphaseur

- **La surveillance**

Conformément à l'annexe ICAO 10, le rayonnement correct de l'ensemble des systèmes de navigation doit en permanence être surveillé par un système adéquat autonome.

La surveillance s'effectue à plusieurs niveaux au niveau de la baie :

Il existe deux endroits où la surveillance se produit :

- Surveillance interne

En plus de générer des signaux CSB et SBO, la baie, procède aussi à la vérification de ces derniers d'où le nom du type de surveillance et la comparaison avec les normes.

- Surveillance intégrale

Après le processus de recombinaison des signaux de le réseau d'antenne qui ont été ces signaux retournent de au niveau de la baie pour être examinés afin de savoir s'ils répondent aux normes de l'OACI.

- Surveillance champ proche (Near Field)

Dipôle installé sur l'axe de piste devant le réseau d'antenne, , il sert à surveiller l'axe directif ainsi que le faisceau, le signal reçu par ce dernier est transmis à la baie pour la vérification.

### 3.6 Le Glide

#### 3.6.1 Principe de la définition radioélectrique du plan oblique de descente

Ce plan est défini à l'aide d'un signal UHF modulé en amplitude simultanément par du 90Hz et du 150Hz. Cette modulation respecte les critères suivants :

- La variation des taux de modulation  $M_{90}$  et  $M_{150}$  est symétrique par rapport au plan oblique de descente à définir.
- Dans ce même plan, les taux de modulation seront égaux :  $M_{90} = M_{150} = 40\%$ .
- Par convention,  $M_{90}$  prédominera au-dessus du plan et  $M_{150}$  sera prédominant au-dessous du plan de descente.

#### 3.6.2 Récepteur de bord : DDM et SDM

La structure du récepteur Glide est la même que celle du Localizer à l'exception du filtre 1020 Hz qui a disparu (rappelant que l'indicatif n'est transmis que par le Localizer).

De plus, le dispositif de réception est en UHF et non plus en VHF.

Mais, la constante C est définie différemment de celle du Localizer : les 150 mV aux bornes de la résistance de  $1000\Omega$  seront obtenus pour une différence de taux de modulation :

$M_{150} - M_{90}$  de 0,175 (ou 17,5%).

#### 3.6.3 Secteur d'alignement de descente

Les courants de  $\pm 150 \mu\text{A}$  traversant l'indicateur d'écart provoquent une mise en butée inférieure et supérieure de l'aiguille et délimitent ainsi les bords supérieurs et inférieurs du secteur d'alignement de descente. Cependant, la variation linéaire de la DDM n'est obligatoire qu'à l'intérieur du demi secteur d'alignement de descente qui est délimité par le lieu des points où la  $\text{DDM} = \pm 0,0875$  (fig. 3.17).

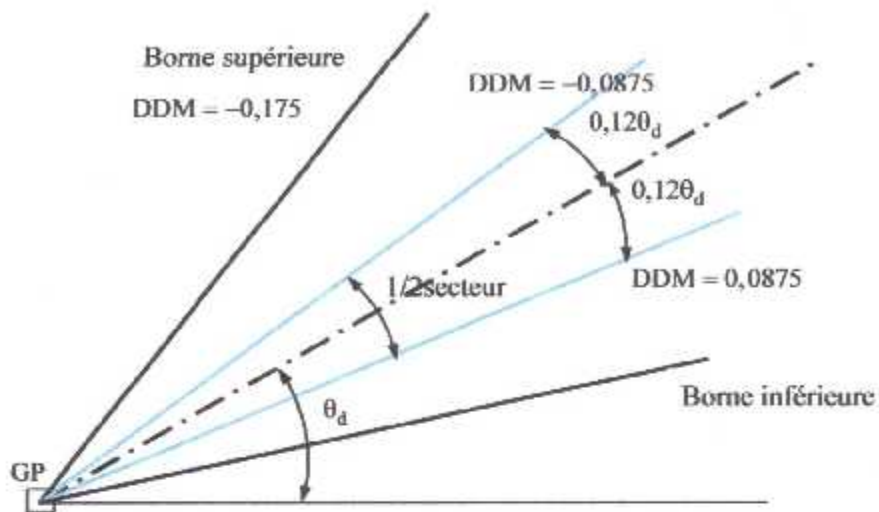


Fig. 3.17 : Secteur d'alignement de descente

### 3.6.4 Variation de la DDM et de la SDM en zone de couverture

Pour les angles de site faibles, la DDM est positive et forte. Au fur et à mesure que l'on s'approche de l'angle de descente, la DDM diminue et passe à zéro. Au-dessus de l'alignement de descente, la DDM est négative et continue à diminuer au fur et à mesure que l'angle de site augmente. La DDM doit respecter le gabarit suivant (fig. 3.18) :

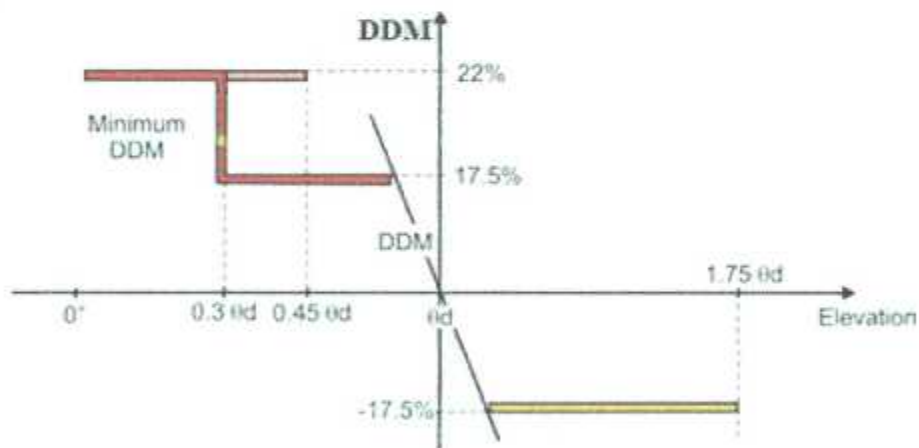


Fig. 3.18 : Gabarit de la DDM du Glide

### 3.6.5 Principes généraux : Glide image

Les trois principaux types de glide image (qui utilisent la réflexion au sol) sont :

- Null Reference
- Sideband Reference
- Réseau Type M

Ces trois systèmes diffèrent par le nombre d'antennes et la distribution plus au moins complexe des signaux sur le réseau. Ils sont appelés "glide image" car ils utilisent la réflexion du signal radioélectrique sur le sol. Ce qui donne pour le récepteur un signal composite (direct + réfléchi) (Fig. 3.19).

L'axe de descente sera défini dans le cas du Null Reference par le premier nul de champ du sol et dans le cas des types B, G et M par la somme dans l'espace de plusieurs diagrammes de champ.

On émet deux types de signaux :

- Une porteuse modulée en amplitude : signal "P+BL" ou "CSB"
- Un signal bandes latérales seules : "BLS" ou "SBO"

La combinaison des champs directs avec ceux réfléchis au sol permet de générer les diagrammes de rayonnement. Pour étudier le phénomène de réflexion au sol, on utilisera l'hypothèse d'une antenne image. On peut représenter l'effet de la réflexion au sol en considérant que le champ réfléchi est émis par une antenne fictive, image de l'antenne réelle par rapport au sol. On peut représenter l'ensemble antenne réelle - antenne image suivant le schéma ci-dessous :

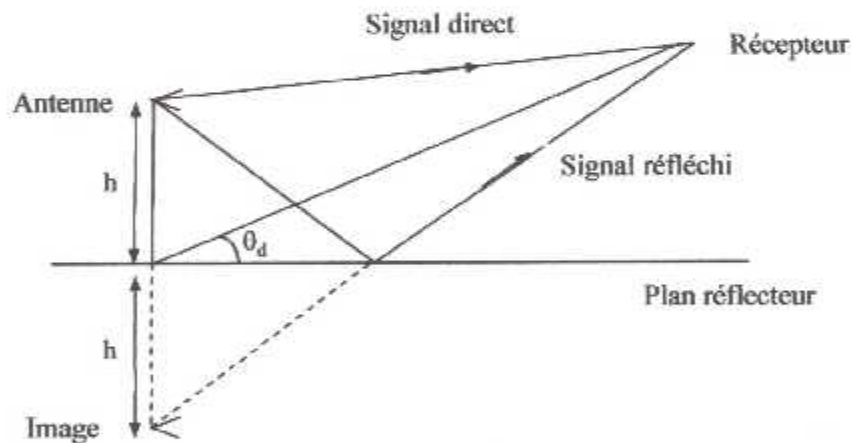


Fig. 3.19 :Principe de l'antenne image

Les lois du rayonnement montrent que le rayonnement de l'antenne image est en opposition de phase de celui de l'antenne réelle si le champ rayonné est en polarisation horizontale.

En champ lointain (on se place dans l'hypothèse où l'on est suffisamment éloigné des antennes pour considérer que les rayons issus de l'antenne réelle et de l'antenne image sont parallèles), on peut écrire le facteur de directivité du groupement des 2 antennes en fonction de l'angle de site :

$$F_d = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} h \sin \theta\right) \quad (3.14)$$

### 3.6.6 Glide "Null Reference"

Ce glide simple utilise deux antennes équi-espacées. Il nécessite une importante surface de réflexion et l'absence d'obstacles devant lui à cause de sa grande sensibilité à ces derniers. On appellera  $A_1$  l'antenne basse et  $A_2$  l'antenne haute.

Le champ "P+BL" est rayonné par l'antenne basse et le champ "BLS" par l'antenne haute.

Les hauteurs d'antennes sont calculées de façon à avoir un maximum de rayonnement de  $A_1$  sur  $\theta_d$  et un nul de champ de  $A_2$  sur  $\theta_d$ . Les hauteurs  $h_1$  de  $A_1$  et  $h_2$  de  $A_2$  sont obtenues comme suit :

- **Hauteur  $h_1$**

On cherche  $h_1$  tel que  $F_{dA1}$  soit maximum pour  $\theta_d$  :  $\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} h_1 \sin \theta_d\right) = 1$

$$\text{d'où } h_1 = \frac{\lambda}{4 \sin \theta_d} \quad (3.15)$$

Les nuls de champ se trouvent aux angles  $2\theta_d, 4\theta_d, 6\theta_d, \dots$

Les maximums de champ se trouvent en  $\theta_d, 3\theta_d, 5\theta_d, \dots$

Le diagramme de  $A_1$  au-dessus du sol est représenté en figure 3.20.

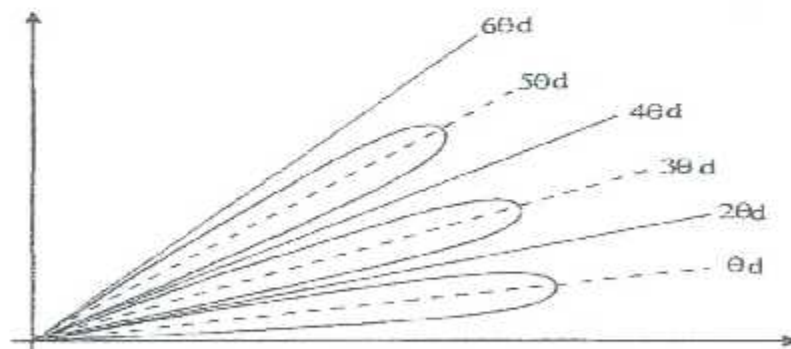


Fig. 3.20 : Diagramme rayonnement en site de  $A_1$

- **Hauteur  $h_2$**

On cherche  $h_2$  tel que  $F_{dA2}$  soit nul pour  $\theta_d$  :  $\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} h_2 \sin \theta_d\right) = 0$

$$\text{d'où } h_2 = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_d} \quad (3.16)$$

Les nuls de champ se trouvent aux angles  $\theta_d, 2\theta_d, 3\theta_d, \dots$

Les maximums de champ se trouvent en  $\frac{\theta_d}{2}, \frac{3}{2}\theta_d, \frac{5}{2}\theta_d, \dots$

Le diagramme de  $A_2$  au-dessus du sol est représenté en figure 3.21.

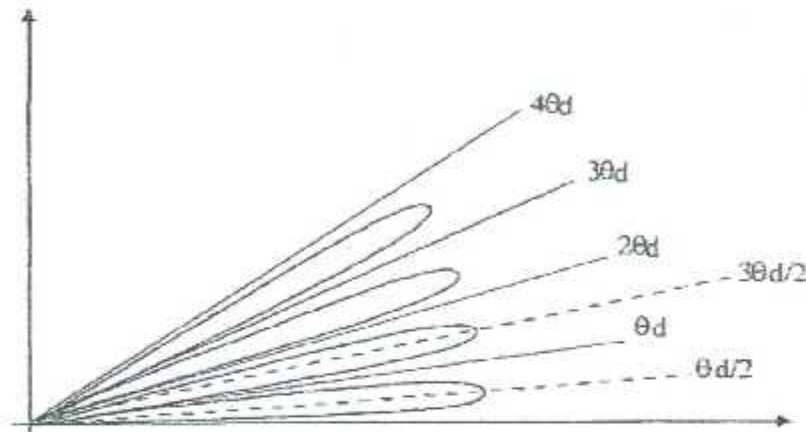


Fig. 3.21 : Diagramme rayonnement en site de A2

Les antennes sont alimentées selon le tableau 3.6 suivant :

|    | P+BL      |       | BLS       |       |
|----|-----------|-------|-----------|-------|
|    | Amplitude | Phase | Amplitude | Phase |
| A2 |           |       | k         | 0°    |
| A1 | 1         | 0°    |           |       |

Tableau 3.6 : Alimentation d'un glide Null Reference

Le signal "P+BL" est une porteuse modulée en amplitude à 90 et 150 Hz avec un taux de modulation de 40% pour chacune des modulations.

$$s(t) = \cos(\omega t)[1 + 0,4\sin 3\Omega t + 0,4\sin 5\Omega t]$$

Son diagramme de rayonnement est pair autour de  $\theta_d$  et sera noté  $P(\theta)$ .

Le signal "BLS" est composé de deux bandes latérales à 90 et 150 Hz en opposition de phase UHF.

$$d(t) = k \cdot \cos(\omega t)[\sin 5\Omega t - \sin 3\Omega t]$$

Son diagramme de rayonnement est impair autour de  $\theta_d$  et sera noté  $F'(\theta)$ .

Dans le secteur d'alignement, la DDM s'écrit à partir de la formule générale :

$$\text{DDM} = 2k \frac{F'(\theta)}{P(\theta)}$$

Ce qui donne :

$$\text{DDM} = 2k \frac{\sin\left(\pi \frac{\Delta\theta}{\theta_d}\right)}{\sin\left(\pi \frac{\Delta\theta}{2\theta_d}\right)} \quad (3.17)$$

### 3.6.3 Glide "Type M"

Il s'agit d'implanter un réseau glide en présence d'un environnement perturbé par un relief défavorable (irrégularités du sol, obstacles naturels, constructions autour de la piste) tout en respectant les spécifications OACI d'une installation ILS de catégorie III.

- **Principe utilisé : effet de capture du récepteur**

C'est le même principe que pour le localiser. On rayonne deux types de diagrammes sur 2 fréquences porteuses distinctes à l'intérieur de la voie UHF du glide :

- Les diagrammes directifs fournissent une information précise d'écart angulaire par rapport à l'axe de descente dans toute la zone du secteur d'alignement. Le rayonnement est réduit aux sites faibles.
- Le diagramme de couverture (ou "Clearance") est chargé d'assurer la couverture basse dans la zone située au-dessous du radioalignement de descente. Le rayonnement est réduit dans la zone du secteur d'alignement de descente pour ne pas perturber l'information prépondérante due au directif et favoriser l'effet de capture.

La concrétisation d'un tel principe nous conduit à une émission bifréquence et à utiliser un réseau trois antennes.

Les fréquences du signal directif et du signal de couverture (Clearance) sont décalées symétriquement par rapport à la fréquence UHF assignée. L'espacement entre les deux porteuses doit être compris entre 4 kHz et 32 kHz. Les valeurs typiques rencontrées vont de 10 à 16 kHz.

- **Signaux directifs**

- Signal "P+BL"

La porteuse est modulé en amplitude par du 90 et 150 Hz avec des taux de modulation de 40%.

$$s(t) = \cos[(\omega + \Delta\omega)t] [1 + 0,4\sin 3\Omega t + 0,4\sin 5\Omega t]$$

Le diagramme de rayonnement sera pair mais asymétrique autour de  $\theta_a$ . L'amplitude de ce champ doit être faible aux sites faibles. On le nomme  $P_D(\theta)$  et son allure est donnée en figure 3.22.

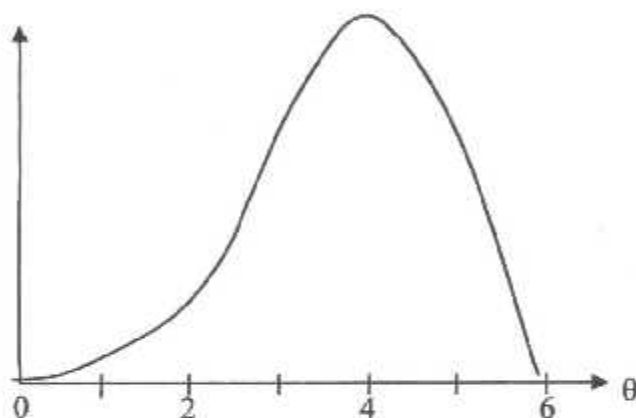


Fig. 3.22 : Diagramme de rayonnement en site du P+BL

- Signal "BLS"

Ce signal est composé de 2 bandes latérales à 150 et 90 Hz en opposition de phase UHF.

$$d(t) = k\cos[(\omega + \Delta\omega)t] [\sin 5\Omega t - \sin 3\Omega t]$$

Le diagramme résultant de BLS sera impair autour de  $\theta_a$  (nul de champ sur l'axe  $\theta = \theta_a$ )

et asymétrique autour de  $\theta_a$  (amplitude de champ réduit aux sites faibles). On le nomme  $F'D(\theta)$ . Son allure est donnée en figure 3.23.



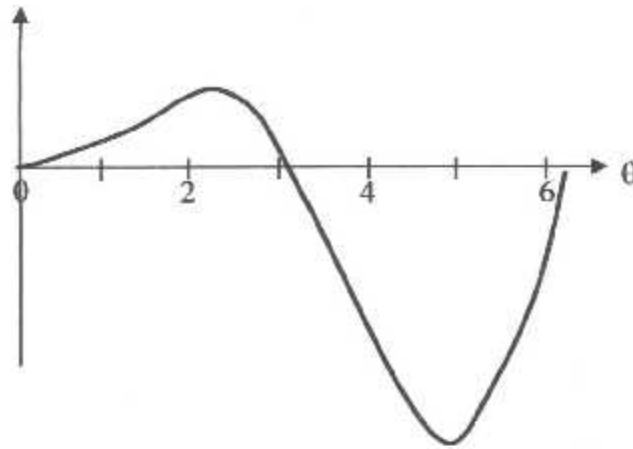


Fig. 3.23 : Diagramme de rayonnement en site du BLS

- **Signal de couverture basse ou clearance**

On assure une information de couverture basse grâce au rayonnement auxiliaire d'un signal clearance sur une fréquence porteuse  $f - \Delta f$ . La porteuse est modulée en amplitude par du 90 et 150 Hz avec des taux de modulation respectifs de 25 et 55% (pour le glide Thomson).

$$c(t) = K \cos[(\omega - \Delta\omega)t] [1 + 0,25 \sin 3\Omega t + 0,55 \sin 5\Omega t]$$

Ce signal est porteur d'une information de couverture basse, en dehors du secteur d'alignement de descente.

On a :

$$\begin{cases} M_{90} = 0,25 \\ M_{150} = 0,55 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{DDM} = |M_{150}| - |M_{90}| = 0,3 \\ \text{SDM} = |M_{150}| + |M_{90}| = 0,8 \end{cases}$$

La DDM est donc constante et elle correspond à un courant de déviation de  $260 \mu\text{A}$ .

Le diagramme résultant doit être tel que l'amplitude du champ soit important aux sites faibles pour favoriser l'efficacité de l'effet de capture du récepteur au profit de l'information de couverture basse. L'amplitude du champ doit être faible à proximité de l'axe et dans toute la zone du secteur d'alignement de descente afin de favoriser l'effet de capture du directif.

On nomme le diagramme  $P_{CI}(\theta)$  et son allure est donnée en figure 3.24.

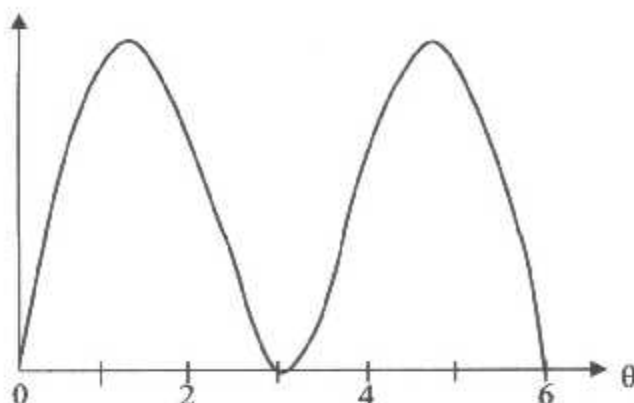


Fig. 3.24 : Diagramme de rayonnement en site du Clearance

• Réseau d'aériens

Trois antennes  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$  sont alignées verticalement sur le même mât. Les hauteurs des antennes sont données par les relations suivantes :

$$h_{A1} = \frac{\lambda}{4 \sin \theta_d} \tag{3.18}$$

$$h_{A2} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_d} = 2h_{A1} \tag{3.19}$$

$$h_{A3} = \frac{3\lambda}{4 \sin \theta_d} = 3h_{A1} \tag{3.20}$$

Afin d'obtenir les diagrammes de rayonnement définis précédemment, il faut alimenter les antennes selon le tableau 3.7 suivant :

|    | P+BL      |       | BLS       |       | CLR       |       |
|----|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|    | Amplitude | Phase | Amplitude | Phase | Amplitude | Phase |
| A3 |           |       | k/2       | 180°  | k         | 0°    |
| A2 | 1/2       | 180°  | K         | 0°    |           |       |
| A1 | 1         | 0°    | k/2       | 180°  | k         | 0°    |

Tableau 3.7 : Alimentation d'un glide Type M

Pour le signal BLS, A1 et A3 sont alimentés en opposition de phase par rapport à A2, ce qui permet de rayonner peu de champ aux sites faibles. Il faut donc rayonner un autre signal aux sites faibles : le signal Clearance avec une DDM > 0.

Aux sites élevés, la DDM clearance est dans le mauvais sens, mais dans ce cas, le champ P+BL est dominant et donc l'effet du Clearance est négligeable.

Dans le secteur d'alignement où le directif est prédominant, on trouve :

$$DDM = 4k \cos\left(\frac{\pi \theta}{2 \theta_d}\right) \tag{3.21}$$

Pour répartir les différents signaux sur les 3 antennes, on doit utiliser un circuit de distribution. Le principe d'un circuit de distribution type M est donné sur le schéma de la figure 3.25.

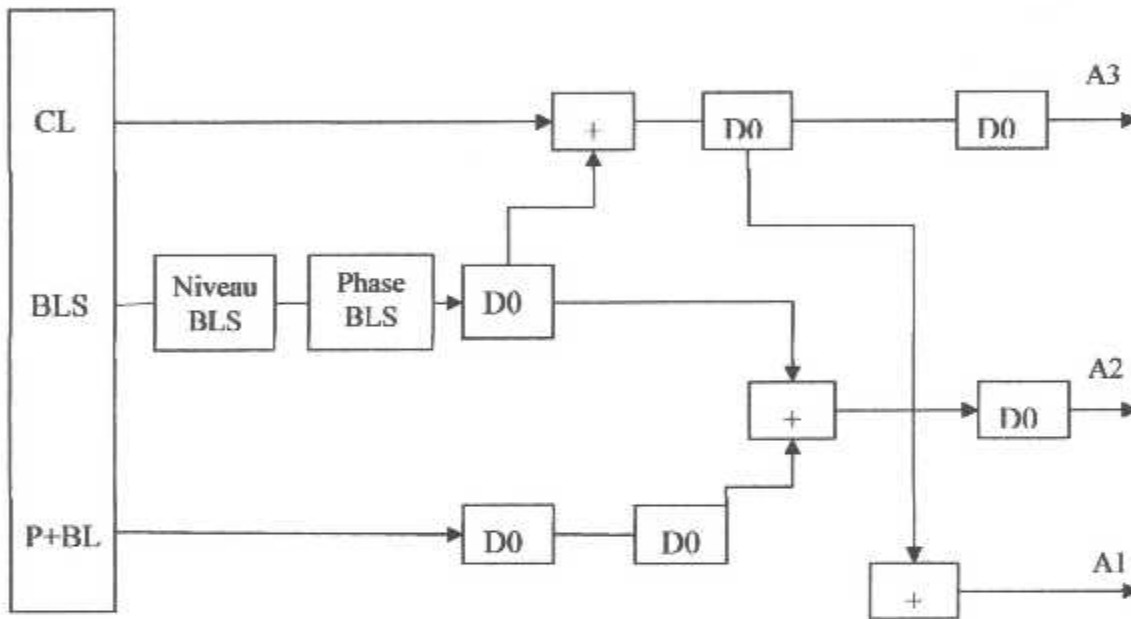


Fig. 3.25 : Circuit de distribution d'un Type M

- D02 permet de régler l'égalité des signaux BLS et CLR entre A1 et A3.
- D05 assure la mise en phase entre A1 et A3.
- D03 permet de régler le niveau relatif du BLS dans A2 par rapport à A1 et A3.
- D06 permet de régler l'opposition de phase du BLS dans A2 par rapport à A1 et A3.
- D01 permet de régler le niveau relatif du P+BL dans A1 par rapport à A2.
- D04 permet de régler l'opposition de phase du P+BL dans A1 par rapport à A2.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décortiqué deux des trois composants du système ILS, en présentant les différentes expressions des signaux ainsi que les expressions générales de la DDM et de la SDM mais aussi certaines normes exigées par l'OACI.

### **3.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décortiqué deux des trois composants du système ILS, en présentant les différentes expressions des signaux ainsi que les expressions générales de la DDM et de la SDM mais aussi certaines normes exigées par l'OACI.

---

## Chap 4 : INTERFACE DE SIMULATION DES SIGNAUX ILS (SIMLOG)

---

### 4.1 Introduction

C'est une interface graphique didactique réalisée à l'aide de l'outil Guide de Matlab dédiée à la simulation des systèmes d'atterrissage Localizer et Glide de l'ILS. Elle s'inspire de l'interface ATOLL de l'ENAC.

Elle permet d'observer :

- les diagrammes de rayonnement et les paramètres DDM et SDM de cinq types de réseau monofréquence ou bifréquence différents à 5, 12, 14 et 16 antennes du système LOC et de calculer le champ rayonné en un point donné de l'espace,
- l'influence des obstacles à proximité de la piste d'atterrissage sur les signaux captés par l'avion,
- les diagrammes de rayonnement et les paramètres DDM et SDM d'un Glide à deux ou trois antennes.

### 4.2 Description de l'interface

L'interface se compose de plusieurs fenêtres :

- une fenêtre "SIMLOG" pour introduire un mot de passe pour le démarrage du simulateur,
- cinq fenêtres LOC\_1, LOC\_2, LOC\_3, LOC\_4 et LOC\_5 pour la simulation du LOC
- deux fenêtres GLIDE\_1 et GLIDE-2 pour la simulation du GLIDE
- une fenêtre LOC\_6 pour simuler l'influence des obstacles.

### 4.3 La fenêtre SIMLOG



Fig. 4.1 : Fenêtre SIMLOG

Cette fenêtre (fig. 4.1) contient une zone réservée à l'introduction d'un mot de passe pour accéder à l'interface. Le mot de passe est validé par la touche "ENTER".

### 4.4 Le "Localizer"

Le simulateur "Localizer" ou LOC se compose de 5 fenêtres dont voici la description.

#### 4.4.1 Fenêtre principale LOC\_1

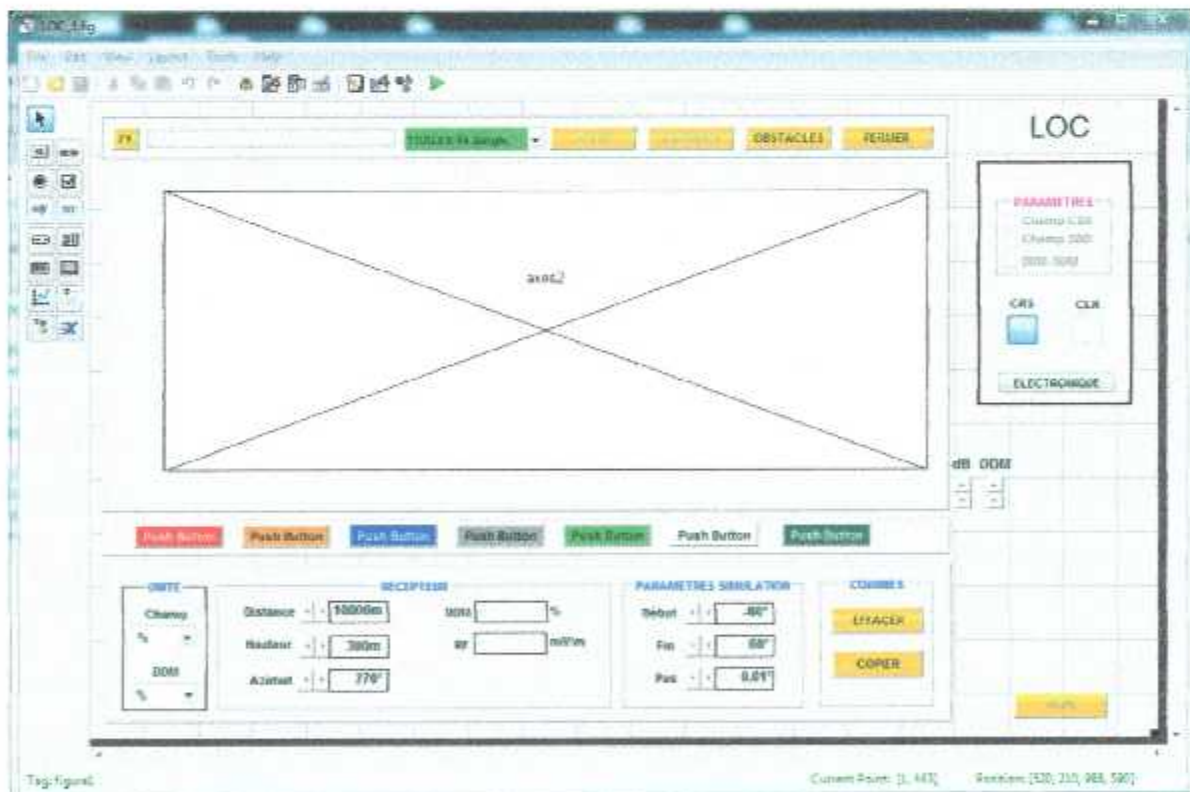


Fig. 4.2 : Fenêtre LOC\_1

Cette fenêtre LOC\_1 (fig. 4.2) reste toujours ouverte. Elle comprend plusieurs parties :

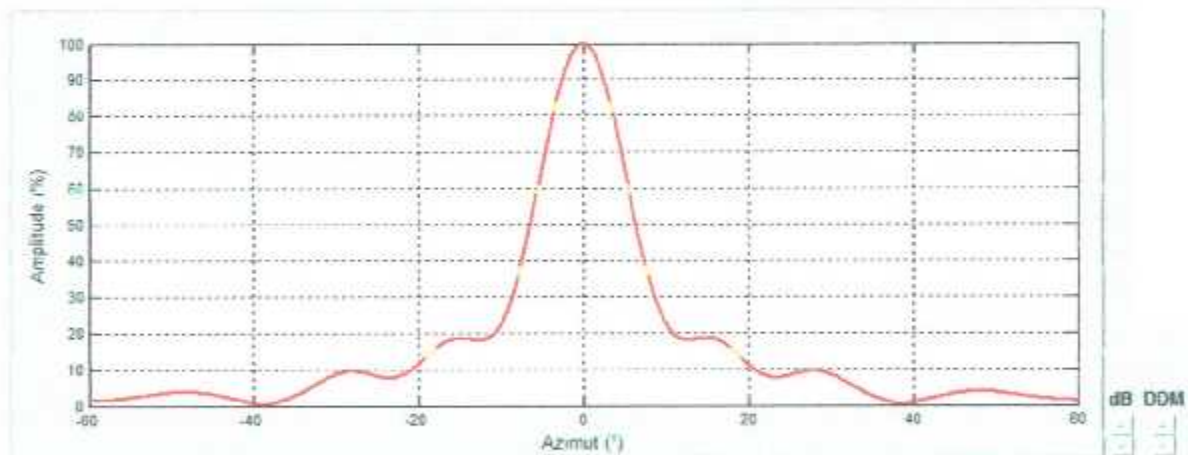
### • Partie 1



Ce bandeau comporte les boutons poussoirs suivants :

- "LOC" du menu : affiche la fenêtre principale LOC\_1 de l'interface LOC
- "GLIDE" du menu : affiche la fenêtre principale GLIDE\_1 de l'interface GLIDE
- "F1" : accès à un fichier aide de type pdf
- Bouton de type popupmenu : pour sélectionner un réseau d'antennes LOC parmi cinq disponibles.
- "PISTE" : ouvre la fenêtre LOC\_2 pour la configuration de la piste
- "ANTENNES" : ouvre la fenêtre LOC\_3 pour la configuration du réseau d'antennes
- "OBSTACLES" : ouvre la fenêtre de simulation de l'influence des obstacles
- "FERMER" : ferme toutes les fenêtres.

### • Partie 2



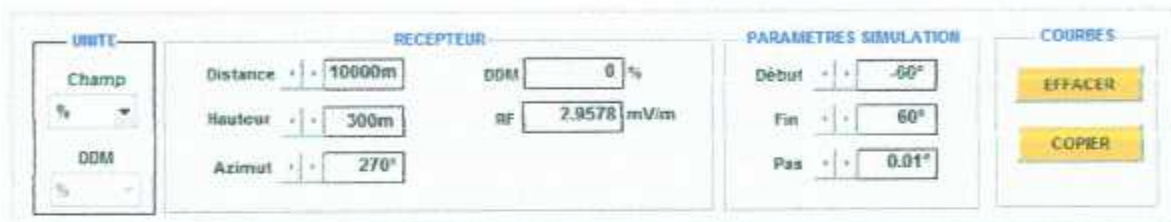
C'est l'espace réservé à l'affichage des courbes obtenues par la simulation. Le "slider" dB sert à modifier l'échelle des ordonnées lorsqu'on visualise les diagrammes de rayonnement en dB, alors que le "slider" DDM permet d'effectuer la même opération mais pour la DDM.

- **Partie 3**



Elle est constituée de boutons-poussoirs pour distinguer les différentes courbes affichées à l'aide de couleurs et par le nom et de mettre en gras la courbe sélectionnée. On peut superposer jusqu'à sept courbes différentes.

- **Partie 4**



Elle comprend :

- Panneau "Unité"

Utilisé pour la sélection de l'unité d'affichage des résultats soit en pourcentage ou en dB pour les diagrammes de rayonnement et en % ou en  $\mu\text{A}$  pour la DDM.

- Panneau "Récepteur"

Permet d'introduire les coordonnées du récepteur (distance, hauteur et azimut) pour le calcul du champ. Le champ sera affiché en mV/m et la DDM en %.

- Panneau "Paramètres de simulation"

Pour fixer à n'importe quel moment les limites supérieure et inférieure de l'angle d'azimut affiché à l'aide de "slider".

Le pas concerne la pas de calcul de la simulation.

- Panneau "Courbes"

Le bouton EFFACER efface toutes les courbes affichées. Le bouton COPIER fait une copie des courbes affichées.

- Bouton RUN

Lance la simulation.



- **Partie 5**



C'est un bloc qui permet la sélection des types de courbes qu'on veut tracer : diagrammes pair ou impair et DDM. On a deux commutateurs de type on/off pour le choix des réseaux monofréquence et bifréquence.

Le bouton ELECTRONIQUE permet d'afficher les schémas-blocs des émetteurs.

#### 4.5 Fenêtre LOC\_2 de configuration piste

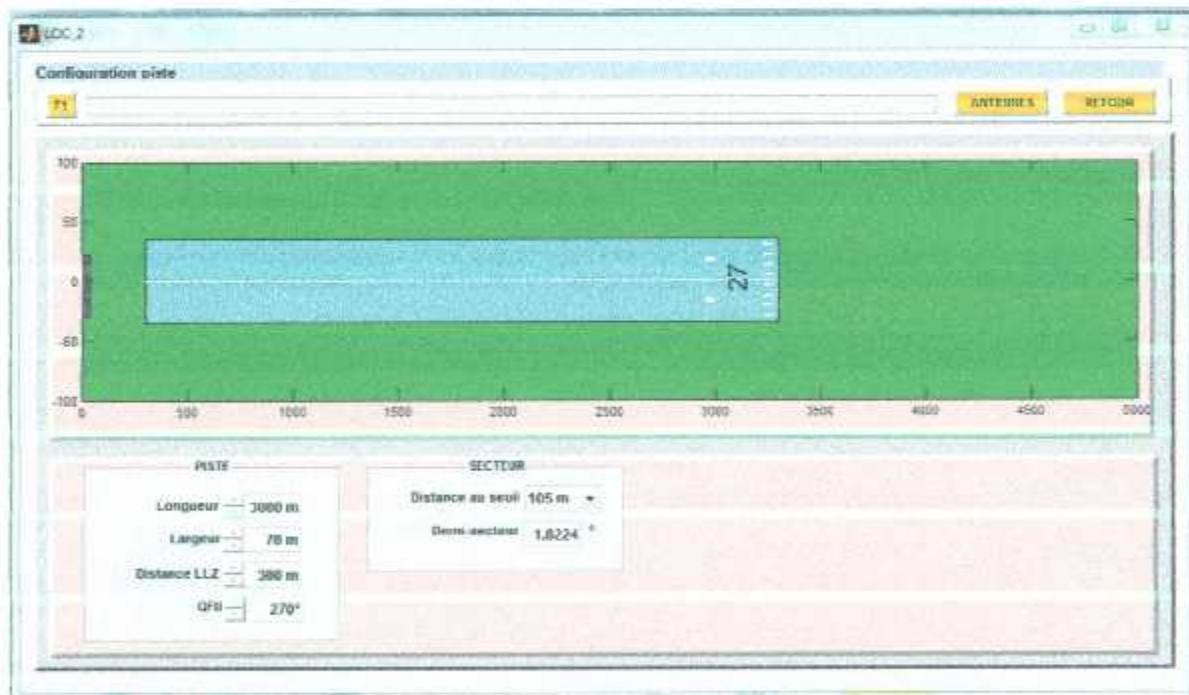


Fig 4.3 : Fenêtre LOC\_2

Cette fenêtre (fig. 4.3) est utilisée pour la configuration de la piste.

Elle comprend :

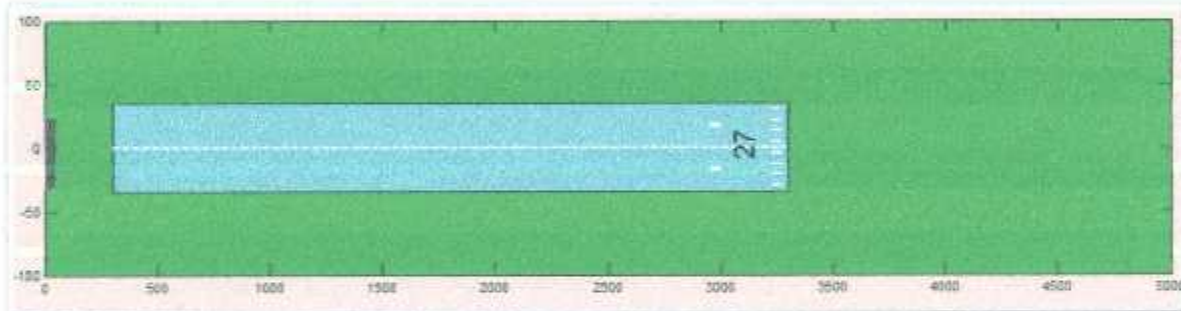
- **Le panneau "Piste et Secteur"**

| PISTE        |        | SECTEUR           |          |
|--------------|--------|-------------------|----------|
| Longueur     | 3040 m | Distance au seuil | 105 m    |
| Largeur      | 50 m   | Demi-secteur      | 1.8006 ° |
| Distance LLZ | 300 m  |                   |          |

La partie de gauche permet de fixer la longueur et la largeur de la piste ainsi que la distance entre le réseau d'antennes et la piste.

La partie de droite permet de sélectionner la distance au seuil et de calculer et d'afficher l'angle de demi-secteur.

- **Le panneau d'affichage de la piste**



Affiche la piste proportionnellement aux paramètres introduits.

- **Bandeau supérieur**



Ce bandeau comporte les boutons poussoirs suivants :

- Bouton "F1" : accès à un fichier aide de type pdf
- Bouton "ANTENNES" : ouvre la fenêtre de configuration des paramètres des antennes.
- Bouton "RETOUR" : retour à la fenêtre principale.

#### 4.5.1 Fenêtre LOC\_3 de configuration paramètres des antennes

Deux panneaux superposés peuvent être sélectionnés : un panneau pour les paramètres électriques et un panneau pour les paramètres mécaniques.

## 1. Panneau des paramètres électriques

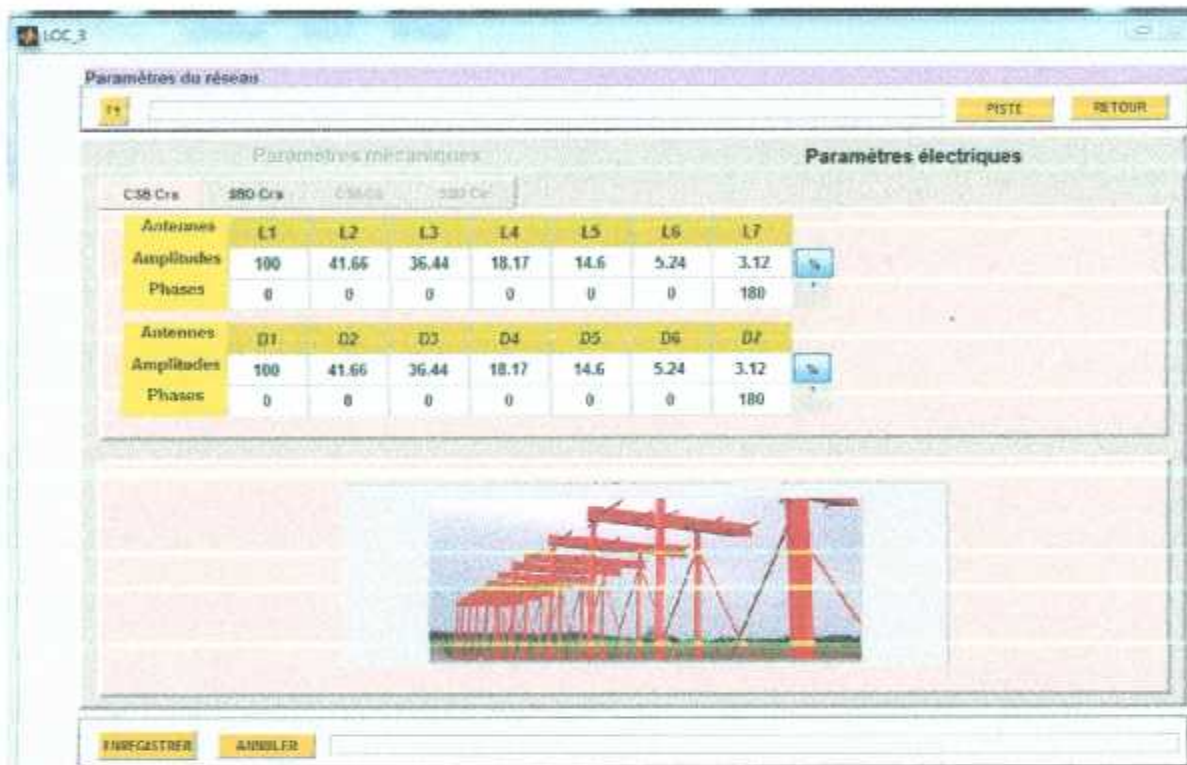


Fig 4.4 : Fenêtre LOC 3 : Paramètres électriques

Cette fenêtre (fig. 4.4) permet l'accès aux paramètres électriques (coefficients d'excitation : amplitudes et phases) des antennes du réseau et leur modification et leur enregistrement.

Elle comprend plusieurs parties :

- **Bandeau supérieur**



Ce bandeau comporte les boutons poussoirs suivants :

- Bouton "F1" : accès à un fichier aide de type pdf
- Bouton "PISTE" : ouvre la fenêtre de configuration des paramètres de piste.
- Bouton "RETOUR" : retour à la fenêtre principale.

- **Bandeau paramètres**



Il permet le basculement des paramètres électriques vers les paramètres mécaniques et vice-versa.

- **Panneau "Types de diagrammes"**



Il est constitué de boutons d'affichage des paramètres électriques P+BL ou BLS du réseau directif ou clearance sélectionné.

- **Panneau "Coefficients"**

| Antennes   | L1  | L2    | L3    | L4    | L5   | L6   | L7   |   |
|------------|-----|-------|-------|-------|------|------|------|---|
| Amplitudes | 100 | 41.66 | 36.44 | 18.17 | 14.6 | 5.24 | 3.12 | % |
| Phases     | 0   | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 180  | + |

| Antennes   | D1  | D2    | D3    | D4    | D5   | D6   | D7   |   |
|------------|-----|-------|-------|-------|------|------|------|---|
| Amplitudes | 100 | 41.66 | 36.44 | 18.17 | 14.6 | 5.24 | 3.12 | % |
| Phases     | 0   | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 180  | + |

Il affiche les coefficients (amplitude et phase) des antennes gauche et droite par rapport au centre du réseau. Pour l'amplitude, les coefficients peuvent être affichés en % ou en dB à l'aide d'un bouton-poussoir.

- **Panneau "Réseau"**

Il affiche une photo du réseau LOC sélectionné.



- **Bandeau inférieur**



Le bouton ENREGISTRER permet d'enregistrer toute modification opérée sur les coefficients d'excitation.

Le bouton ANNULER annule la dernière modification effectuée sur les paramètres.

## 2. Panneau des paramètres mécaniques

Cette fenêtre permet (fig. 4.5) l'accès aux paramètres mécaniques (distances entre antennes), leur modification et leur enregistrement.

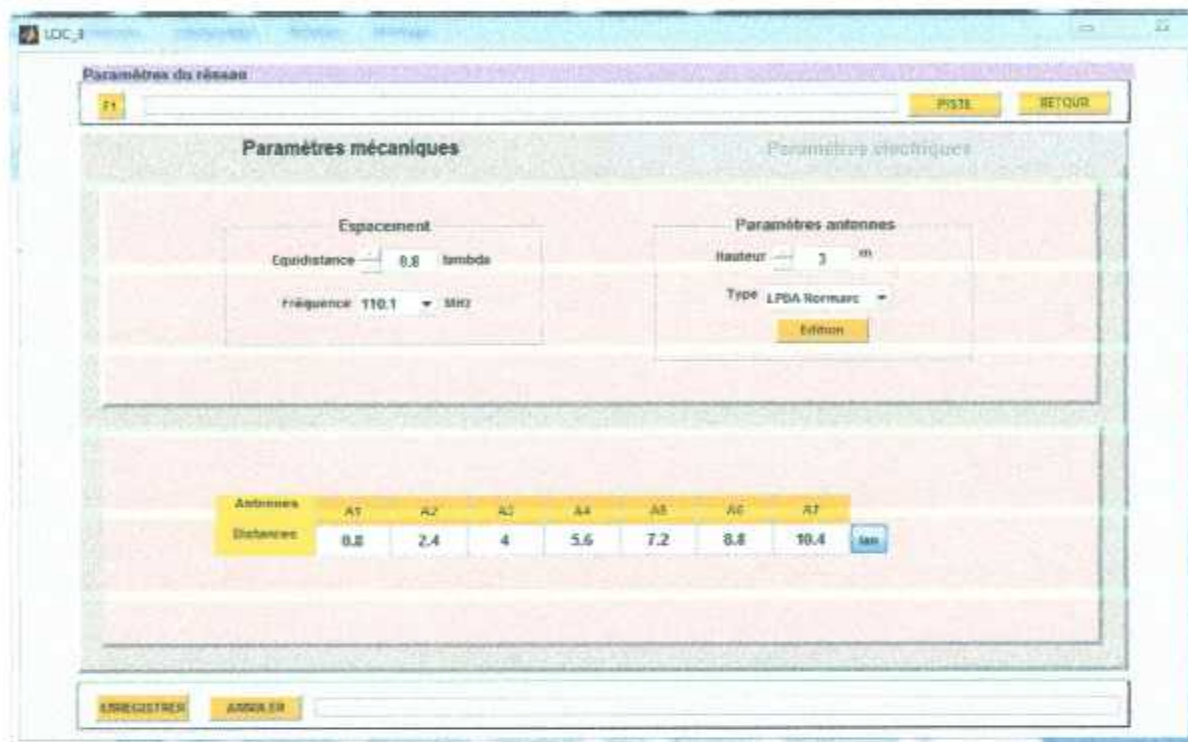


Fig 4.5 : Fenêtre LOC 3 : Paramètres mécaniques

Les parties différentes du panneau précédent sont les suivants :

- **Panneau "Espacement et Paramètres antennes"**



La partie de gauche permet le choix de la fréquence du LOC et la distance entre deux antennes adjacentes.

La partie de droite permet de fixer la hauteur des antennes par rapport au sol et le type d'antenne qu'on veut utiliser.

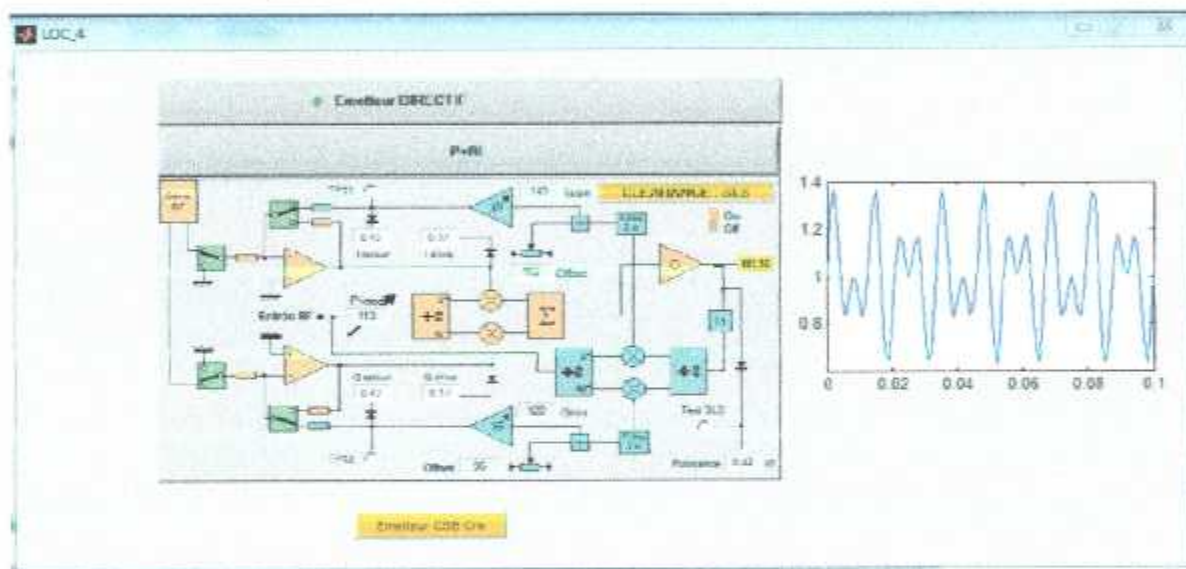
Le bouton EDITION permet d'afficher dans une fenêtre le diagramme de rayonnement de l'antenne choisie.

- **Panneau "Distances"**

Il affiche la distance entre antenne gauche et droite de même rang. L'affichage peut être effectué en mètres ou par rapport à la longueur d'onde à l'aide d'un bouton-poussoir.

| Antennes  | A1  | A2  | A3 | A4  | A5  | A6  | A7   |
|-----------|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|
| Distances | 0.8 | 2.4 | 4  | 5.6 | 7.2 | 8.8 | 10.4 |

#### 4.5.2 Fenêtre LOC\_4 des schémas-blocs des émetteurs



**Fig 4.6 : Fenêtre LOC\_4**

On a accès à cette fenêtre (fig. 4.6) à partir du bouton ELECTRONIQUE de la fenêtre principale. En cliquant sur le bouton-poussoir, on peut voir à chaque fois des images des émetteurs P+BL, et BLS directif et Clearance avec les enveloppes des signaux.

### 4.5.3 Fenêtre LOC\_5 des diagrammes de rayonnement

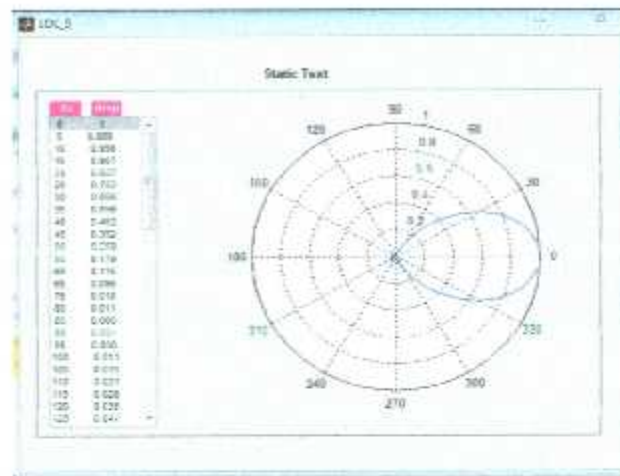


Fig 4.7 : Fenêtre LOC\_5

On a accès à cette fenêtre à partir du bouton EDITION du panneau paramètres mécaniques de la fenêtre LOC\_3. On peut ainsi visualiser trois types de diagrammes d'antennes qui peuvent être sélectionnés pour réaliser le réseau LOC.

## 4.6 Le "Glide"

L'interface du Glide se compose de 2 fenêtres dont une principale.

### 4.6.1 Fenêtre principale GLIDE\_1

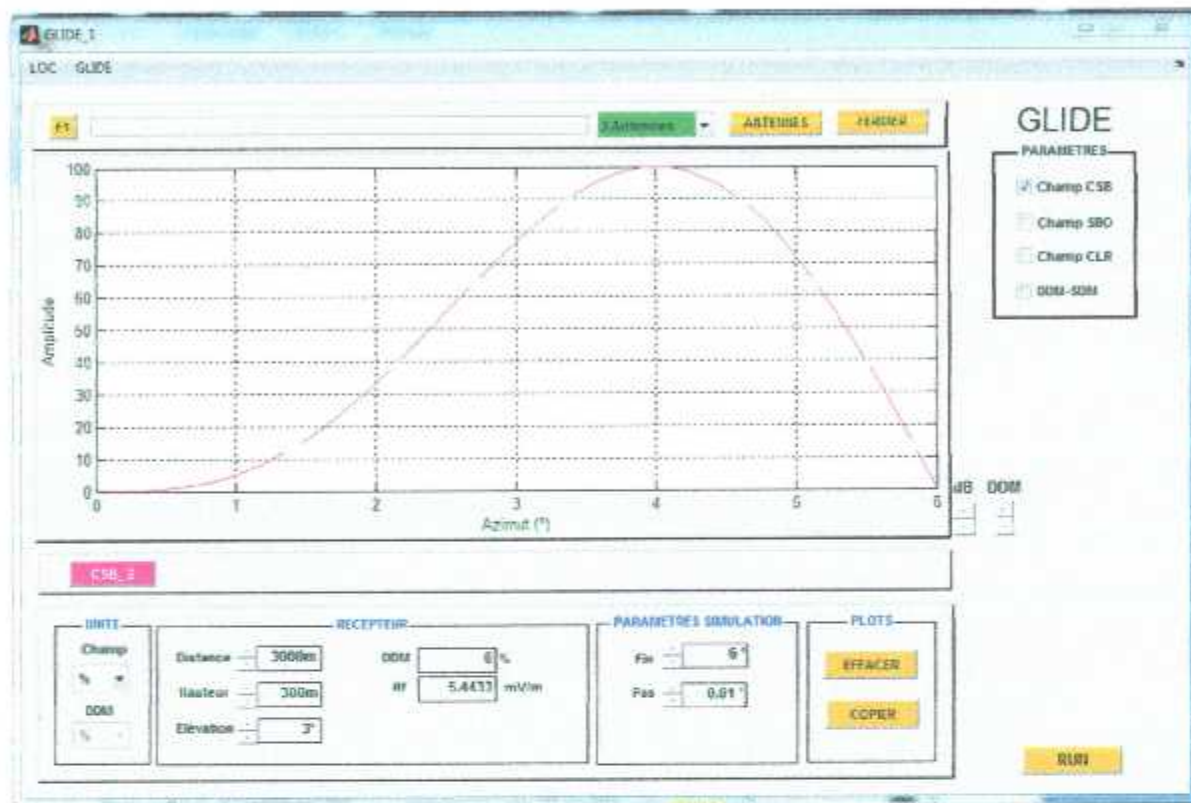


Fig 4.8 : Fenêtre GLIDE\_1

Cette fenêtre GLIDE\_1 (fig. 4.8) est exactement identique à la fenêtre LOC\_1 à l'exception du panneau "paramètres" de la partie supérieure gauche pour la sélection des courbes à tracer.



## 4.6.2 Fenêtre GLIDE\_2

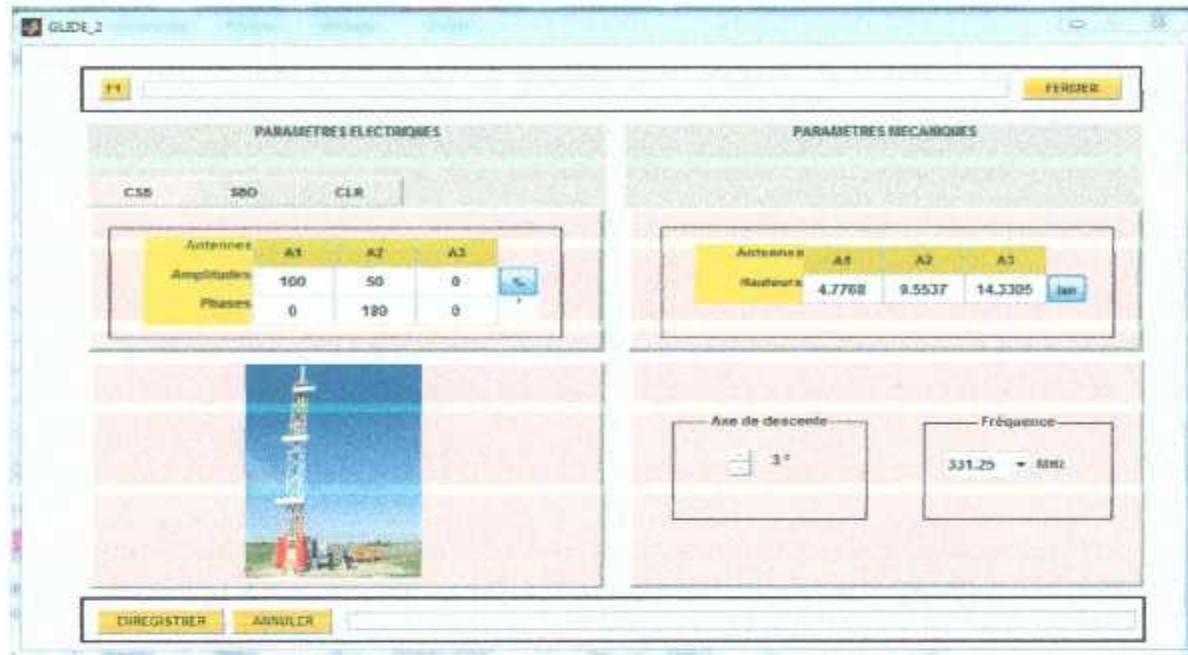


Fig 4.9 : Fenêtre GLIDE\_2

Cette fenêtre (fig. 4.9) donne accès simultanément aux paramètres électriques et mécaniques du réseau sélectionné.

- **Panneau Paramètres électriques**

On trouve :

- Les boutons de sélection des coefficients des diagrammes pair, impair et clearance
- Les tableaux des coefficients d'excitation correspondants qu'on peut afficher en % ou en dB
- Une photo du réseau d'antennes.

- **Panneau Paramètres mécaniques**

On trouve :

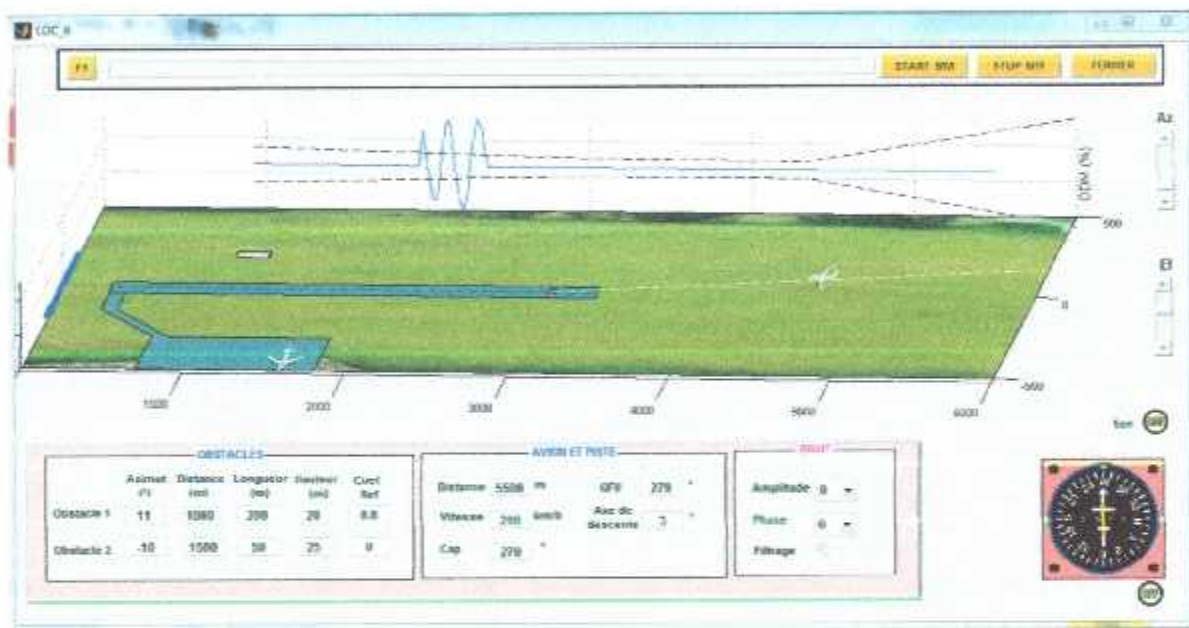
- Le tableau des distances entre les antennes qu'on peut afficher en mètres ou en valeurs relatives par rapport à la longueur d'onde
- L'angle de descente
- La fréquence. Toute modification de la fréquence entraîne une modification de coefficients.

- **Bandeau inférieur**

- Bouton ENREGISTRER : enregistre les modifications apportées aux tableaux des coefficients
- Bouton ANNULER : annule les dernières modifications.

#### 4.7 Fenêtre LOC\_6 de simulation de l'influence des obstacles sur le signal LOC

On a accès à cette fenêtre (fig. 4.10) à partir du menu de la fenêtre principale LOC\_1. Elle permet d'observer l'influence des obstacles ainsi que le bruit sur le signal DDM du LOC mesuré par un avion en phase d'atterrissage.



**Fig 4.10 : Fenêtre LOC 6**

Elle comprend :

- **Panneau "Obstacles"**

Dans ce panneau on peut introduire les positions d'un ou deux obstacles (azimut /piste et distance), la longueur, ainsi que le coefficient de réflexion de l'obstacle.

- **Panneau "Avion et piste"**

Dans ce panneau, on peut introduire la distance de l'avion par rapport au localizer, sa vitesse et son cap. On doit aussi indiquer le QFU de la piste.

- Panneau "Bruit"

Dans ce panneau, on peut introduire le niveau max de bruit affectant les amplitudes et les phases des excitations des antennes.

- **Panneau "Filtrage"**

Lorsqu'il est actif le bouton "FILTRAGE" permet de filtrer et lisser le signal DDM afin d'atténuer les ondulations dues aux interférences..

Dans la partie inférieure à gauche, on trouve un indicateur de type HSI qui permet de visualiser le cap de l'avion, le QFU de l'avion et une aiguille dont la déviation est proportionnelle à l'écart de l'avion par rapport à l'axe de la piste. On peut l'activer ou le désactiver grâce à un commutateur.

Dans la partie supérieure , l'espace est réservé à une animation de l'atterrissage en 3D avec le tracé simultané de la DDM mesurée à bord.

Le bouton START SIM permet de lancer la simulation, le bouton STOP SIM permet d'arrêter à tout moment la simulation et d'afficher le tracé de la DDM. Un bouton permet d'activer le bruit des moteurs de l'avion.

#### **4.8 Mode d'utilisation de l'interface**

Les différentes étapes de la simulation sont les suivantes :

- Ouvrir la fenêtre SIMLOG et introduire le mot de passe suivi de ENTER
- Sélectionner dans le menu LOC ou GLIDE
- Sélectionner le type de réseau à l'aide du bouton popupmenu (cinq possibilités pour le LOC et deux pour le Glide)

Pour la simulation, il y a plusieurs possibilités :

- dans la fenêtre principale, sélectionner les courbes à tracer et cliquer sur RUN.
- cliquer sur PISTE pour introduire les nouveaux paramètres de piste et revenir dans la fenêtre principale pour la simulation.
- cliquer sur le bouton ANTENNES pour modifier les coefficients et revenir dans la fenêtre principale pour la simulation.

Si on veut simuler les interférences, cliquer sur le bouton OBSTACLES de la fenêtre LOC\_1 et introduire les données de simulation dans la fenêtre LOC\_6.

On peut aller d'une fenêtre à une autre selon le schéma suivant (fig. 4.11):

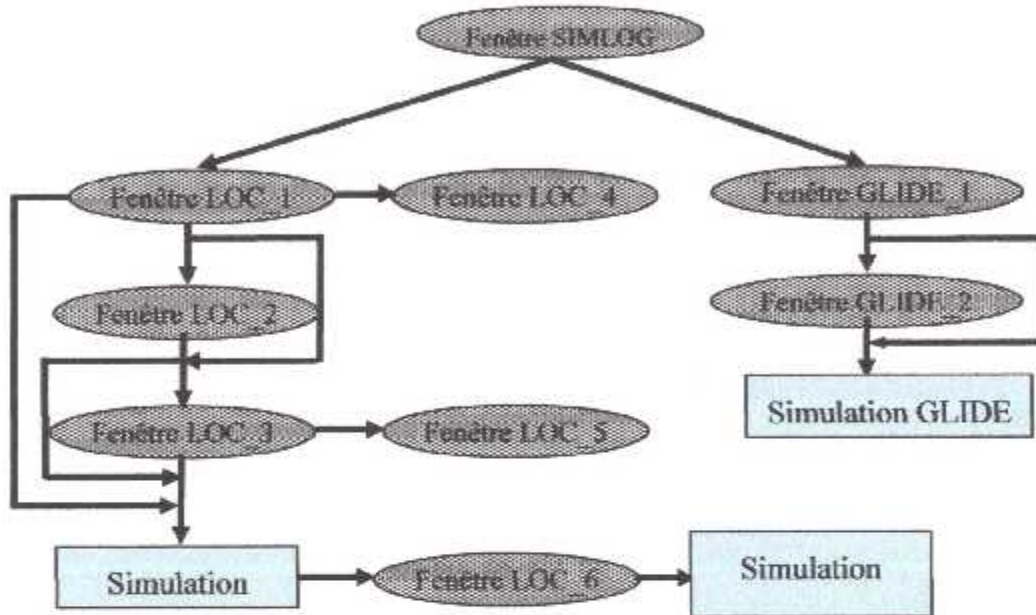


Fig 4.11 : Interconnexion des fenêtres de l'interface

## 4.9 Organigramme de l'interface

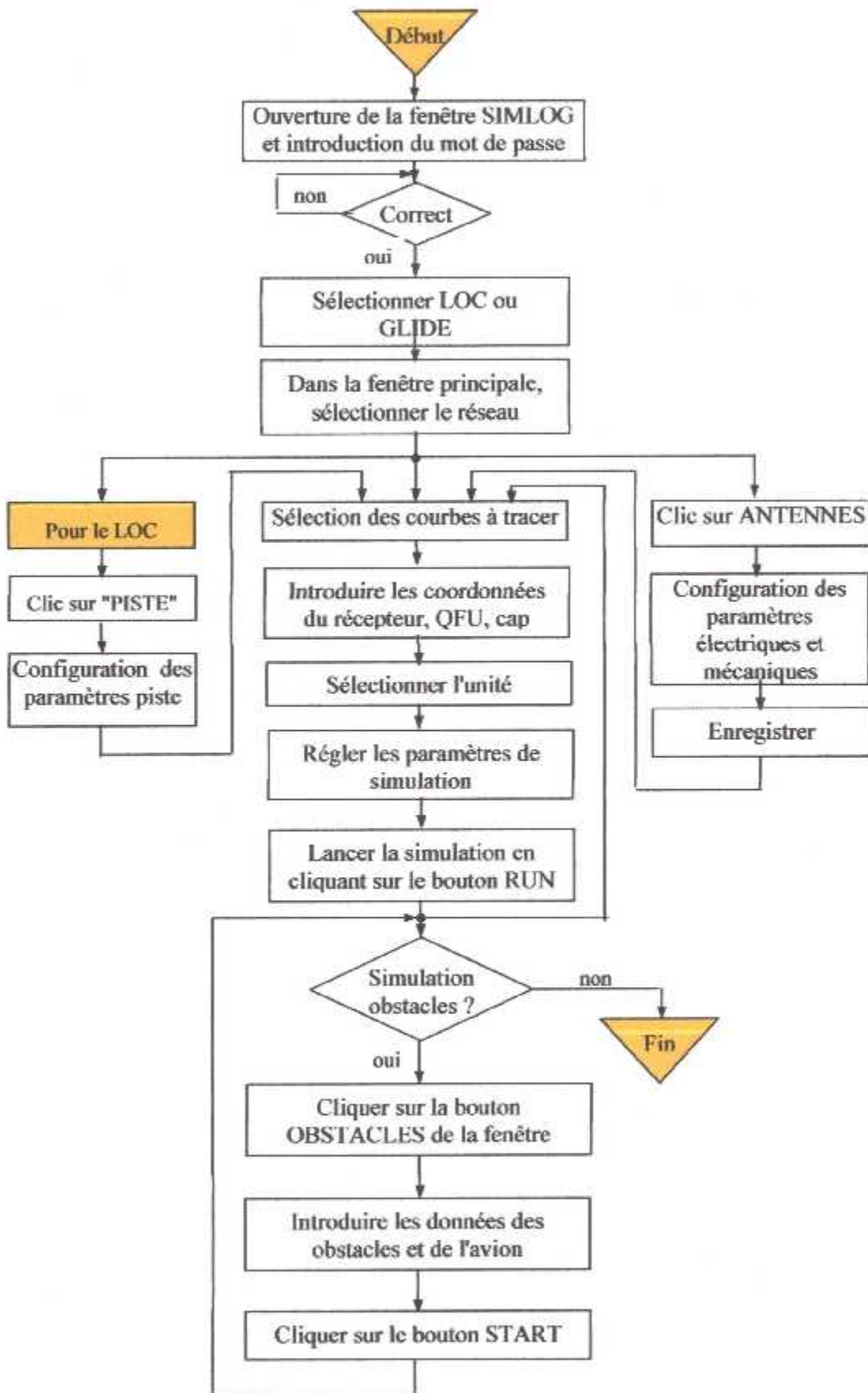


Fig 4.12 : Organigramme de l'interface

4.10 Quelques résultats de simulation

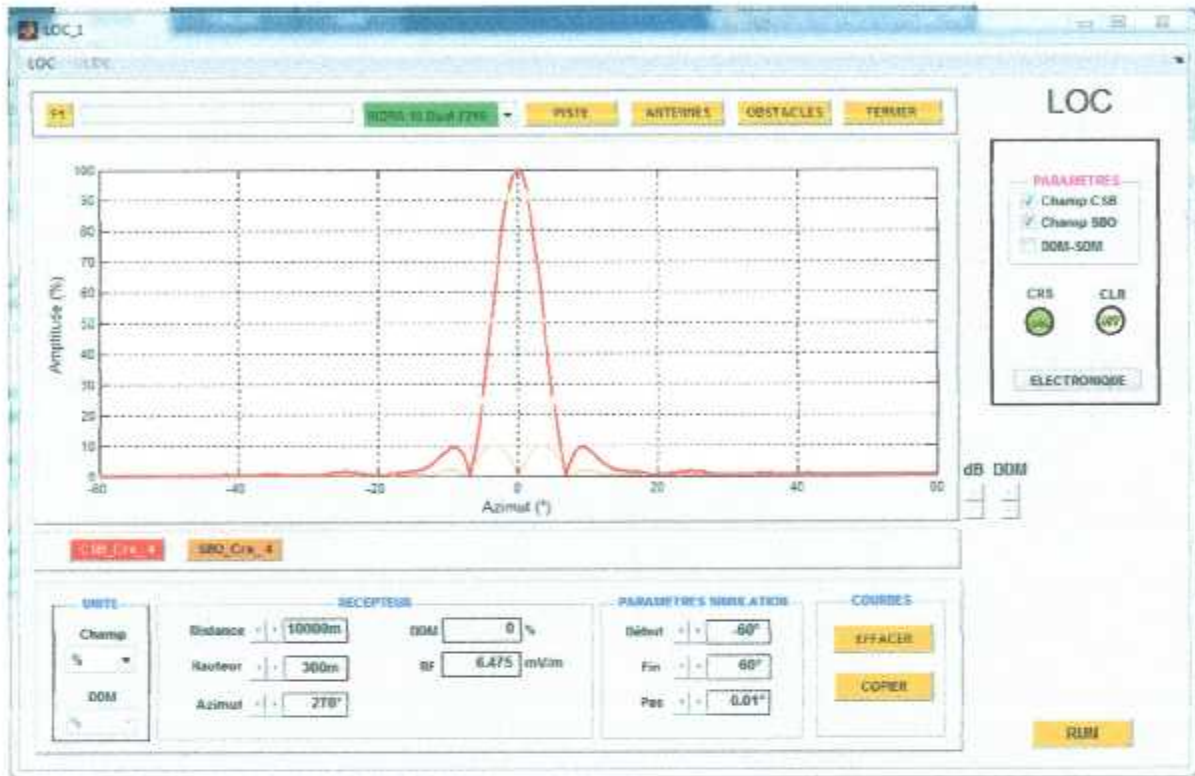


Fig 4.13 : Diagrammes P+BL et BLS directif du réseau INDRA 16

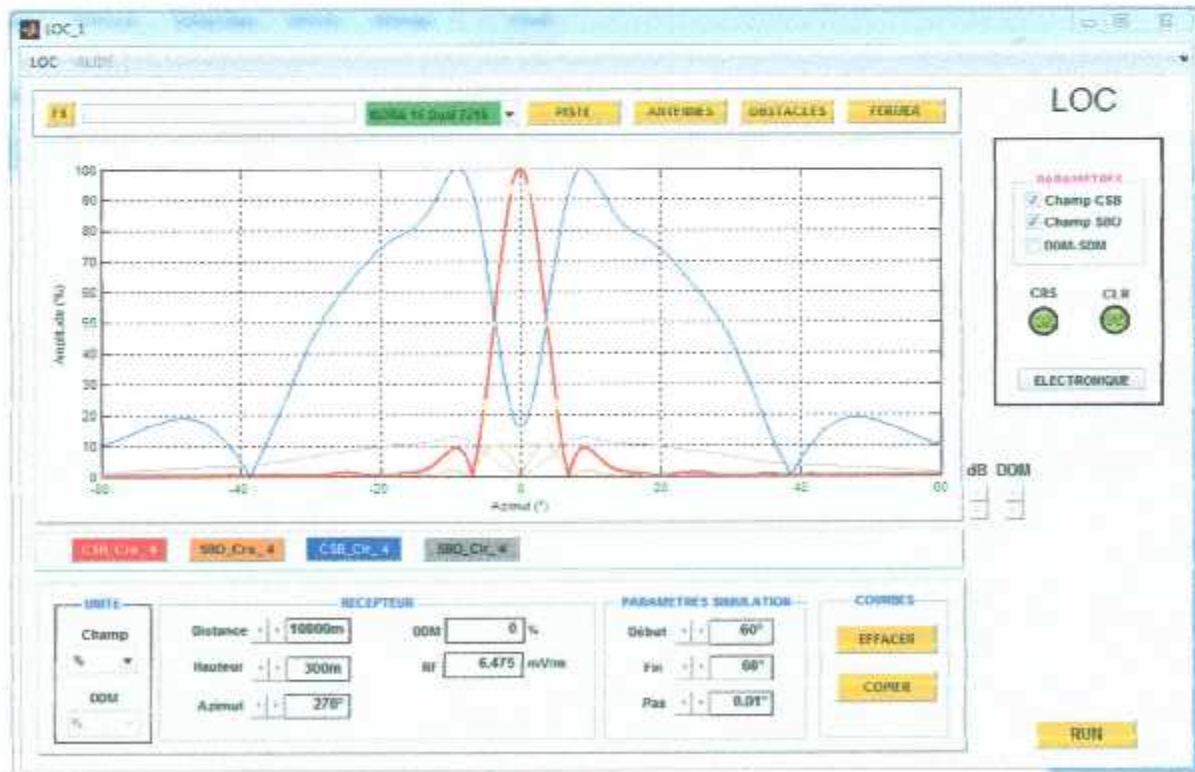


Fig 4.14 : Diagrammes P+BL et BLS directif et clearance du réseau INDRA 16



Fig 4.15 : DDM du réseau INDRA 16 antennes

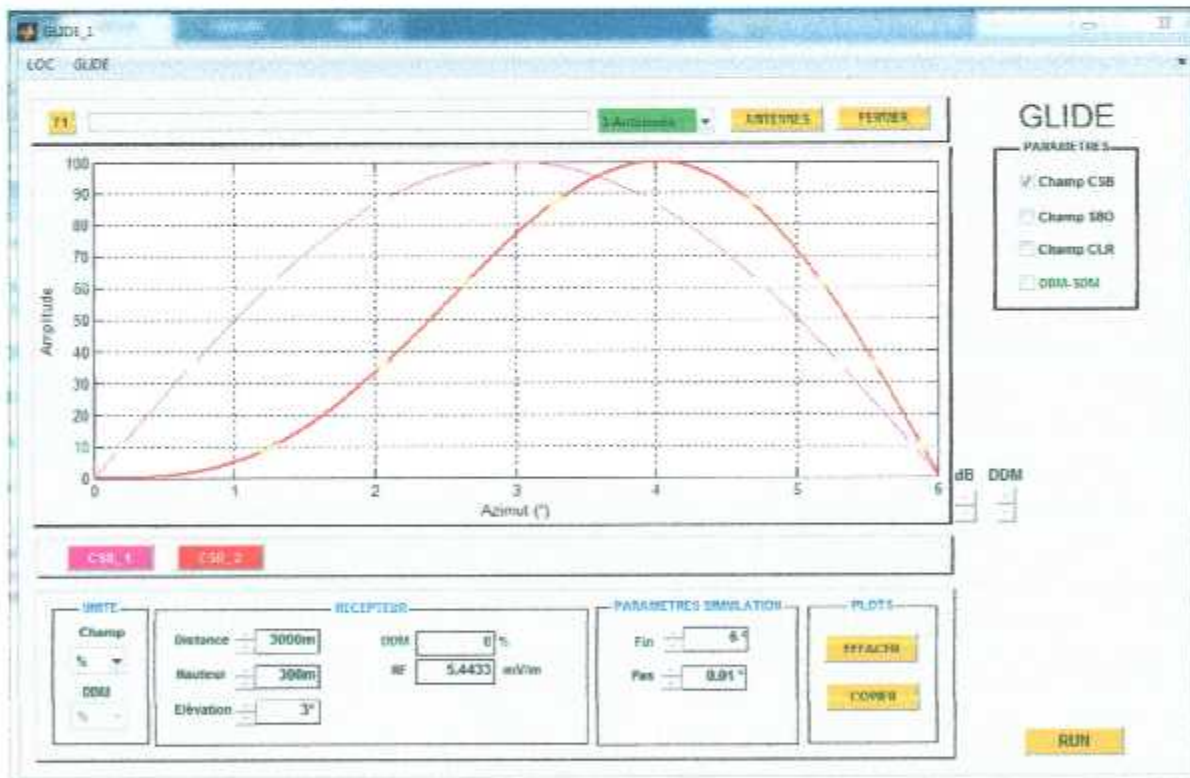


Fig 4.16 : Comparaison des diagrammes P+BL directif des Glides à 2 et 3 antennes

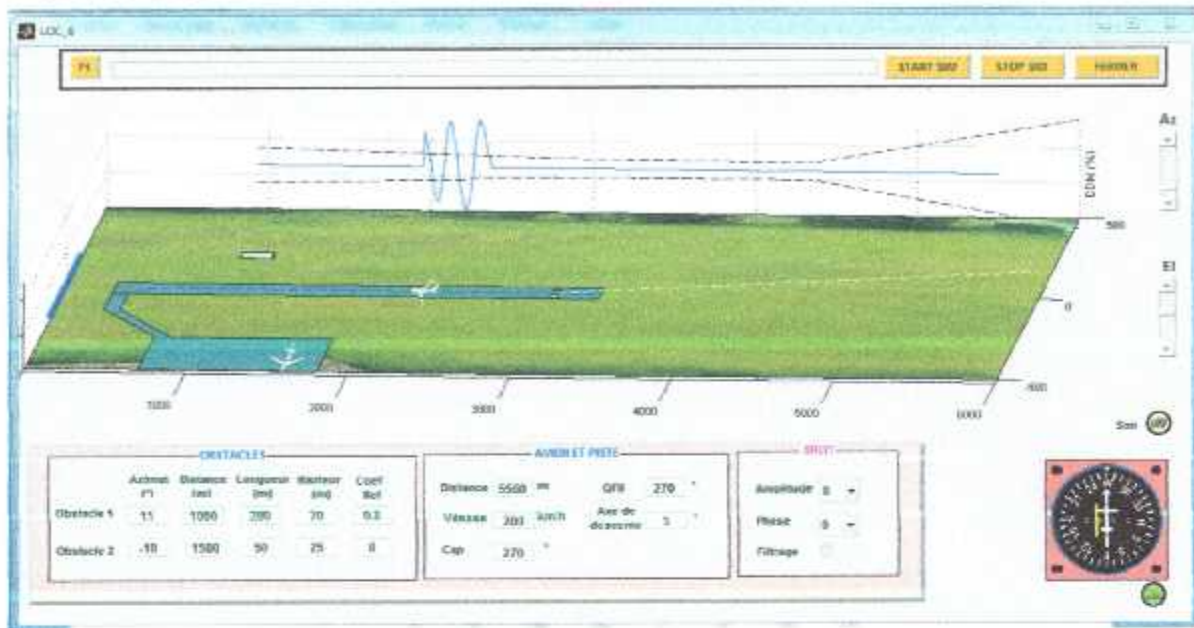


Fig 4.17 : Effet d'un obstacle sur la DDM

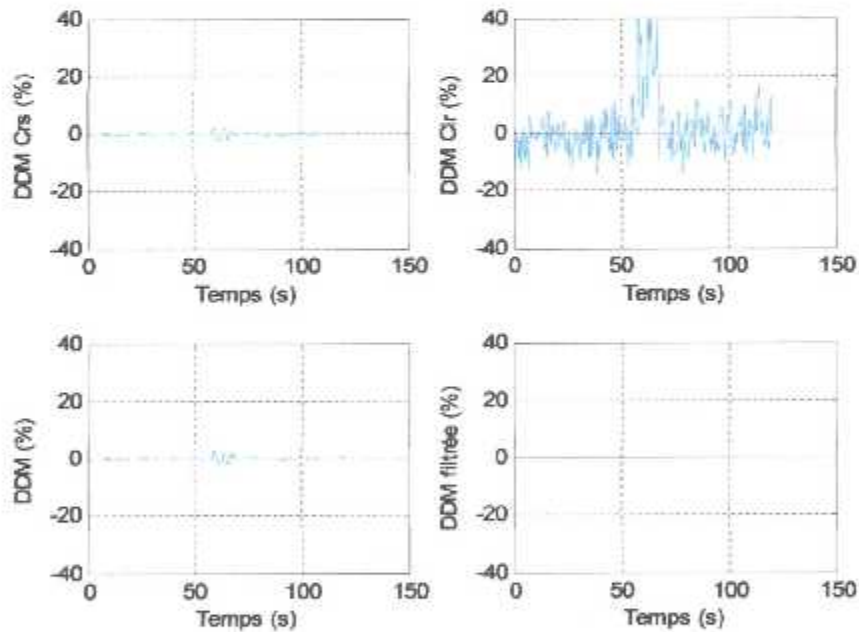


Fig 4.18 : Résultats de la simulation



## CONCLUSION GENERALE

---

Après six mois de stage au sein de cet établissement, nous avons réalisé une interface avec l'outil Guide de Matlab dédiée à la simulation des systèmes d'atterrissage Localizer et Glide, cette dernière répond à la demande formulé par l'ENNA ; ETUDE ET REALISATION D'UN SIMULATEUR LLS : SIMLOG, acronyme signifiant : simulation localizer et glide.

Le facteur temps a été notre plus grand souci, d'une part parce que nous aurions pu choisir un autre outil de simulation, qui offre plus de puissance et qui est le plus utilisé pour la création d'application, contrairement au Matlab qui, certes, est le plus adéquat pour les ingénieurs mais qui est limité et d'une autre part, nous aurions pu comparer nos résultats avec ceux de l'avion laboratoire qui est indisponible. Nous avons aussi eu du mal à trouver de la documentation car les constructeurs ne divulguent pas tout.

Cette interface, nous permet de visualiser de nombreux diagrammes de rayonnement et les paramètres DDM et SDM du localizer et du glide ainsi que l'effet des obstacles adjacents à la piste d'atterrissage. Un autre avantage de cette interface c'est la possibilité de simuler les paramètres électroniques d'une station localizer, de ce fait elle est utilisée à des fins pédagogiques

L'ENNA, en termes de radionavigation dispose des équipements requis et œuvrent pour une sécurité de la navigation dans son espace, grâce à SimLoG, les instructeurs de l'ENNA peuvent enfin former les futurs maintenanciers et ces derniers pourront simuler la situation et configurer les paramètres souhaités sans faire appelle à l'ENAC pour l'achat des simulateurs, en plus d'être gratuite, il est inutile de la renouveler.

Comme perspective à la présente étude nous proposons les améliorations

Éventuelles suivantes :

- Réalisation en ajoutant plus de réseaux d'antennes et en améliorant la précision d'emplacement des obstacles.
- Simulation des autres composants électroniques de la station localizer où bien glide comme le distributeur de puissance, le réseau de recombinaison, la partie surveillance (carte monitor , les réseaux de champs lointain).

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] E.SARTORIUS, Radionavigation, Institut France Aviation (Ecole INFRA), Paris,1972.
- [2] J-P CORBIER, Les Balises De Radionavigation,2012.
- [3] B.SERABIAN, La Radionavigation, Editions Du Cosmos, 1969.
- [4] A BOYER Antenne , Cours Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse
- [5] Cours radionavigation, ESMA, Ecole Supérieure des Métiers de l'Aéronautique, Édition 01-06.
- [6] BOUNSIS, Cours ILS, ENNA, 2005.
- [7] S. MEGUELLATI, Cours Antennes, Institut D'aéronautique Blida, 2013-2014
- [8] L. DJOULAH, Etude et réalisation d'une interface graphique du localizer, Mémoire PFE, Université de Blida, 2003.
- [9] Système ILS, Rappels Localiser, ENAC
- [10] Glide Path Principles, ENAC
- [11] E. SOLER, Radionavigation et Equipements au sol, ILS, IMA, 2013-2014
- [12] Interface ATOLI, ENAC, 2014

## ANNEXE

Dans cette annexe, nous présentons les coefficients d'excitation de plusieurs réseaux monofréquence et bifréquence utilisés dans notre interface.

- Réseau Thales 14 Single

- Coefficients CSB

|            |     |       |       |       |      |      |      |
|------------|-----|-------|-------|-------|------|------|------|
| Antennes   | L1  | L2    | L3    | L4    | L5   | L6   | L7   |
| Amplitudes | 100 | 41.66 | 36.44 | 18.17 | 14.6 | 5.24 | 3.12 |
| Phases     | 0   | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 180  |
| Antennes   | D1  | D2    | D3    | D4    | D5   | D6   | D7   |
| Amplitudes | 100 | 41.66 | 36.44 | 18.17 | 14.6 | 5.24 | 3.12 |
| Phases     | 0   | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 180  |

- Coefficients SBO

|            |     |       |       |      |       |       |       |
|------------|-----|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Antennes   | L1  | L2    | L3    | L4   | L5    | L6    | L7    |
| Amplitudes | 100 | 77.73 | 63.05 | 53.7 | 37.25 | 35.99 | 14.59 |
| Phases     | 90  | 90    | 90    | 90   | 90    | 90    | 90    |
| Antennes   | D1  | D2    | D3    | D4   | D5    | D6    | D7    |
| Amplitudes | 100 | 77.73 | 63.05 | 53.7 | 37.25 | 35.99 | 14.59 |
| Phases     | -90 | -90   | -90   | -90  | -90   | -90   | -90   |

- Réseau Thomson 13 Dual

- Coefficients CSB-Crs

|            |    |     |      |       |       |       |    |
|------------|----|-----|------|-------|-------|-------|----|
| Antennes   | L1 | L2  | L3   | L4    | L5    | L6    | L7 |
| Amplitudes | 25 | 100 | 86.1 | 60.95 | 35.48 | 15.67 | 0  |
| Phases     | 0  | 0   | 0    | 0     | 0     | 0     | 0  |
| Antennes   | D1 | D2  | D3   | D4    | D5    | D6    | D7 |
| Amplitudes | 25 | 100 | 86.1 | 60.95 | 35.48 | 15.67 | 0  |
| Phases     | 0  | 0   | 0    | 0     | 0     | 0     | 0  |



## - Coefficients SBO-Crs

| Antennes   | L1  | L2    | L3    | L4    | L5  | L6    | L7    | L8    |
|------------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| Amplitudes | 13  | 40.32 | 67.84 | 89.74 | 100 | 94.19 | 75.08 | 51.23 |
| Phases     | 90  | 90    | 90    | 90    | 90  | 90    | 90    | 90    |
| Antennes   | D1  | D2    | D3    | D4    | D5  | D6    | D7    | D8    |
| Amplitudes | 13  | 40.32 | 67.84 | 89.74 | 100 | 94.19 | 75.08 | 51.23 |
| Phases     | -90 | -90   | -90   | -90   | -90 | -90   | -90   | -90   |

## - Coefficients CSB-Clr

| Antennes   | L1  | L2   | L3   | L4    | L5    | L6   | L7   | L8   |
|------------|-----|------|------|-------|-------|------|------|------|
| Amplitudes | 100 | 40.6 | 6.39 | 17.16 | 10.06 | 6.64 | 2.73 | 0.01 |
| Phases     | 0   | 180  | 180  | 180   | 180   | 180  | 180  | 180  |
| Antennes   | D1  | D2   | D3   | D4    | D5    | D6   | D7   | D8   |
| Amplitudes | 100 | 40.6 | 6.39 | 17.16 | 10.06 | 6.64 | 2.73 | 0.01 |
| Phases     | 0   | 180  | 180  | 180   | 180   | 180  | 180  | 180  |

## - Coefficients SBO-Clr

| Antennes   | L1  | L2   | L3    | L4   | L5  | L6   | L7   | L8   |
|------------|-----|------|-------|------|-----|------|------|------|
| Amplitudes | 100 | 43.7 | 11.14 | 7.59 | 2.5 | 3.34 | 4.77 | 2.51 |
| Phases     | 90  | 90   | 90    | 90   | -90 | -90  | -90  | -90  |
| Antennes   | D1  | D2   | D3    | D4   | D5  | D6   | D7   | D8   |
| Amplitudes | 100 | 43.7 | 11.14 | 7.59 | 2.5 | 3.34 | 4.77 | 2.51 |
| Phases     | -90 | -90  | -90   | -90  | 90  | 90   | 90   | 90   |