

Protection des services radionavigation aéronautiques contre les stations de radio diffusion FM

PRIDA-ITU WORKSHOP (Abidjan 19-21 mars 2024)
Présenté par Nebnoma A. KABORE
CNS / ANS Safety Inspector
nebnoma@gmail.com

Date : 19-21 mars 2024)

PLAN DE LA PRESENTATION

- I. Principe de fonction d'une Radio FM
- II. Bande de fréquences Radio FM, ILS (Localizer) et VOR
- III. Principe de fonction d'un VOR
- IV. Principe de fonction d'un ILS (Localizer)
- V. Mesures de Préventions

I. Principe de fonction d'une Radio FM

1. Principe (1)

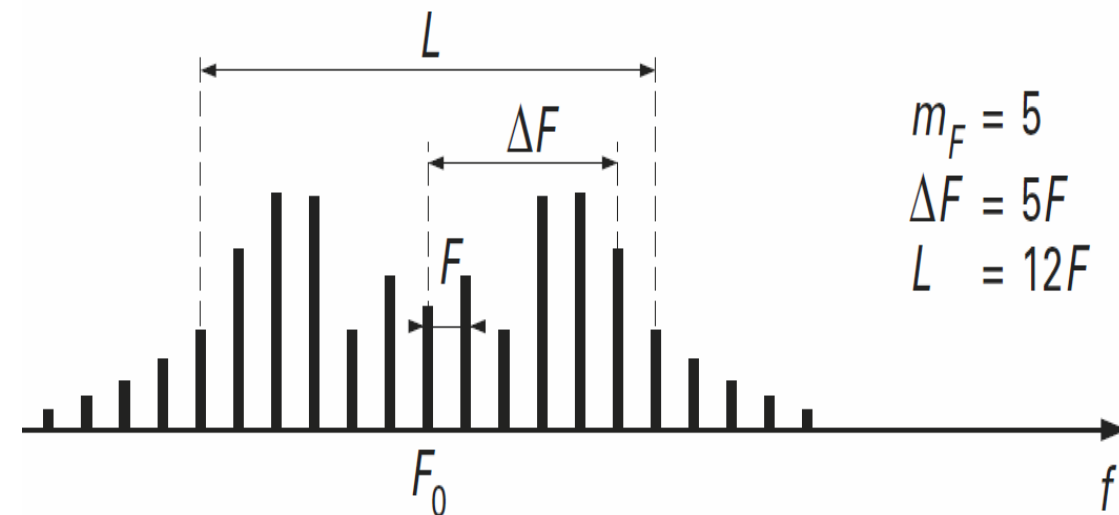
Soit un signal modulant $m(t)$ et une porteuse $n(t)$:

$$m(t) = \cos \omega_1 t$$

$$n(t) = A \sin (\omega t + \varphi)$$

$$n(t) = A \sin \left(\omega t + \frac{\Delta f}{f_1} \sin \omega_1 t + \Phi \right)$$

La **radiodiffusion FM** consiste à **moduler en fréquence** une porteuse (88 à 108 MHz) par un **signal en bande de base**. Au départ, ce signal en bande de base était simplement un signal audio monophonique. Cependant, avec l'adjonction de la stéréophonie et d'autres services, ce signal est désormais **un signal multiplexe**.



I. Principe de fonction d'une Radio FM

1. Principe (2)

Dans les émissions en stéréo, le signal monophonique représente en réalité la somme des deux canaux stéréo gauche et droite, soit $G + D$. De cette façon, un récepteur monophonique dispose bien de l'ensemble des sons émis. Cependant, en stéréo on transmet en plus la différence des voies ($G - D$) en modulant une sous-porteuse à 38 kHz. Il s'agit d'une modulation d'amplitude à porteuse supprimée. La suppression de la porteuse permet d'améliorer le rapport signal sur bruit. Un signal supplémentaire de référence « pilote » à 19 kHz (inaudible et de faible amplitude) sert à restituer facilement cette sous-porteuse lors de la réception, afin d'effectuer correctement la démodulation. Cela facilite en outre la reconnaissance automatique des émissions stéréophoniques par les récepteurs compatibles. Le récepteur peut passer en mode stéréo ou mono selon la qualité de réception du signal.

I. Principe de fonction d'une Radio FM

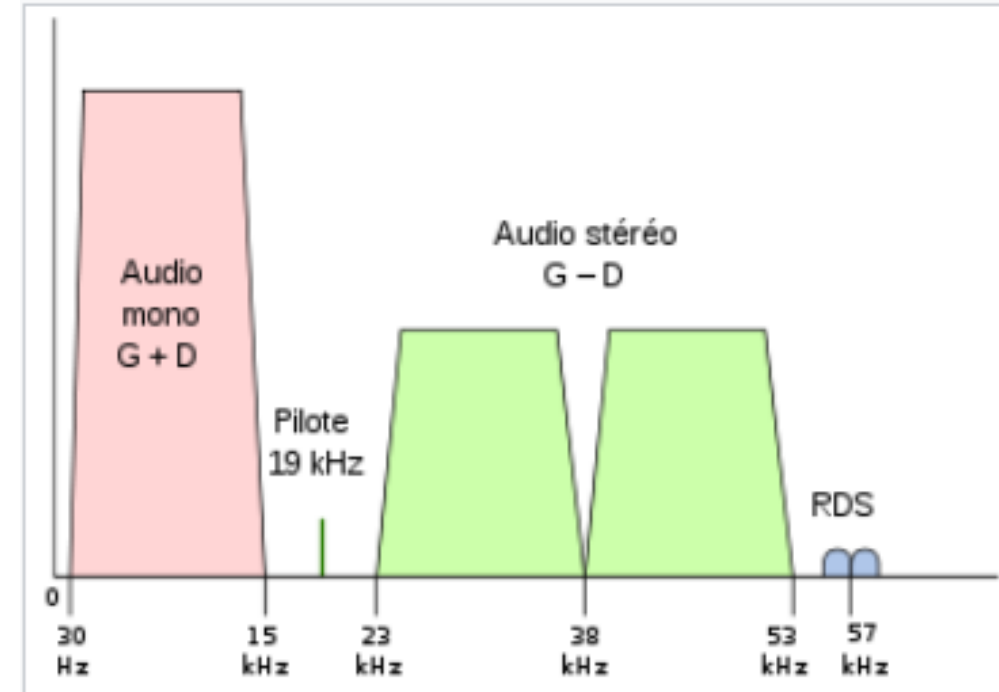
1. Principe (4)

Les informations du Radio data system (RDS) sont transmises sous forme numérique, via une sous-porteuse à 57 kHz (verrouillée en phase ou en quadrature sur le troisième harmonique du signal pilote). La sous-porteuse à 57 kHz est modulée par déplacement de phase (2-PSK) par un flux de données numériques à 1 187,5 bit/s. Elle est supprimée.

Donc par exemple, avec une radio émettant en stéréo et utilisant le RDS, le résultat sera :

- le signal « G + D » de 30 Hz à 15 000 Hz sans modulation ;
- le signal pilote de 19 000 Hz ;
- le signal « G - D » de 23 000 Hz à 53 000 Hz (modulation d'amplitude à deux bandes latérales, autour de la sous-porteuse supprimée à 38 000 Hz) ;

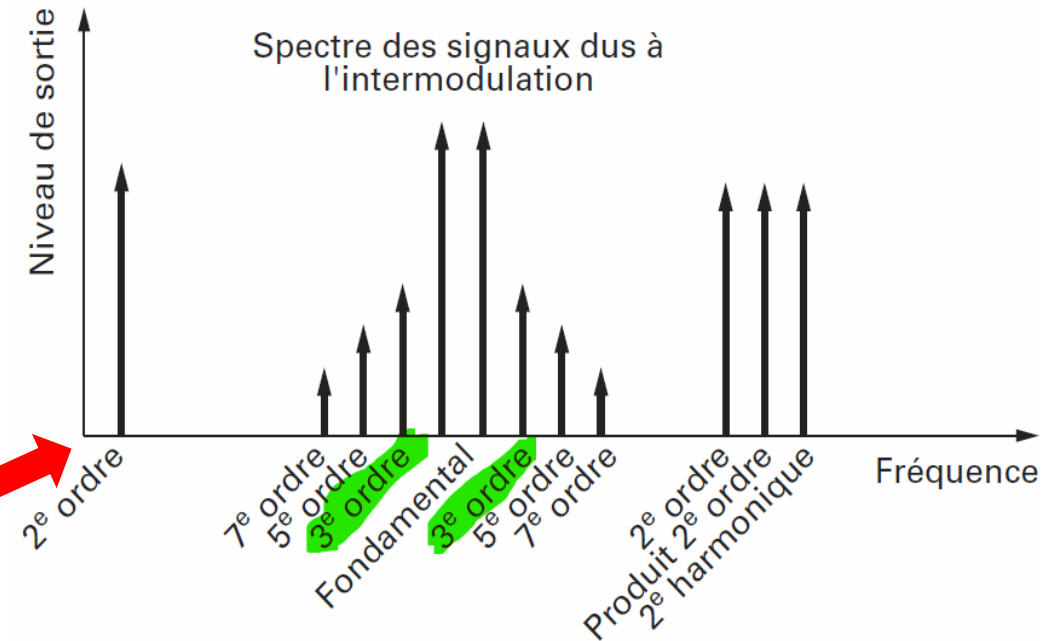
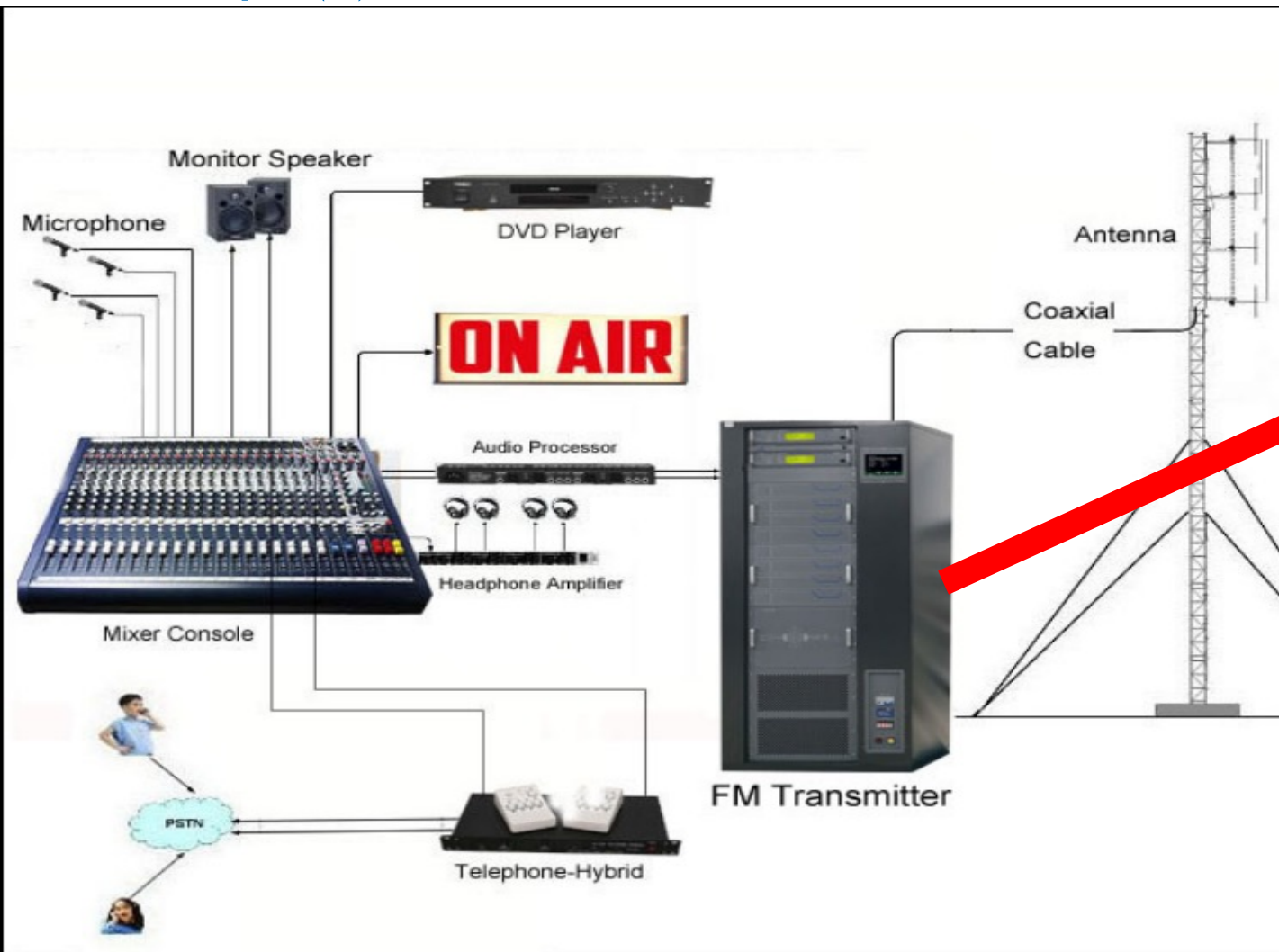
le signal RDS (deux bandes latérales autour de la sous-porteuse à 57 000 Hz, supprimée).



Spectre d'une émission de radiodiffusion FM, avec stéréophonie et RDS.

I. Principe de fonction d'une Radio FM

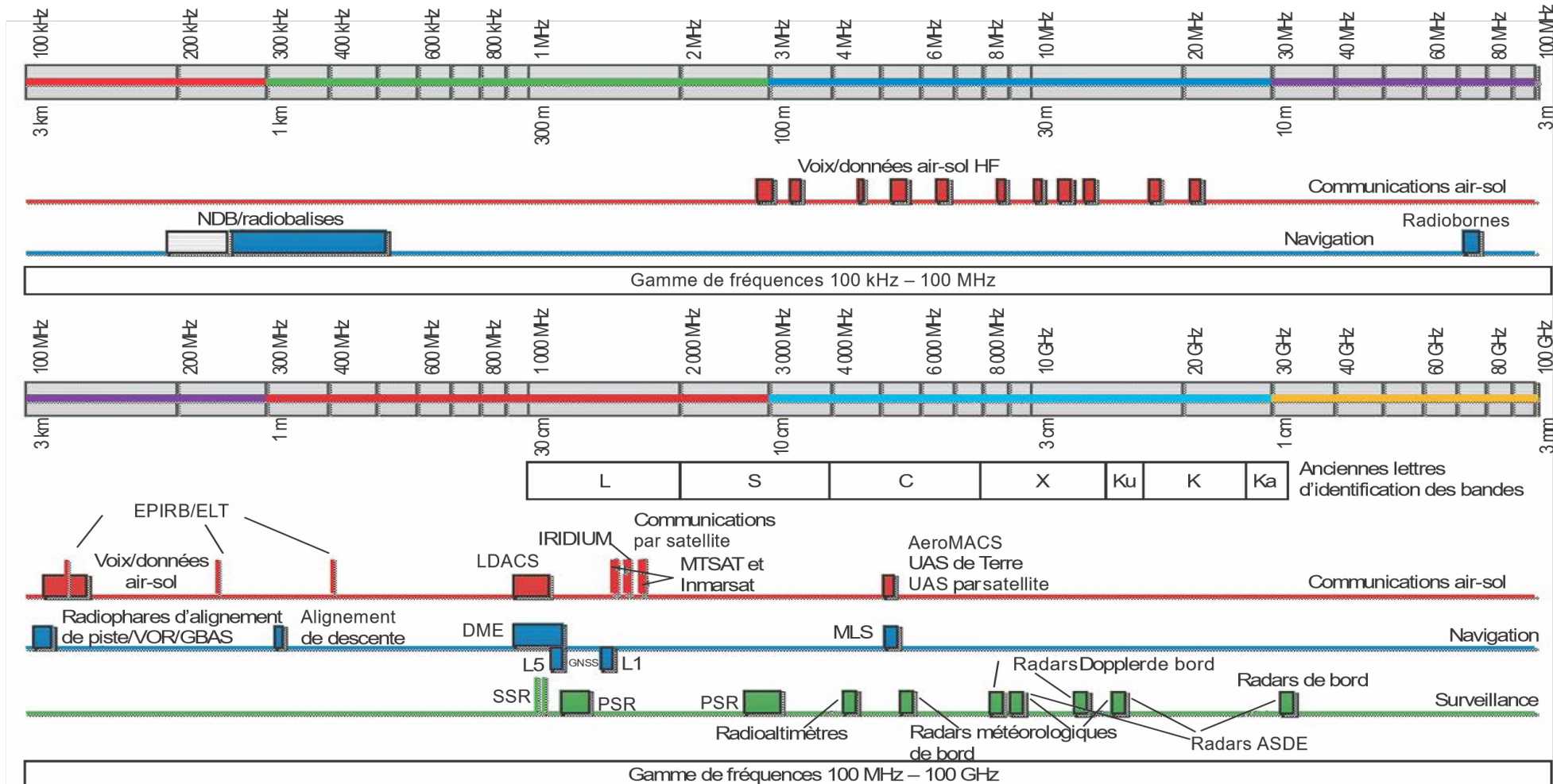
1. Principe (2)



La sortie des amplificateurs génèrent des produits d'intermodulations (harmoniques) de niveau suffisants pour perturber les canaux adjacents, si toute fois un filtrage approprié n'a pas été mis en œuvre.

II. Bande de fréquences Radio FM, ILS et VOR

6. Bande de fréquences (1)



Notes :

1. La figure n'est pas à l'échelle.

3. Le symbole (p. ex. VHF) et le numéro de la bande correspondent à ceux du Règlement des radiocommunications

II. Bande de fréquences Radio FM, ILS et VOR

6. Bande de fréquences (2)



Ces bandes sont adjacentes et attribuées aux services de Radio FM, ILS(Localizer), VOR et aux Communications VHF successivement, des interférences ont été causés par les émissions des stations de radiodiffusion, en particulier celles qui exploitent des fréquences proches de l'extrémité de la bande FM et dans des zones où la densité des stations FM et des services ILS ou VOR ou Services de communications VHF est élevée.

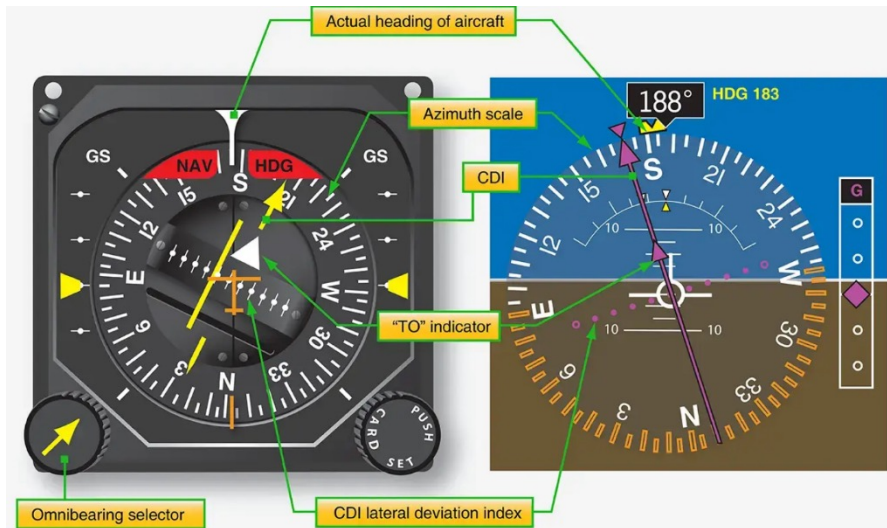
Les problèmes de compatibilité dus aux produits d'intermodulation, générés aussi bien au niveau des stations d'émission FM qu'au niveau des récepteurs ILS/VOR et VHF, ainsi que la surcharge à l'étage d'entrée des récepteurs ILS/VOR et VHF, sont apparus quand les radio FM ont commencé leur diffusion.

Les services VOR sont touchés aussi, mais à un degré moins critique. Les communications VHF sont touchées également, à un degré moindre que l'ILS/VOR, étant donné leur espacement de fréquences plus important

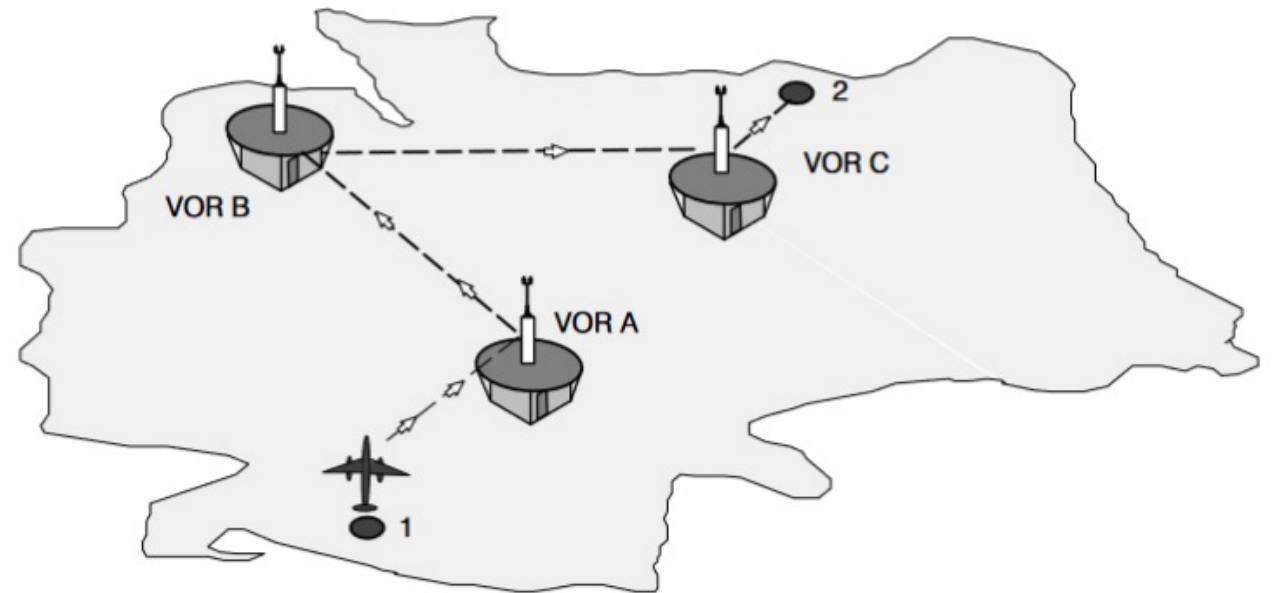
III. Principe de fonction d'un VOR

1. Principe (1)

Le VOR (CVOR ou DVOR) est une aide à la navigation fonctionnant dans la gamme de fréquences **108 et 118 MHz** et ayant une portée allant jusqu'à 300 km. Il fournit une **information d'azimut** permettant au pilote de voler d'une station (C/D)VOR à une autre au moyen de trajectoires préprogrammées. Les variations de la trajectoire présélectionnée sont affichées sur un instrument de bord au moyen d'informations telles que « vole à droite » ou « vole à gauche » ainsi qu'au moyen de l'indication de direction « de/vers » qui indique si l'avion se dirige vers le radiophare omnidirectionnel ou s'il s'en éloigne.



Equipement de bord



III. Principe de fonction d'un VOR

1. Principe (2)

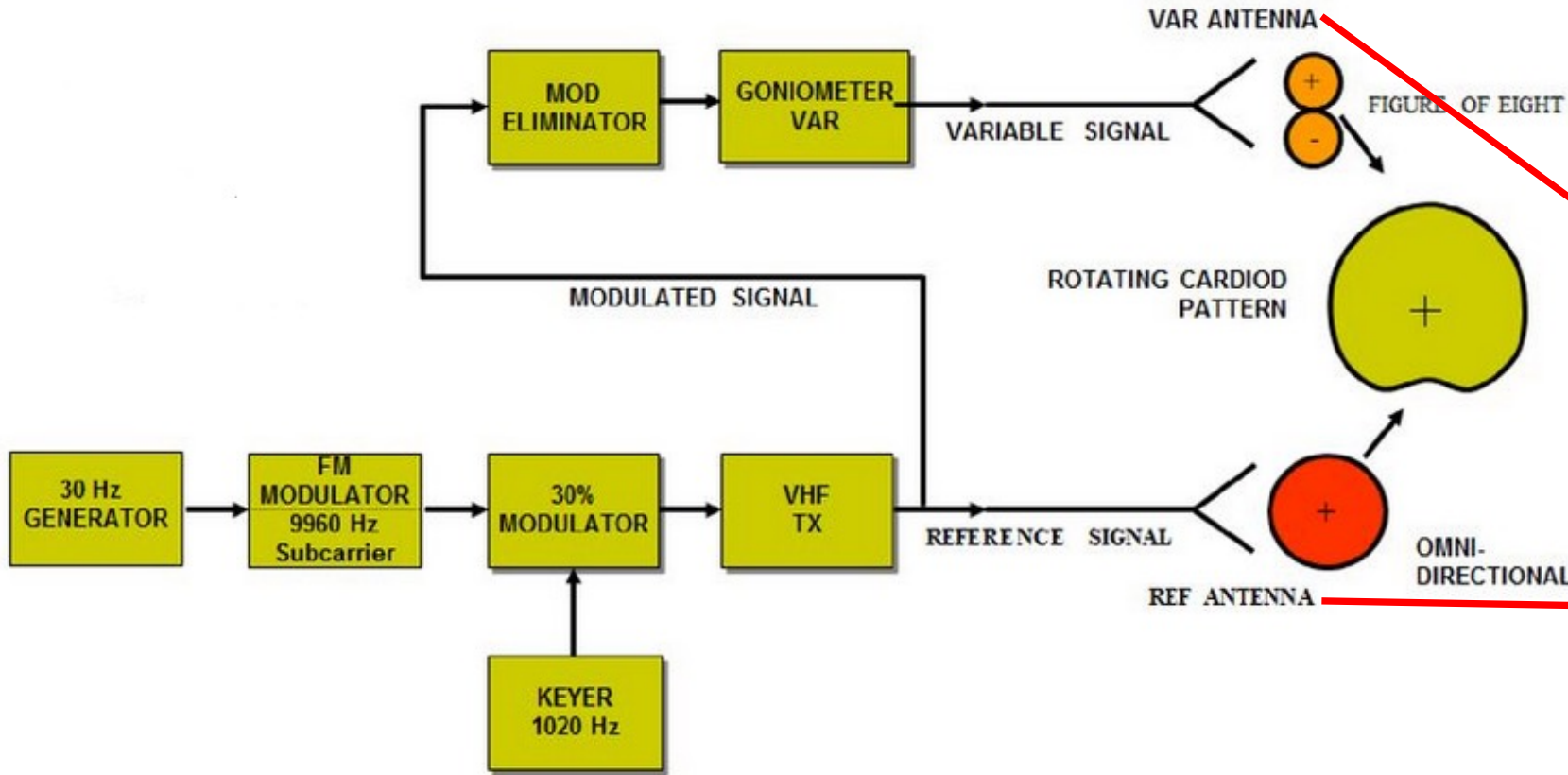
Le **signal de référence** module (FM) une sous-porteuse de 9960 Hz avec une excursion de fréquence de ± 480 Hz. Cette sous-porteuse est émise en modulation d'amplitude (AM) de la porteuse f_0 avec un taux de modulation de 30 % par une antenne omnidirectionnelle polarisée horizontalement. De plus, la porteuse f_0 est modulée avec un code d'identité (1020 Hz) ainsi qu'avec une fréquence vocale (300 à 3000 Hz).

Le **signal dépendant de la direction (variable)** est émis par deux dipôles croisés de 30 Hz. Les dipôles croisés reçoivent des signaux de bande latérale en provenance des deux émetteurs de bande latérale, caractérisés par une différence de phase de 90° dans l'enveloppante. La porteuse des signaux de bande latérale est supprimée. Cela donne un diagramme en huit effectuant 30 rotations par seconde dans l'espace.

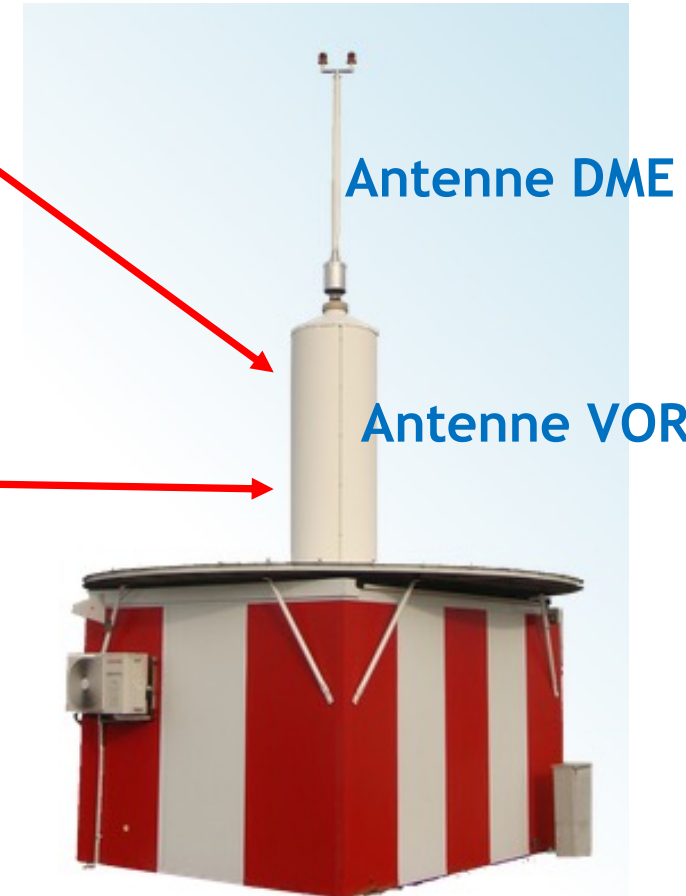
Etant donné que la porteuse f_0 est émise par une antenne omnidirectionnelle, la superposition de la porteuse et des bandes latérales à 30 Hz dans le champ (lorsque la phase est correctement ajustée) produit une modulation d'amplitude pure dont la phase de l'onde à 30 Hz en résultant dépend de l'azimut, par rapport au signal de référence à 30 Hz.

III. Principe de fonction d'un VOR

1. Principe (3)



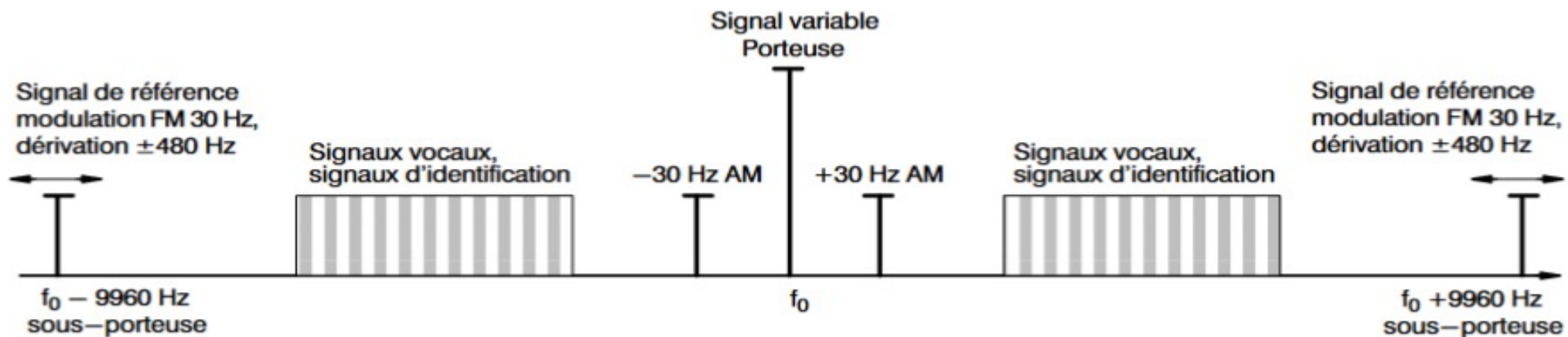
Antenne DME



III. Principe de fonction d'un VOR

1. Principe (4)

Le **signal RF** émis par le VOR est modulé par **deux ondes sinusoïdales de 30 Hz**. Ces deux ondes de 30 Hz ont une position de phase donnée l'une par rapport à l'autre dépendant de la direction dans laquelle le signal est reçu. Le position de phase est identique à l'angle géographique entre le Nord et la direction de l'avion par rapport à la station au sol (azimut). L'une des deux ondes à 30 Hz est totalement indépendante de l'azimut, tandis que la position de phase de la seconde onde à 30 Hz varie avec l'azimut par rapport à la première. Le signal de référence et le signal variable sont modulés de différentes façons.



III. Principe de fonction d'un VOR

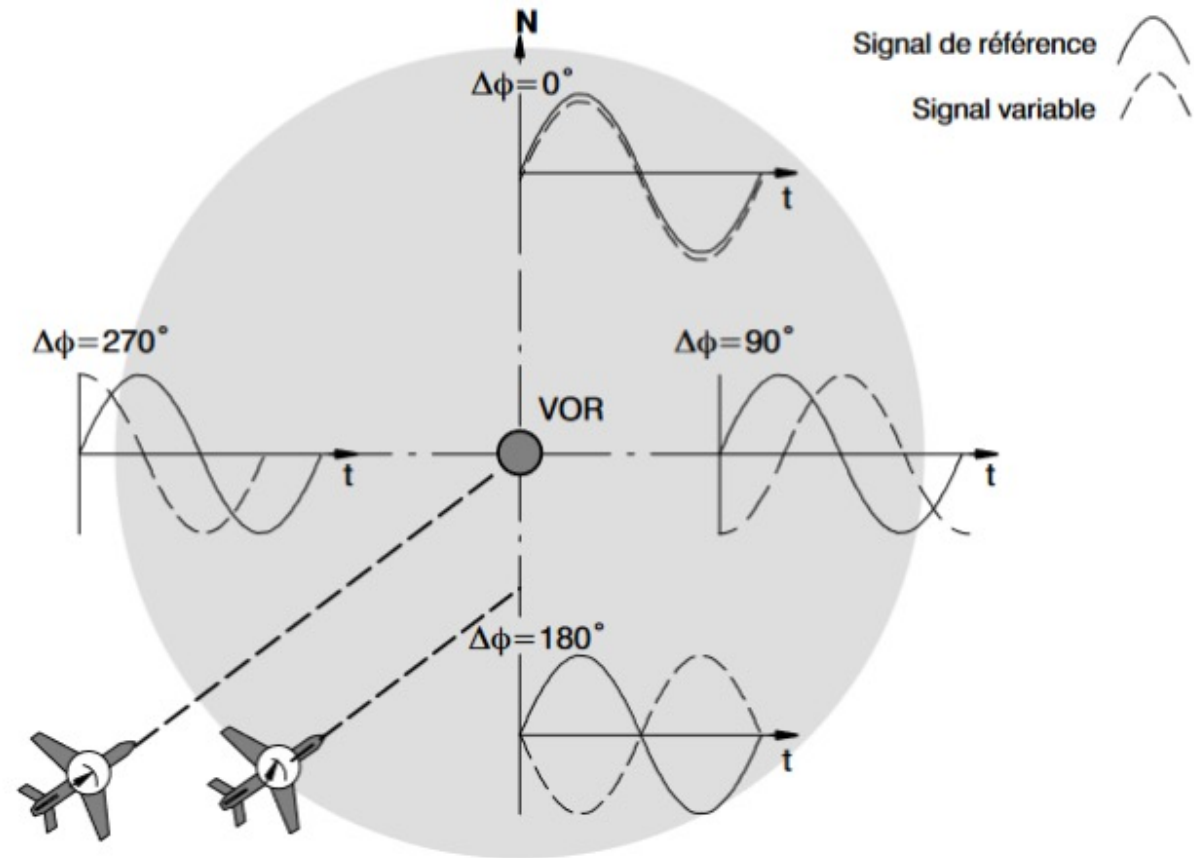
1. Principe (5)

Les rapports de phase entre le signal de référence et le signal variable dépendant de la direction dans plusieurs directions sont les suivants:

sous un angle d'azimut de 0° (Nord), l'angle de phase entre les deux signaux est de 0° .

Au Sud (azimut = 180°), l'angle de phase est de 180° ; à l'Est (azimut = 90°), il est de 90° et, à l'Ouest (azimut = 270°), il est de 270° .

Les lignes de position radio sur lesquelles l'angle d'azimut reste constant se trouvent en position radiale par rapport à la station VOR.



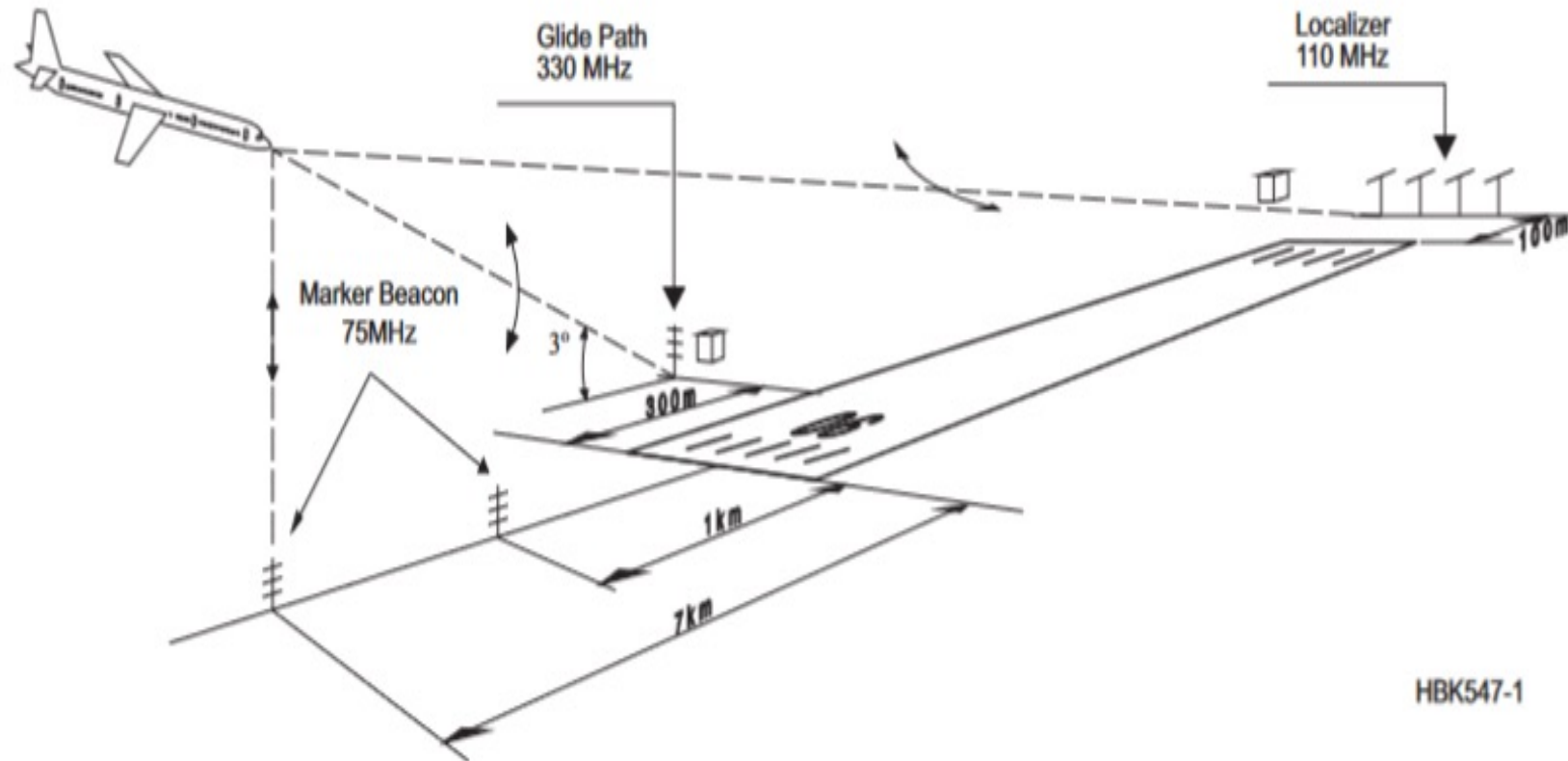
IV. Principe de fonction d'un ILS

1. Principe (1)

Le système ILS est constitué par un ensemble d'émetteurs, qui émettent dans la direction de la trajectoire d'approche finale. Le signal radioélectrique émis n'est pas le même dans toutes les directions, il est en fonction de l'azimut et du site de la direction d'émission.

L'ILS est constitué:

d'un système Localizer (LOC),
d'un système Glide Path (GP) et
d'une série de radio bornes
(Markers) remplacés par le DME
(Distance Measuring Equipment)
qui donne une distance continue.



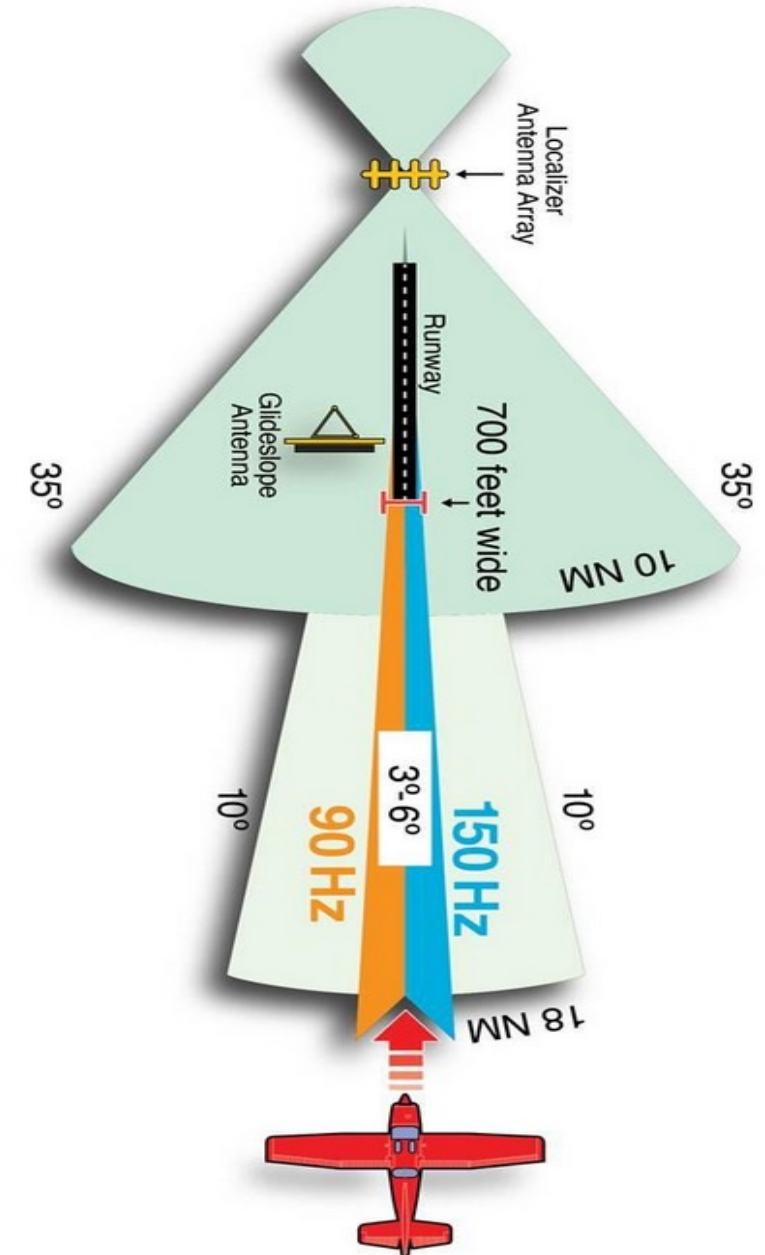
IV. Principe de fonction

1. Principe (2)

Le radiophare d'alignement de piste est constitué d'un ensemble d'antennes situées après le bout de la piste qui émettent dans la gamme de fréquences **108 -111,975 MHz**,.

Elle est modulée par 2 basses fréquences, l'une à 90 Hz et l'autre à 150 Hz. À droite de l'axe de la piste, le taux de modulation du 150 Hz est supérieur à celui du 90 Hz et inversement à gauche de l'axe. La différence de taux permet d'en déduire un écart qui est affiché sur le récepteur de bord. Il s'ajoute une modulation à 1 020 Hz qui transmet le code Morse d'identification de la station correspondant généralement à 2 ou 3 lettres de l'alphabet.

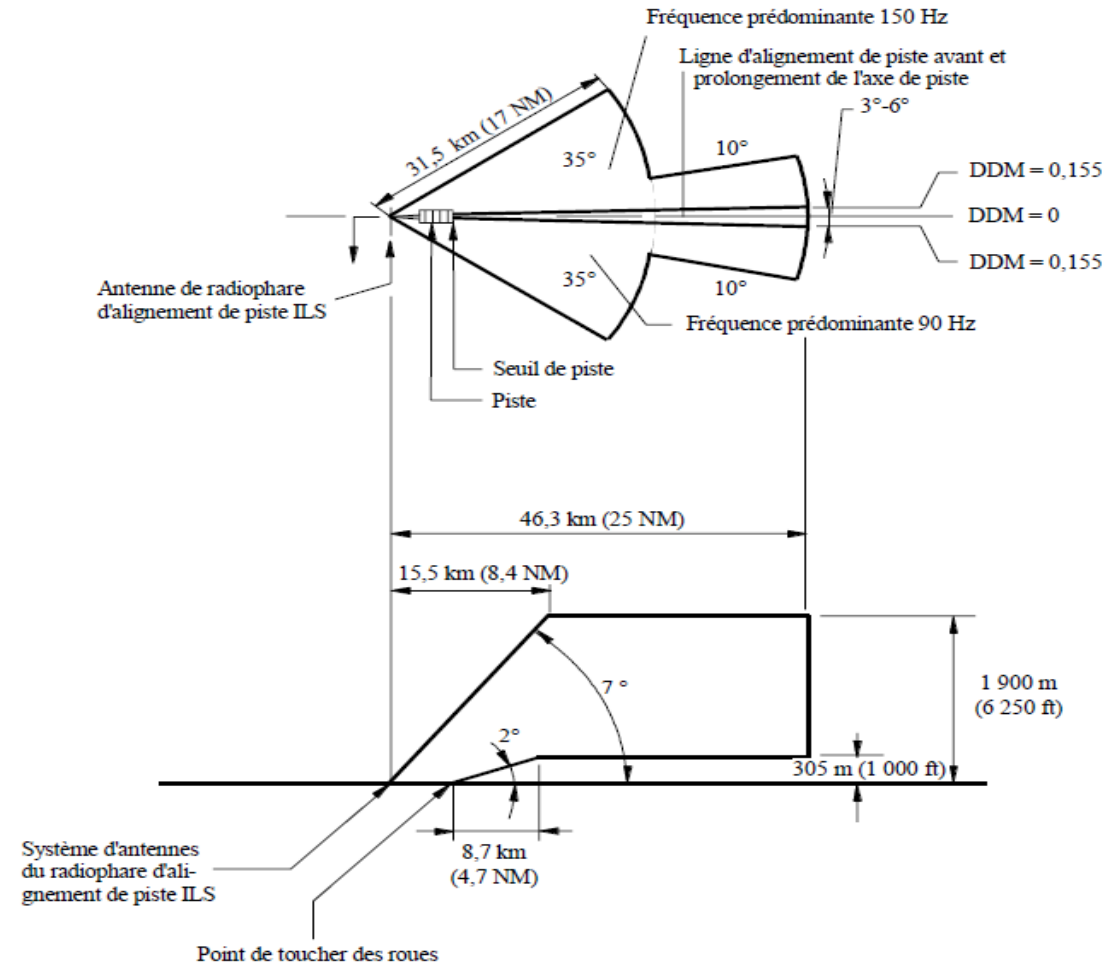
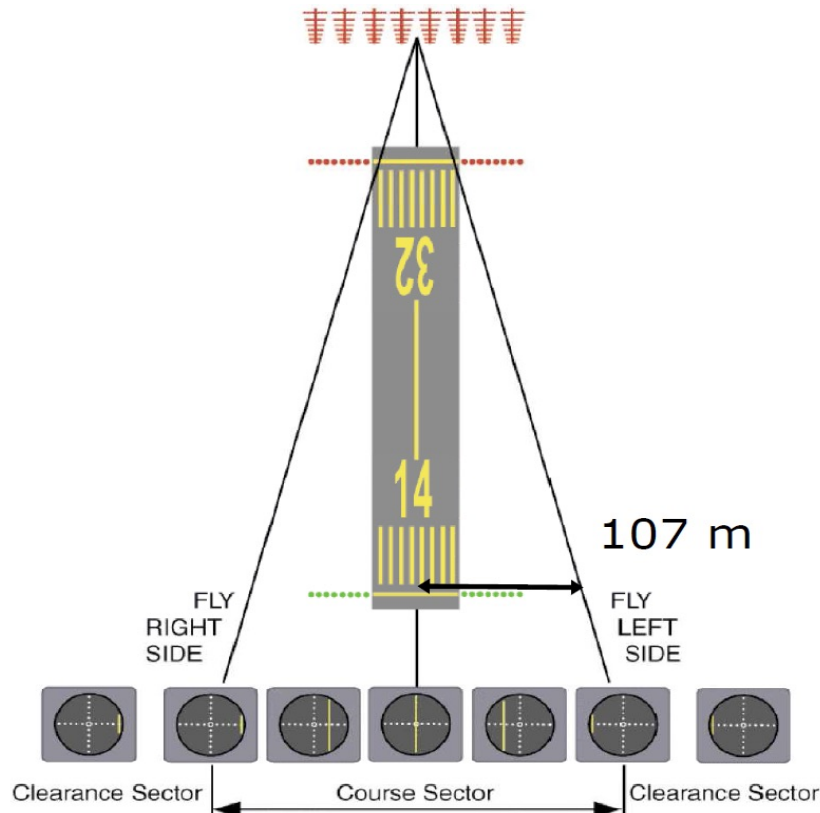
Le diagramme de rayonnement est ouvert dans le plan horizontal d'environ 35° de part et d'autre de l'axe de piste et de 7° dans le plan vertical. La zone de guidage linéaire ne couvre quant à elle qu'une ouverture maximum de +/- 107 m au seuil de piste par rapport à la position d'axe.



IV. Principe de fonction d'un ILS

1. Principe (3)

Le diagramme de rayonnement est ouvert dans le plan horizontal d'environ 35° de part et d'autre de l'axe de piste et de 7° dans le plan vertical. La zone de guidage linéaire ne couvre quant à elle qu'une ouverture maximum de +/- 107 m au seuil de piste par rapport à la position d'axe.

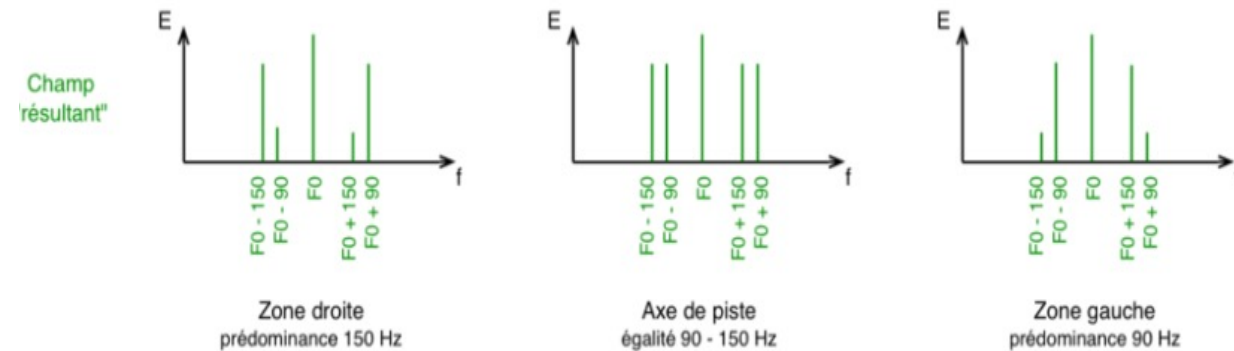
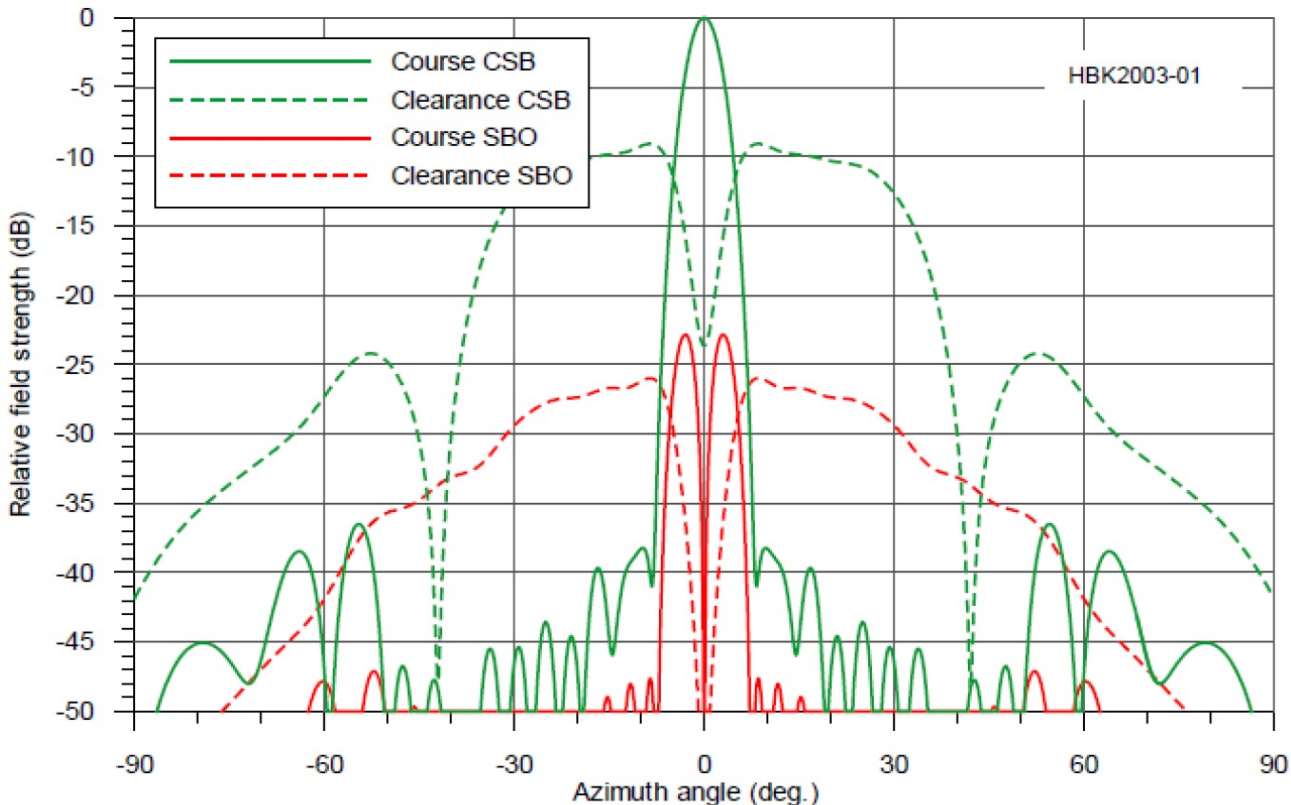


Note 1 – Toutes les cotes sont données par rapport à l'emplacement du radiophare d'alignement de piste ILS.
Note 2 – Pas à l'échelle.

IV. Principe de fonction d'un ILS

1. Principe (4)

Ce système est sensible aux propagations par trajets multiples (réflexions, diffractions...). Pour réduire le phénomène la plupart des ILS sont bi-fréquence (deux fréquences VHF très proches dans la même plage de fréquence. Une fréquence VHF pour le guidage dans l'axe de piste (appelé Course) et une fréquence pour la couverture dans le plan horizontal (appelé Clearance). Le récepteur de bord effectue la capture du signal le plus fort qui donne une distance continue.



V. Mesures de Préventions

1. Recommandation SM 1009-1 (1)

La Recommandation SM.1009-1 de l'Union Internationale des Télécommunications: Compatibilité entre le service de radiodiffusion sonore dans la bande d'environ 87 - 108 MHz et les services aéronautiques dans la bande 108 - 137 MHz. Elle comporte trois annexes, énumérées ci-après et traitent du sujet d'une manière exhaustive :

- Annexe 1 : Mécanismes de brouillage, caractéristiques des systèmes et critères d'évaluation de la compatibilité
- Annexe 2 : Méthode générale d'évaluation
- Annexe 3 : Évaluation détaillée de la compatibilité et vérification pratique

La Recommandation étudie d'une manière exhaustive le traitement des situations conflictuelles pour les quatre modes de brouillage :

Type A : Brouillage causé par des émetteurs de radiodiffusion FM dans la bande ILS/VOR. Les deux sous-types sont les suivants :

Type A1 : **produits d'intermodulation non essentiels ou harmoniques générés par un ou plusieurs émetteurs FM dans la bande aéronautique ;**

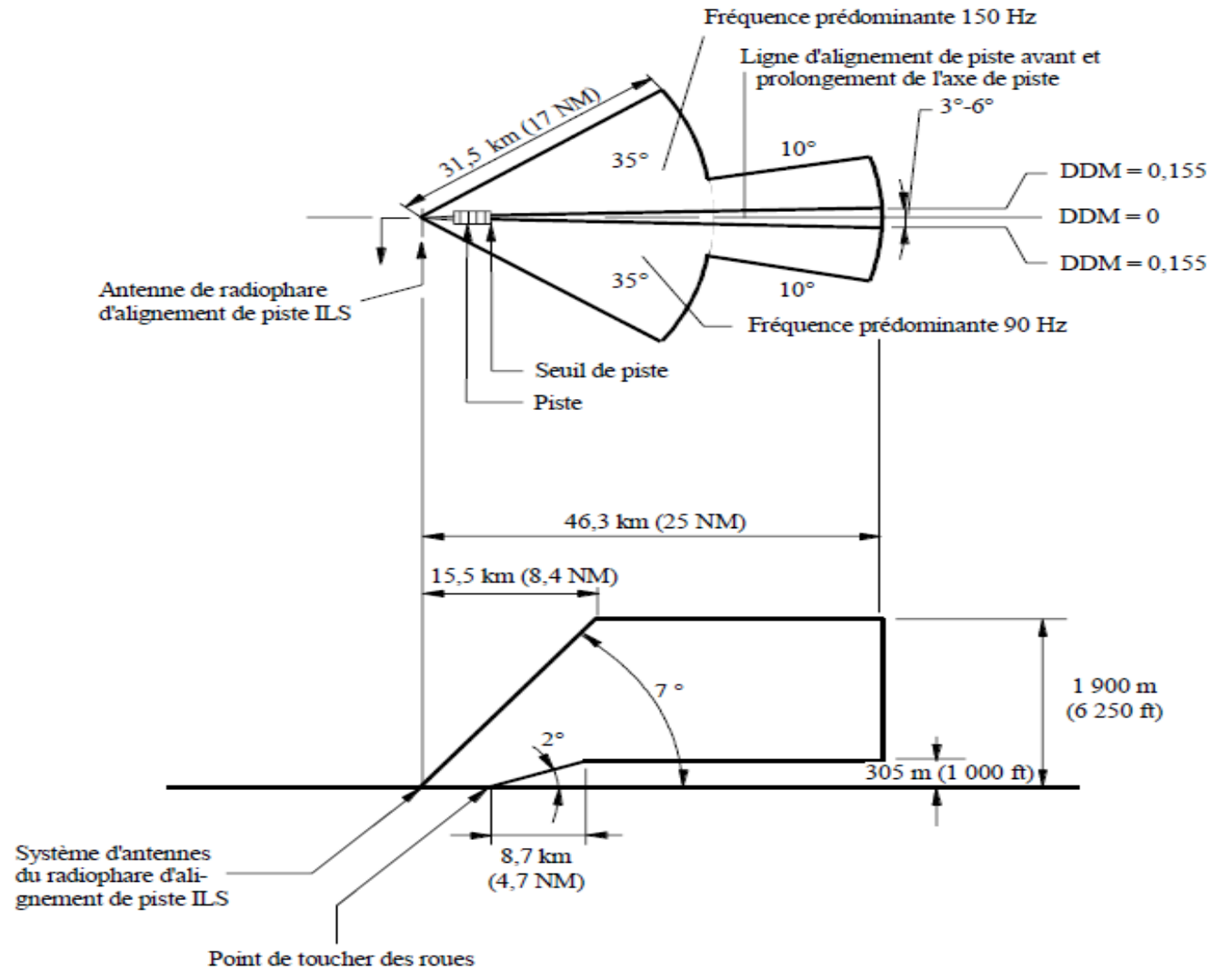
V. Mesures de Préventions

1. Recommandation SM 1009-1 (2)

La valeur minimale de l'intensité de champ à protéger dans toute la zone avant de la COS d'un radiophare d'alignement de piste ILS est de 32 dB(microV/m) (40 microV/m) .

Les seuils de brouillage pour un signal utile présentant une différence de taux de modulation, DDM de 0,093 sont définis comme suit:

- une variation de 7,5 microA du courant de guidage; ou
- l'apparition du drapeau (alarme), selon ce qui se produit en premier



Note 1 – Toutes les cotes sont données par rapport à l'emplacement du radiophare d'alignement de piste ILS.

Note 2 – Pas à l'échelle.

VII. Mesures de Préventions

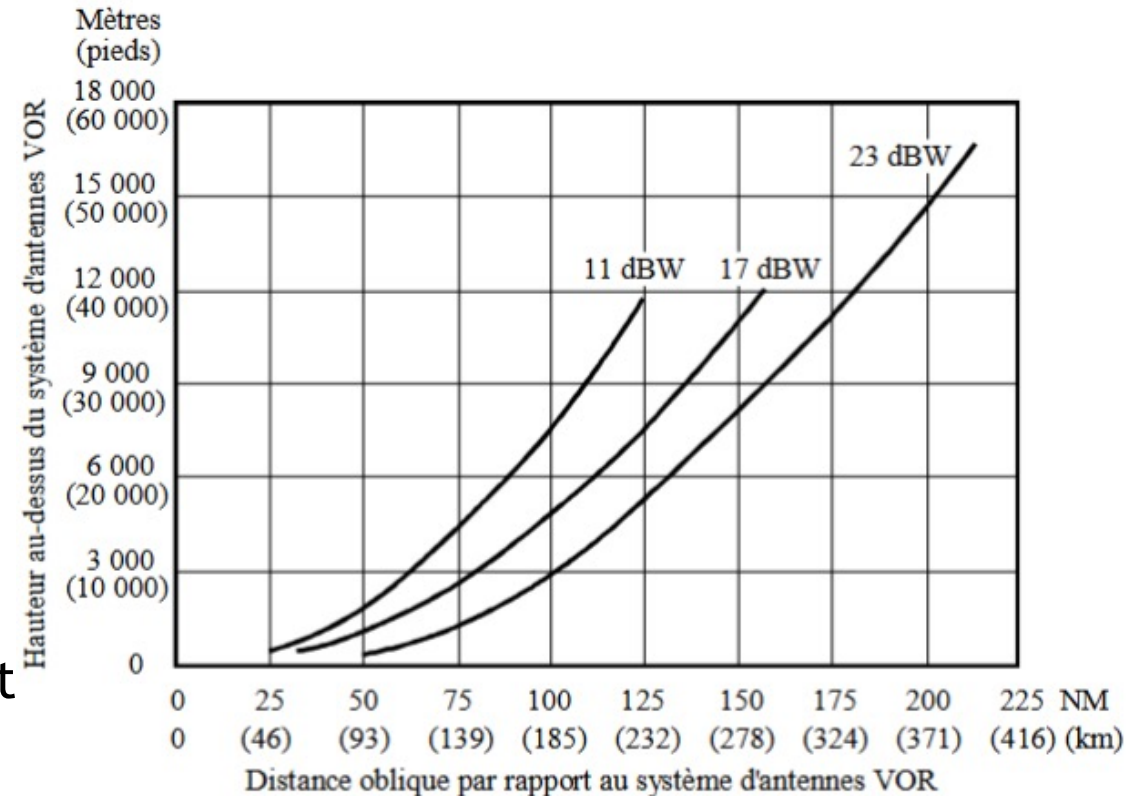
Recommandation SM 1009-1 (3)

La Couverture Opérationnelle Spécifique d'un équipement VOR peut varier d'une installation à l'autre; par exemple, un radiophare VOR d'aéroport peut avoir un rayon de 74 km (40 NM) et un radiophare VOR de croisière («en route») peut avoir un rayon de 370 km (200 NM).

L'intensité de champ minimale à protéger dans toute la COS est de 39 dB($\mu\text{V}/\text{m}$) (90 $\mu\text{V}/\text{m}$)

Les seuils de brouillage en présence d'un signal utile sont définis comme suit:

- une modification de l'indication de relèvement de $0,5^\circ$, qui correspond à une variation de 7,5 μA du courant de guidage; ou
- une modification de 3 dB du niveau de la tension audiofréquence; ou
- l'apparition du drapeau pendant plus de 1 s.



p.a.r. nominale d'émetteur VOR requise pour obtenir une intensité de champ de 39 dB($\mu\text{V}/\text{m}$) (une densité de puissance de $-107 \text{ dB}(\text{W}/\text{m}^2)$) pour diverses distances obliques/hauteurs, avec un réseau d'antennes types situé à 4,9 m (16 pieds) au-dessus du sol.

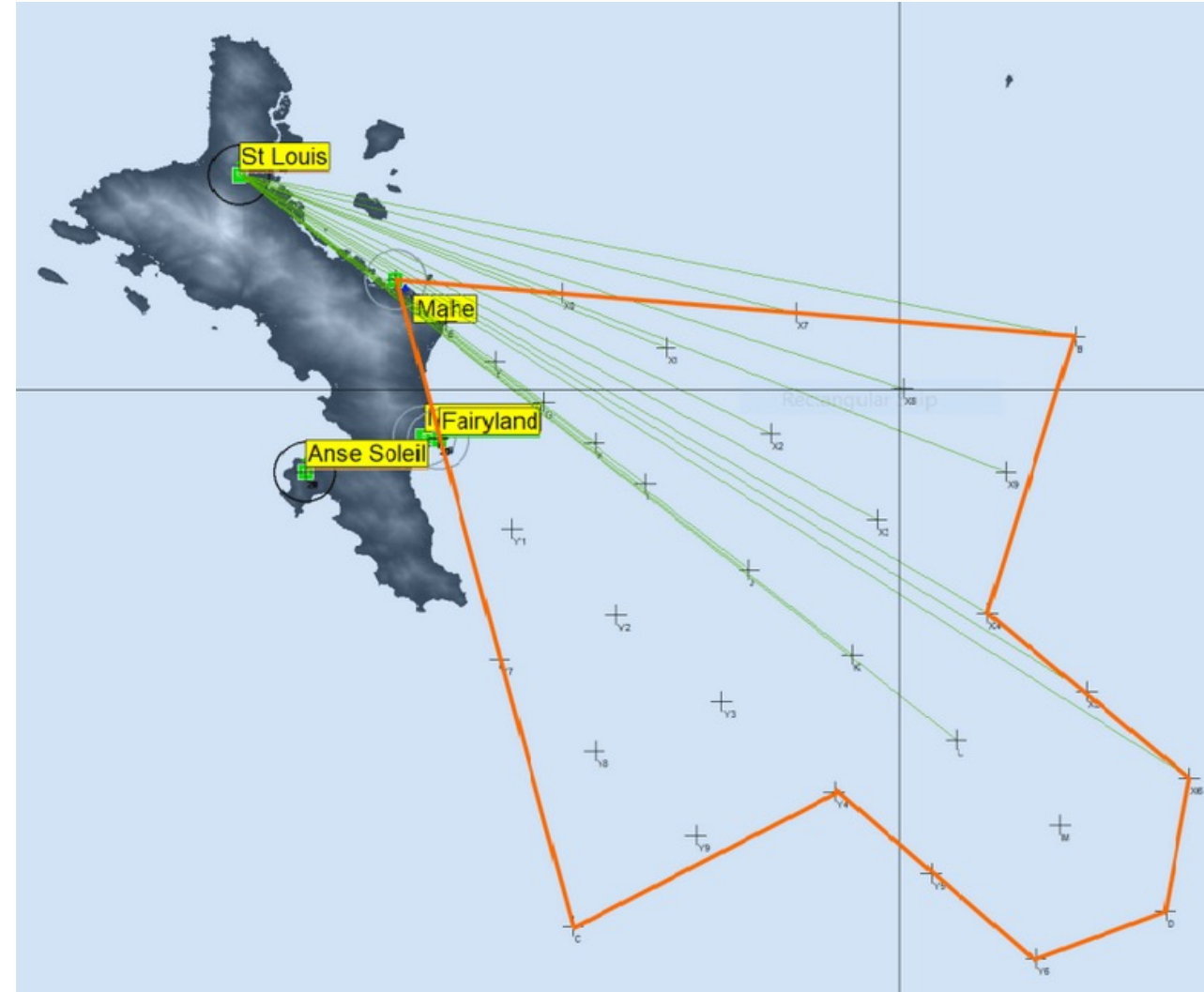
V. Mesures de Préventions

2. Cas du projet de l'Autorité des Télécoms des Seychelles

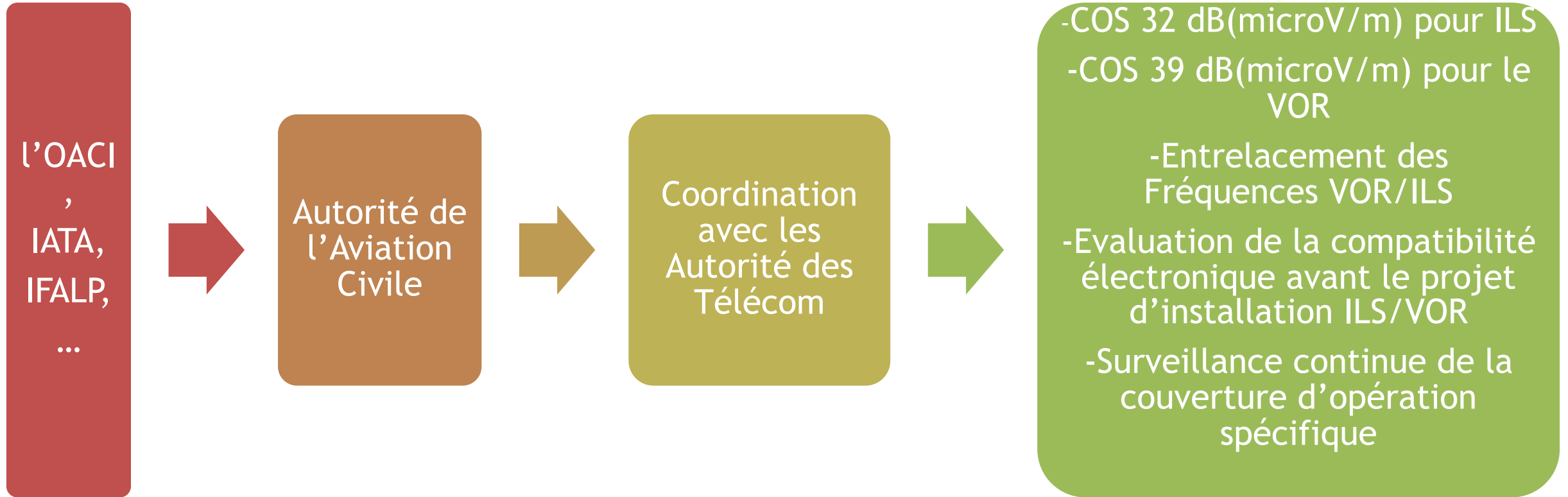
Le projet comprenait quatre étapes, dont :

- L'inspection des sites, les mesures et le monitoring ;
- Détermination de l'étendue des problèmes causés par les émissions non désirées ;
- Recommandations de mesures correctives ;
- Conseil et formation du personnel.

Le projet comprenait des visites de sites pour vérifier les émissions d'un certain nombre de sites de diffusion FM.



V. Mesures de Préventions



- COS 32 dB(microV/m) (40 microV/m) pour ILS
- COS 39 dB(microV/m) (90 microV/m) pour le VOR
- Entrelacement des Fréquences VOR/ILS
- Evaluation de la compatibilité électronique avant la mise en service d'un VOR / ILS
- Surveillance continue de la couverture d'opération spécifique

IV. Principe de fonction d'un ILS

Ce système est sensible aux propagations par trajets multiples (réflexions, diffractions)

Conception

- Régulations
- Introduction des nouvelles techniques

Installation

- Régulations
- Différentes techniques protections contre les brouillages (Site, Câbles, Isolation, Couplage, Filtrage, Puissance...)

Exploitation

- Régulations
- Utilisation et notification des brouillages éventuelles aux autorités compétentes
- Sensibilisation des usagers

Questions

