



Radio navigation et équipements sol :
VOR : Principe, Emission et
Maintenance



Eric SOLER

Table des matières

I.) Généralités.....	3
I.1 Définitions.....	3
I.2 Utilisation.....	3
I.2.1 Sélection d'un VOR.....	3
I.2.2 Principaux types d'utilisation	4
I.2.3 Fonction phonie.....	4
I.2.4 Exemple d'utilisation du VOR dans un avion	5
I.2.5 Couverture, cône de silence	5
II.) Principes du VOR.....	6
II.1 Principe de la définition radioélectrique d'un azimut.....	6
II.2 Définition des canaux de transmission 30 Hz REF et VAR	7
II.3 Synoptique récepteur bord	8
III.) Le VOR C.....	9
III.1 Représentation de la phase des 30 Hz	9
III.2 Transmission du 30 Hz de référence	10
III.2.1 Expression de la sous porteuse modulée en fréquence	10
III.2.2 Expression de la porteuse VHF modulée en amplitude par la sous porteuse.....	11
III.2.3 Représentation graphique du signal 30 Hz REF	11
III.3 Transmission du 30 Hz variable.....	12
III.3.1 Introduction et principe général	12
III.3.2 Transmission du 30 Hz VAR : solution à antennes fixes.....	12
III.4 Transmission de l'indicatif	15
III.5 Rayonnement du signal VOR.....	16
III.5.1 Antennes VOR	16
III.5.2 Rayonnement en site : rôle du contrepois	17
IV.) Le VOR D	20
IV.1 Pourquoi le VOR Doppler ?.....	20
IV.2 Représentation de la phase des 30 Hz	21
IV.3 Rappel du format du signal rayonné par le VOR D.....	21
IV.4 Principe de la génération du signal VOR D	22
IV.4.1 Rappel de l'effet Doppler.....	22
IV.4.2 Analyse du signal à générer	22
IV.4.3 Etude d'une source animée d'un mouvement circulaire uniforme.....	23
IV.5 Problèmes posés par la réalisation pratique	25
V.) Contrôle des VOR	26
V.1 Contrôle au sol	26
V.1.1 Principes.....	26
V.1.2 Courbe d'erreurs en VOR	26
V.2 Contrôle en vol.....	28
V.3 Normes concernant le VOR	30
V.3.1 Caractéristiques radioélectriques (Annexe 10)	30
V.3.2 Dispositifs de contrôle au sol	30

I.) Généralités

I.1 Définitions

Le VOR abréviation de "VHF Omni Range" est le système de navigation en azimut normalisé par l'OACI en 1950.

Le VOR est un repère sol, permettant à un avion équipé pour le recevoir, de connaître l'angle que fait la direction "VOR - avion" avec du nord magnétique passant par la station.

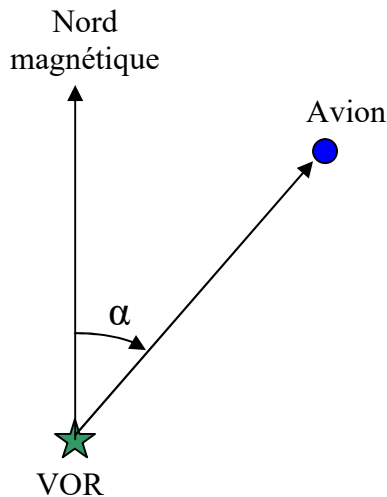


Figure 1 : Définition de l'azimut magnétique

Le VOR définit à un degré près, 360 directions d'azimut comptées positivement dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir de la direction nord magnétique passant par la station qui est prise pour référence ($\alpha = 0$). Chacune de ces demi-droites orientées prend le nom de "radiale" ou "rayon VOR".

I.2 Utilisation

I.2.1 Sélection d'un VOR

Pour un utilisateur, un VOR se caractérise par :

- Une position sur la carte définissant l'origine du repère lié au VOR considéré.
- Sa fréquence d'utilisation permettant de la sélectionner parmi tous les autres.
- Son indicatif qui est un code de 3 lettres au maximum (généralement l'abréviation de la localité la plus proche) et transmis sous forme de signaux morse.

A bord, l'écoute de cet indicatif est le seul moyen de s'assurer que le VOR reçu est bien le VOR désiré et qu'il est en fonctionnement opérationnel.

I.2.2 Principaux types d'utilisation

a) Navigation par jalonnement ou "homing"

L'usage premier et principal du VOR reste la navigation selon une direction radiale constante ("homing"). La navigation VOR d'un aérodrome à un autre consistera à suivre les directions joignant les différents VOR jalonnant la route choisie. Les VOR utilisés dans ce type de navigation sont appelés des "VOR en route".

Il peut être commode de placer des VOR à proximité d'aérodromes afin de faciliter les procédures d'approche. Dans cet usage, le VOR est dit "d'approche".

Les VOR en route ont des fréquences d'utilisation comprises entre 112 et 118 MHz tandis que les fréquences des VOR d'approche se situent dans la bande ILS (108 à 112 MHz).

b) Utilisation du VOR en association avec d'autres types d'aides à la navigation

Si un VOR et un DME (Distance Measuring Equipment : équipement permettant de connaître la distance entre l'avion et la station) sont co-implantés, on dispose directement à bord des coordonnées polaires r et α utilisables manuellement ou automatiquement. La précision de la localisation est celle du DME en distance (erreur inférieure ou égale à la plus grande valeur : ± 0.5 NM ou 3% de la distance) et celle du VOR pour les écarts transverses. La précision d'emploi de celui-ci est de $\pm 5^\circ$ de part et d'autre de la radiale choisie. La précision est donc d'autant meilleure que l'on se rapproche du VOR/DME considéré. Ce qui explique que l'association VOR/DME se justifie surtout pour des usages à très courte distance, par exemple :

- Recalage de navigation après une traversée maritime.
- Point de début de descente à l'entrée d'une région terminale.
- Intersection de routes aériennes importantes.
- Définition d'une trajectoire d'attente.

I.2.3 Fonction phonie

Indépendamment de sa fonction navigation, le VOR peut assurer une fonction de communication. Ceci est possible du fait que les signaux BF modulant la porteuse pour l'élaboration de l'information d'azimut ne sont pas compris dans la bande audio 300-3000 Hz utilisée pour la phonie.

L'utilisation la plus typique de cette fonction est la transmission d'informations météorologiques par les VOR situés à proximité d'aérodromes. Toutefois, cette fonction n'est pas utilisée sur les VOR en France.

I.2.4 Exemple d'utilisation du VOR dans un avion

Il faut souligner que les informations d'azimut VOR reçues à bord sont absolument indépendantes du cap de l'avion.

Dans l'exemple ci-dessous, nous allons étudier les informations du RMI de l'avion (Radio Magnetic Indicator). Nous voyons que l'avion suit le cap 259° et que pour rejoindre le VOR sélectionné il doit suivre le cap 206°.

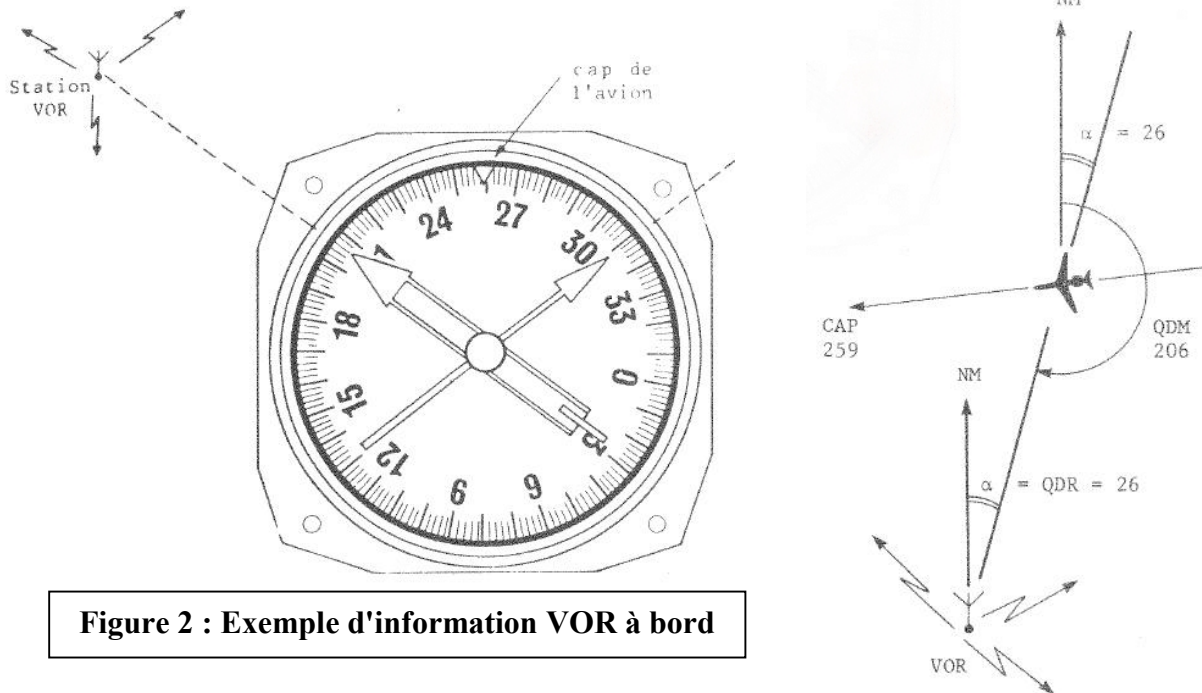


Figure 2 : Exemple d'information VOR à bord

Ce cap à suivre pour rejoindre le VOR est en fait l'information VOR + 180°. En d'autres termes, la queue de l'aiguille indique la radiale VOR sur laquelle se situe l'avion.

Définitions QDM et QDR :

QDM : cap magnétique à suivre pour rejoindre le VOR (par vent nul) qui est donné à partir de la direction du nord magnétique passant par l'avion.

QDR : angle sous lequel le VOR "voit" l'avion qui est donné à partir de la direction du nord magnétique passant par la station.

I.2.5 Couverture, cône de silence

La couverture d'un VOR est le volume d'espace où le signal VOR est correctement reçu et exploitable. Si l'on représente le diagramme de rayonnement dans un plan vertical passant par le VOR, la couverture est obtenue par révolution de ce diagramme autour de l'axe vertical.

Elle est caractérisée par l'absence de signaux aux faibles angles de site et dans toute la zone de l'espace qui a sommairement la forme d'un cône renversé autour de la verticale. Ce volume non exploitable est dit "cône de silence".

L'OACI stipule que l'ouverture de ce cône n'excédera jamais plus de 100°.

II.) Principes du VOR

II.1 Principe de la définition radioélectrique d'un azimut

Le problème posé est celui de la définition radioélectrique d'une grandeur angulaire : l'azimut (variable de 0° à 360°). Or une différence de phase entre deux signaux BF de même fréquence est, elle aussi, une grandeur susceptible de varier entre ces deux mêmes limites. Fondamentalement, le fonctionnement du VOR repose sur la correspondance créée entre l'azimut α et la différence de phase $\Delta\varphi$ de deux même signaux BF transmis dans cette direction. Ce qui se traduit pour toute direction par la relation :

$$0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 360^\circ \Leftrightarrow 0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$$

Pour satisfaire à cette relation, la station sol VOR transmet deux signaux BF de même fréquence, mais de phase différente, par l'intermédiaire d'une porteuse VHF.

Ces deux signaux BF ont une fréquence de 30 Hz.

Le premier, dit "**30 Hz de référence**", est transmis avec une phase instantanée identique dans toutes les directions, soit :

$$\varphi_{\text{Ref}} = \Omega t + \psi_r$$

$$\Omega = 2\pi f \text{ avec } f = 30 \text{ Hz}$$

ψ_r phase à l'origine de φ_{Ref} et indépendant de α

Le second, dit "**30 Hz variable**", est transmis avec une phase instantanée qui est une fonction linéaire de l'azimut, soit :

$$\varphi_{\text{Var}} = \Omega t + \psi_v \pm \alpha$$

$$\Omega = 2\pi f \text{ avec } f = 30 \text{ Hz}$$

ψ_v phase à l'origine de φ_{Var} et indépendant de α

$\alpha = \text{azimut}$

L'OACI impose $\psi_r = \psi_v = 0$ pour $\alpha = 0$. Ce qui veut dire que les deux signaux doivent être émis en phase (ou avoir la même phase à l'origine) dans la direction du nord magnétique ($\alpha = 0$). Cela correspond à la définition OACI du calage de phase initial des deux signaux 30 Hz.

II.2 Définition des canaux de transmission 30 Hz REF et VAR

Les deux signaux à 30 Hz ne diffèrent que par leur phase. On ne peut donc pas les transmettre au moyen du même type de modulation (sauf utilisation de deux porteuses décalées) puisqu'il ne serait pas possible de les séparer au niveau du récepteur.

Par contre, il est possible avec une seule porteuse f d'assurer plusieurs canaux de transmission, sous réserve que les raies du spectre associées à chaque canal soient suffisamment éloignées les unes des autres pour permettre leur séparation par filtrage.

Un signal 30 Hz modulera la porteuse en amplitude (avec un taux de modulation de 30%). Il lui correspondra deux raies spectrales $f+30$ et $f-30$ Hz de part et d'autre de la porteuse f .

L'autre signal 30 Hz est transmis par une modulation de fréquence d'une sous porteuse de fréquence $f_0 = 9960$ Hz. Celle-ci modulera à son tour en amplitude la porteuse f (avec un taux de modulation de 30%). Cette seule modulation d'amplitude se traduit par deux raies $f+9960$ et $f-9960$ Hz de part et d'autre de f . Mais compte tenu de la modulation en fréquence de la sous porteuse, il se rajoute 16 autres raies de part et d'autre de chaque raie à $f+9960$ et $f-9960$, espacées entre elles de 30 Hz. Soit un encombrement spectral de : $2 \times 16 \times 30 = 2 \times 480 = 2\Delta f_0$.

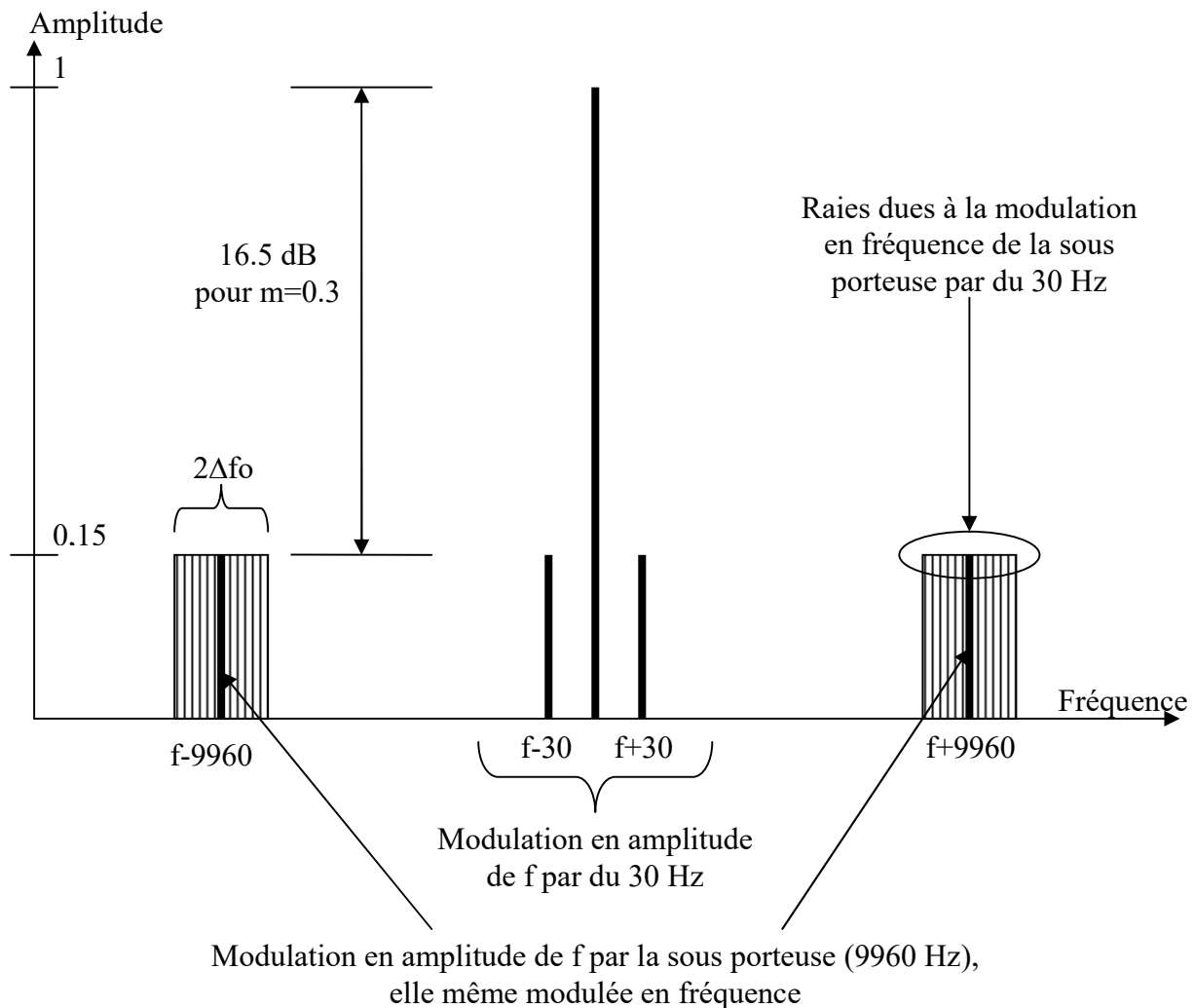


Figure 3 : Occupation spectrale d'un signal VOR

II.3 Synoptique récepteur bord

A bord, après réception du signal, on séparera les deux 30 Hz par une opération de filtrage pour ensuite les comparer en phase.

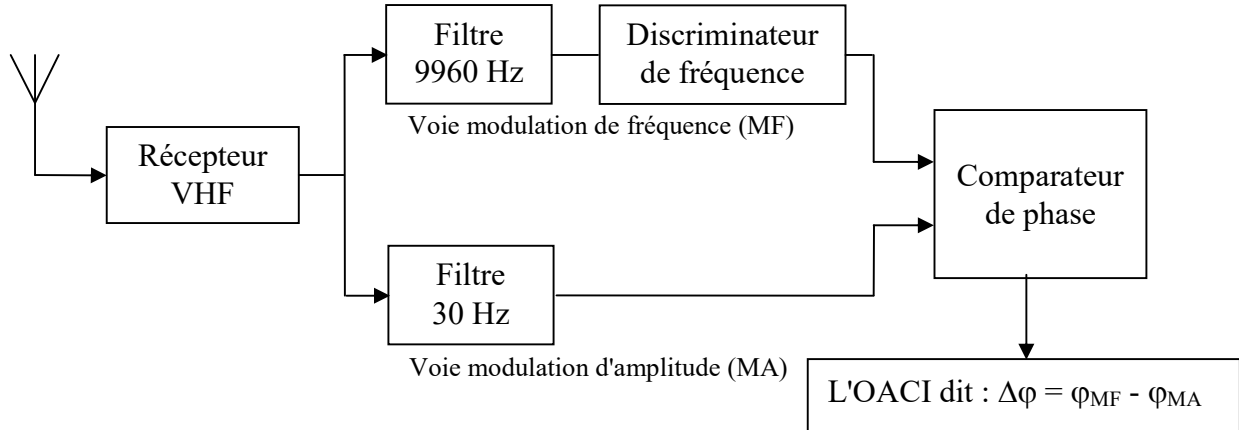


Figure 4 : Synoptique d'un récepteur bord

Avec :

φ_{MF} : phase du signal 30 Hz transmis en modulation de fréquence.

φ_{MA} : phase du signal 30 Hz transmis en modulation d'amplitude.

A partir de là, il existe deux choix possibles :

- 1) Le 30 Hz REF est modulé en fréquence, et le 30 Hz VAR est modulé en amplitude.
=> Nous sommes dans le cas d'un VOR conventionnel (ou VOR C).

$$\Delta\varphi = \varphi_{MF} - \varphi_{MA} \Rightarrow \Delta\varphi = \varphi_{REF} - \varphi_{VAR} \Rightarrow \varphi_{VAR} = \varphi_{REF} - \Delta\varphi$$

$$\varphi_{VAR} = \Omega t - \alpha$$

- 2) Le 30 Hz REF est modulé en amplitude, et le 30Hz VAR est modulé en fréquence.
=> Nous sommes dans le cas d'un VOR Doppler (ou VOR D)

$$\Delta\varphi = \varphi_{MF} - \varphi_{MA} \Rightarrow \Delta\varphi = \varphi_{VAR} - \varphi_{REF} \Rightarrow \varphi_{VAR} = \varphi_{REF} + \Delta\varphi$$

$$\varphi_{VAR} = \Omega t + \alpha$$

III.) Le VOR C



Figure 5 :
le VOR C de Sauveterre

III.1 Représentation de la phase des 30 Hz

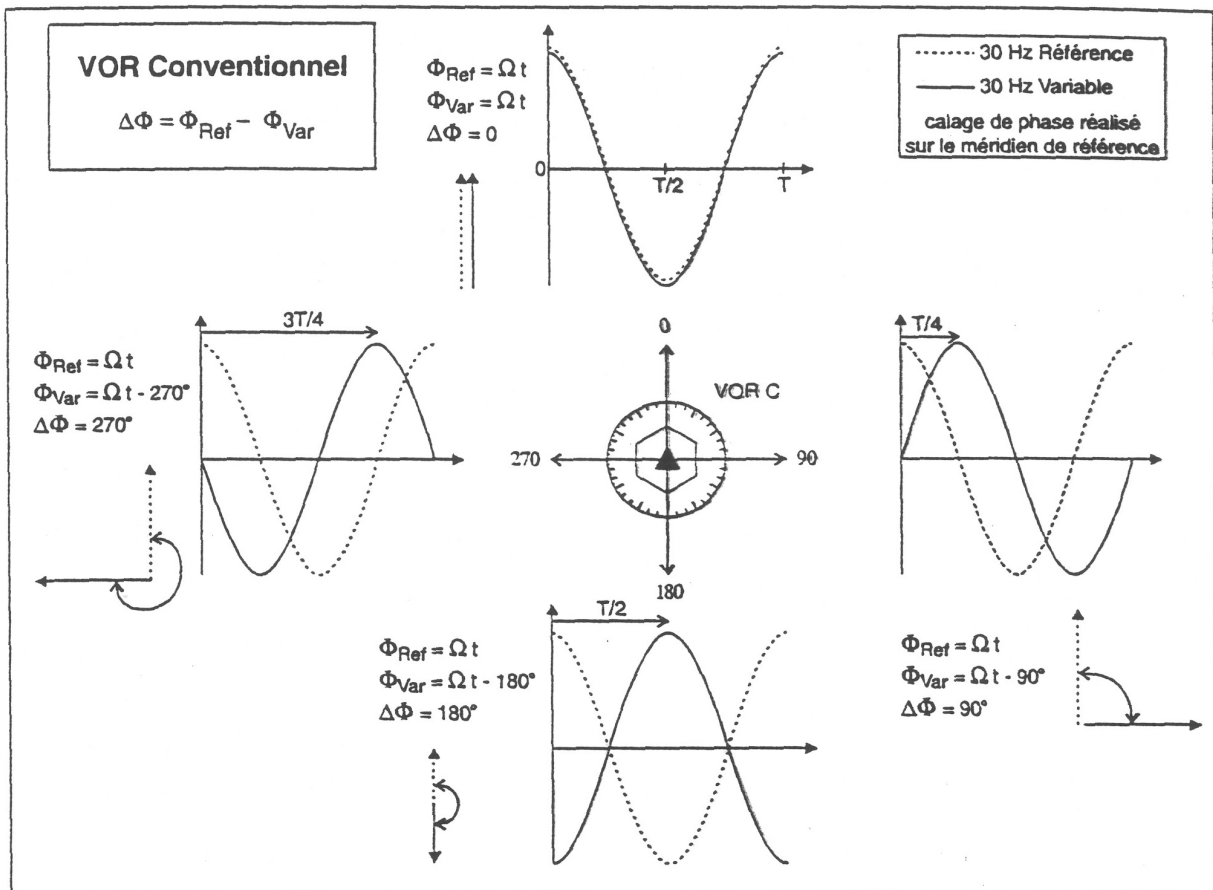


Figure 6 : Phase des 30 Hz en VOR C

III.2 Transmission du 30 Hz de référence

Le 30 Hz de référence est transmis par modulation de fréquence d'une sous porteuse (de fréquence $f_0 = 9960$ Hz) qui module à son tour en amplitude une porteuse VHF.

III.2.1 Expression de la sous porteuse modulée en fréquence

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

$$f_0(t) = f_0 + \Delta f_0 \cdot \cos(\Omega t)$$

Avec f_0 : fréquence nominale de la sous porteuse (9960 Hz)

Ω : pulsation du signal modulant ($2\pi \cdot 30$).

Δf_0 : excursion de fréquence autour de la fréquence f_0 .

$$\Delta f_0 = n \cdot f$$

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

$$\text{D'où : } f_0(t) = 9960 + 480 \cdot \cos(\Omega t)$$

De plus, voici l'expression générale d'un signal modulé en fréquence :

$$e_0(t) = E b_0 \cdot \cos[\psi_0(t)]$$

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

$$\omega_0(t) = \frac{d\psi_0(t)}{dt}$$

$$\text{Avec } \omega_0(t) = \omega_0 + \Delta \omega_0 \cdot \cos(\Omega t) = 2\pi \cdot f_0(t)$$

$$\text{D'où : } \psi_0(t) = \int_0^t \omega_0(u) \cdot du = \int_0^t (\omega_0 + \Delta \omega_0 \cdot \cos(\Omega u)) \cdot du$$

$$\Rightarrow \psi_0(t) = \omega_0 \cdot t + \frac{\Delta \omega_0}{\Omega} \cdot \sin(\Omega t) + cste$$

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

$$\frac{\Delta \omega_0}{\Omega} = \frac{\Delta f_0}{f} = n, \text{ d'où :}$$

$$e_0(t) = E b_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + n \cdot \sin(\Omega t))$$

III.2.2 Expression de la porteuse VHF modulée en amplitude par la sous porteuse

Rappel : expression général d'un signal modulé en amplitude

$$e(t) = [E_p + \mathcal{M}(t)].\cos(\omega t)$$

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

Ici, $\mathcal{M}(t) = e_0(t) = E_{b_0}.\cos(\omega_0.t + n.\sin(\Omega t))$

$$e(t) = [E_p + E_{b_0}.\cos(\omega_0 t + n.\sin(\Omega t))].\cos(\omega t)$$

$$e(t) = E_p.\cos(\omega t).\left[1 + \frac{E_{b_0}}{E_p}.\cos(\omega_0 t + n.\sin(\Omega t))\right]$$

Où $\frac{E_{b_0}}{E_p}$ est le taux de modulation $m_0 = 0,3$.

III.2.3 Représentation graphique du signal 30 Hz REF

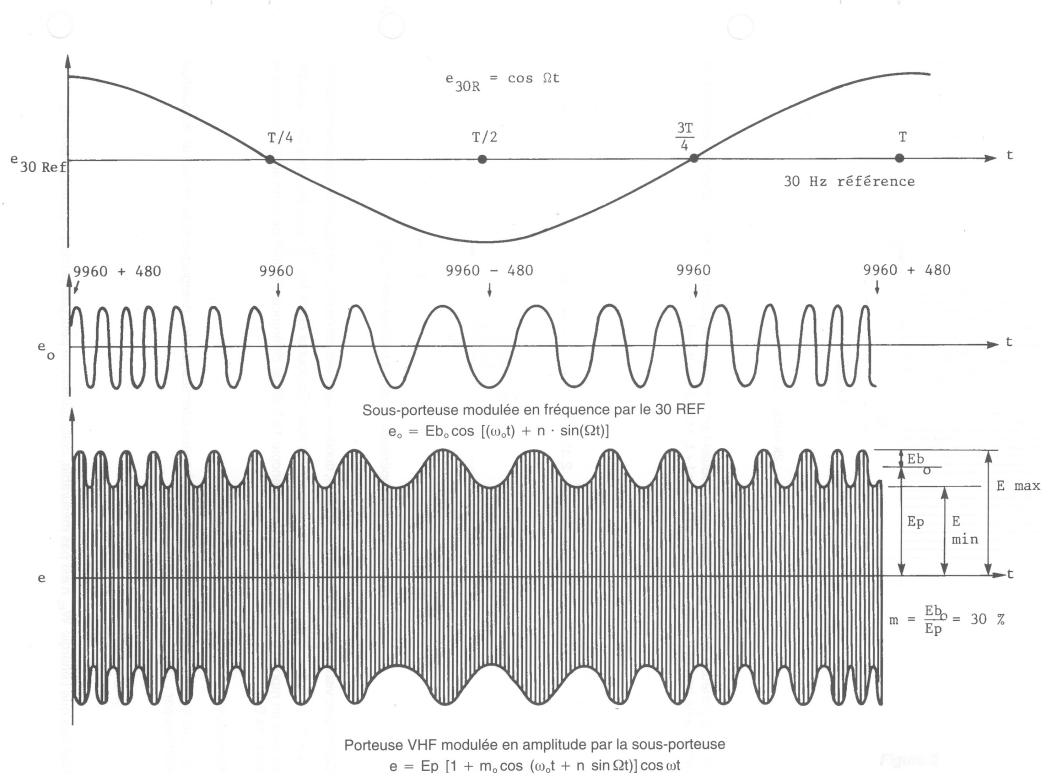


Figure 7 : Représentation du signal 30 Hz REF

III.3 Transmission du 30 Hz variable

III.3.1 Introduction et principe général

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

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

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

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

$$\varepsilon = [1 + m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha)] \cdot \varepsilon_r$$

$$\text{Avec } \varepsilon_r = \frac{E_p}{r} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right) \text{ et } m_1 = 0,3 \text{ (taux de modulation du 30 VAR)}$$

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

III.3.2 Transmission du 30 Hz VAR : solution à antennes fixes

a) Principe

En développant l'expression de ε on obtient :

$$\varepsilon = \varepsilon_r + m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha) \cdot \varepsilon_r = \varepsilon_r + \varepsilon_{\text{BL}}$$

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

L'expression $\varepsilon_{\text{BL}} = m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha) \cdot \varepsilon_r$ s'écrit aussi :
(Formule trigonométrique $\cos(A-B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$)

$$\varepsilon_{\text{BL}} = m_1 \cdot (\cos \Omega t \cdot \cos \alpha + \sin \Omega t \cdot \sin \alpha) \cdot \varepsilon_r = m_1 \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \alpha \cdot \varepsilon_r + m_1 \cdot \sin \Omega t \cdot \sin \alpha \cdot \varepsilon_r = \varepsilon_{\text{BLcos}} + \varepsilon_{\text{BLsin}}$$

On peut donc aussi obtenir le signal ε_{BL} par rayonnement séparé et addition dans l'espace des deux champs $\varepsilon_{\text{BLcos}}$ et $\varepsilon_{\text{BLsin}}$.

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

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

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

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

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

Comment fonctionne un générateur de bandes latérales ?

Grâce aux formules trigonométriques, on peut écrire :

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

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

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

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

Pour obtenir la $BL\cos$, il suffit d'additionner FLS et FLI.

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

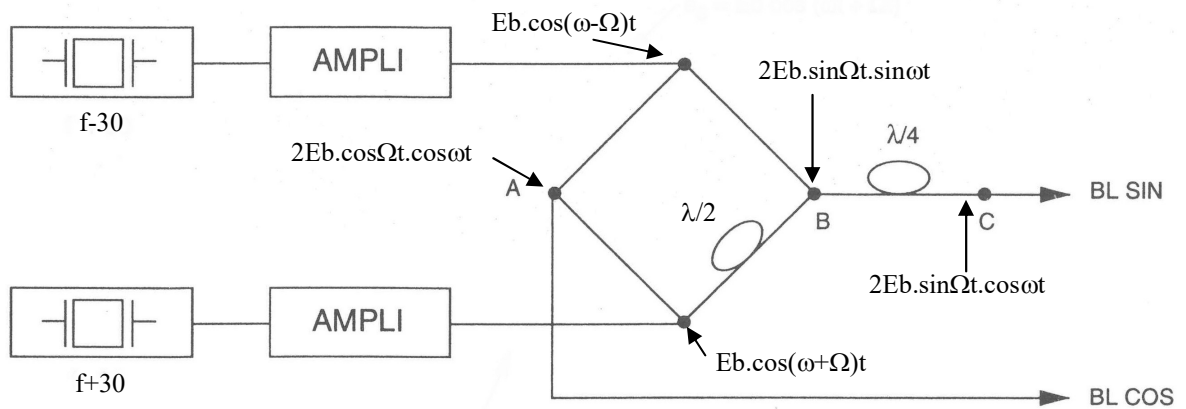


Figure 8 : Génération des bandes latérales

Il faut bien se rendre compte de la difficulté à générer les fréquences $f+30$ et $f-30$ Hz.

Exemple, prenons le VOR C de Cognac : $f = 114,650$ MHz.

$$f + 30 = 114,650030 \text{ MHz}$$

$$f - 30 = 114,649970 \text{ MHz}$$

Ces fréquences sont très proches et le moindre écart viendrait entraîner des erreurs au niveau du signal reçu par le récepteur. La structure de la chaîne d'émission est donc complétée par des systèmes d'asservissement de niveaux, de phase et de fréquence.

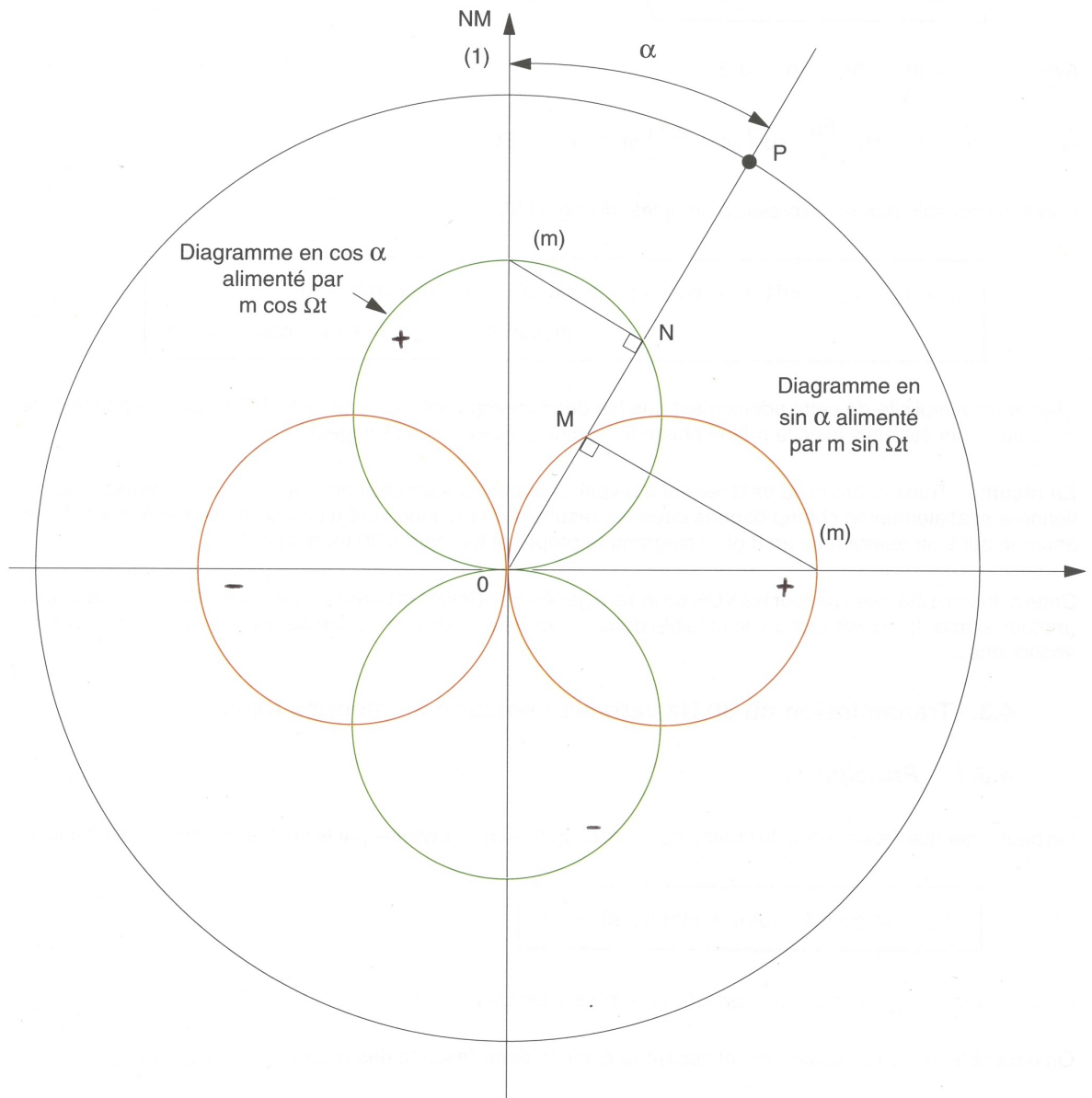


Figure 9 : Rayonnement d'un VOR à antennes fixes

Dans un azimut α , le champ reçu ϵ est tel que $\epsilon = OM + ON + OP$

$$OP = \epsilon_r$$

$$ON = \epsilon_{BL\cos} = m_1 \cdot \cos\Omega t \cdot \cos\alpha \cdot \epsilon_r$$

$$OM = \epsilon_{BL\sin} = m_1 \cdot \sin\Omega t \cdot \sin\alpha \cdot \epsilon_r$$

On a donc bien dans cet azimut α :

$$\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_{BL\cos} + \epsilon_{BL\sin} = \epsilon_r \cdot [1 + m_1 \cdot \cos(\Omega t - \alpha)]$$

b) Orientation réelle des deux diagrammes en huit

Jusqu'ici les deux diagrammes en 8 ont été supposés orientés nord-sud et est-ouest.

Pour des raisons qui n'apparaissent pas évidentes (assurer un contrôle sensiblement identique des deux rayonnements BL aux alentours de la direction du nord magnétique), l'orientation précédente ne correspond pas à l'orientation effective. Celle-ci est obtenue par rotation de $\frac{\pi}{4}$ dans le sens des azimuts décroissants de la figure utilisée jusqu'ici.

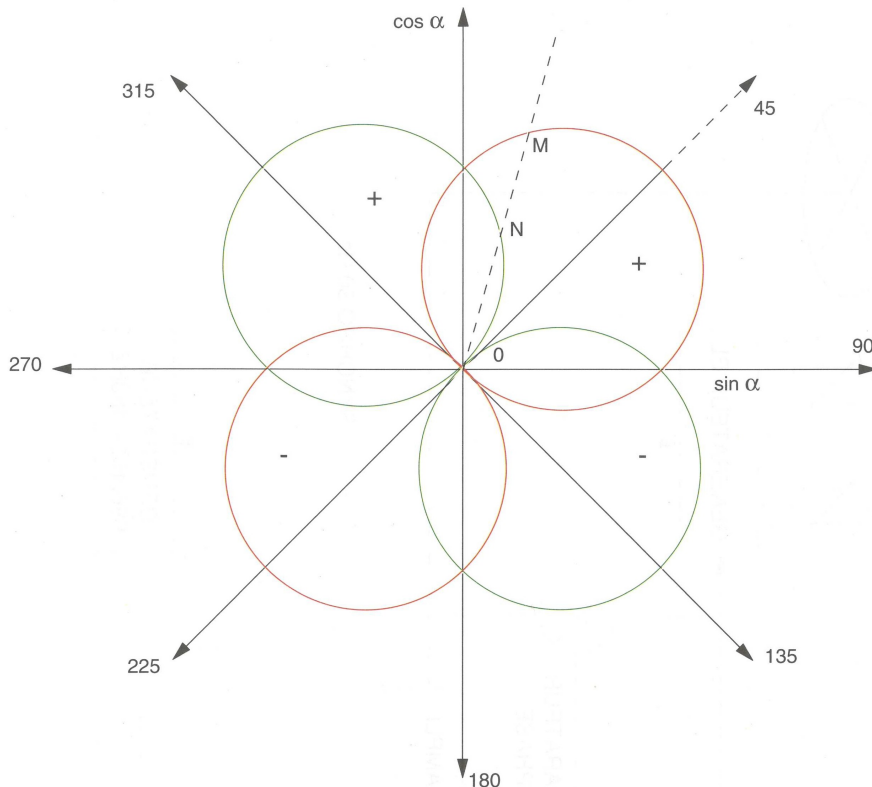


Figure 10 : Rayonnement réel d'un VOR à antennes fixes

III.4 Transmission de l'indicatif

Chaque VOR est obligatoirement caractérisé par un indicatif de 3 lettres au maximum, codé en morse et transmis en modulation A2, c'est à dire en modulant en amplitude la porteuse par une fréquence de 1020 Hz avec un taux de modulation m_3 égal à 10%.

La VHF est donc modulée par la sous porteuse à 9960Hz, par le signal 30 VAR et par l'indicatif. Voici son équation complète (hors phonie) :

$$e_p = E_p \cdot \cos(\omega t) \cdot [1 + m_0 \cos(\omega_0 t + n \cdot \sin(\Omega t)) + m_2 \cos(\Omega t - \alpha) + m_3 \cos(\omega_{1020} t)]$$

III.5 Rayonnement du signal VOR

III.5.1 Antennes VOR

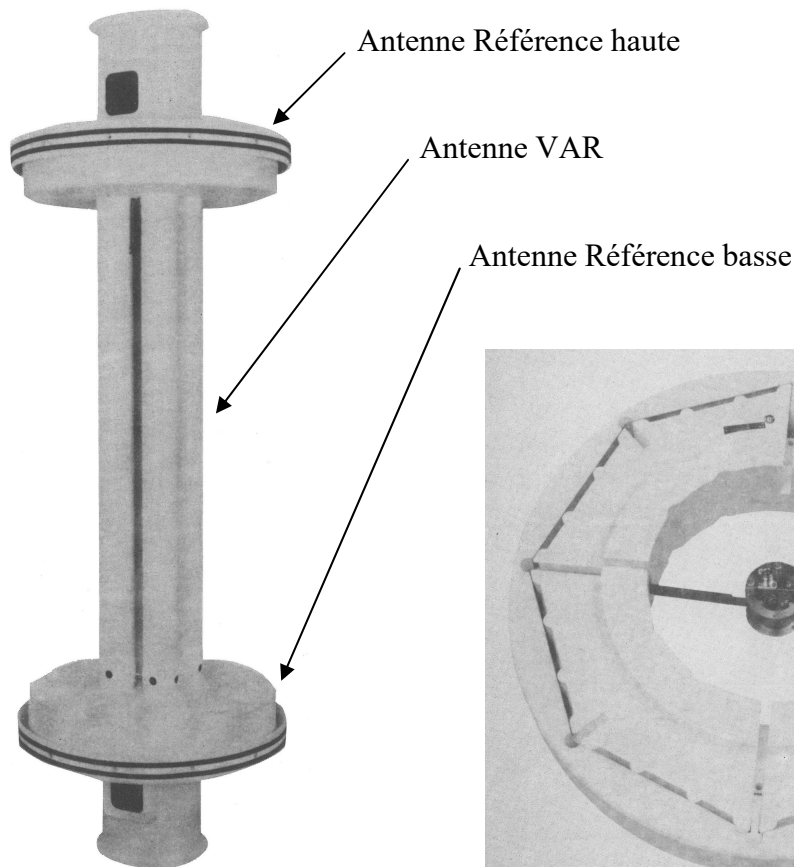


Figure 11 :
Antenne Thomson VOR C

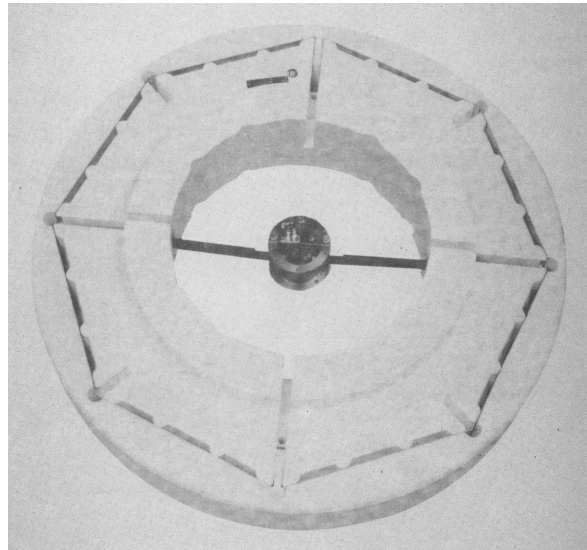


Figure 12 :
Antenne REF

L'antenne référence et l'antenne variable font l'objet de réalisations distinctes et sont mécaniquement superposées.

L'antenne référence est constituée d'une boucle octogonale qui assure une distribution de courant uniforme et permet ainsi de rayonner un diagramme omnidirectionnel en azimut.

L'antenne variable comporte quatre tubes cylindriques disposés aux sommets d'un carré. On appelle rayonnant de base l'association de 2 tubes parallèles, d'une longueur de $\lambda/2$, réglable par un court-circuit mobile (élément de réglage pour bien positionner les nuls d'antennes). Un tel ensemble présente une impédance de 50Ω et a pratiquement le même diagramme de rayonnement dans le plan horizontal qu'un dipôle.

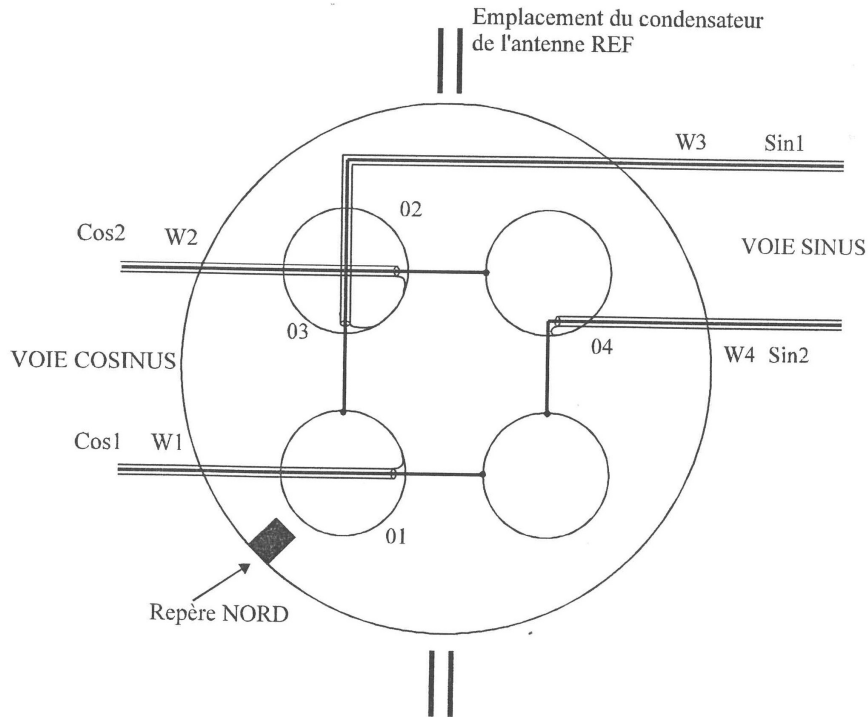


Figure 13 : Alimentation des antennes VAR

Les deux antennes références sont associées à une antenne variable pour obtenir un centre de phase identique.

III.5.2 Rayonnement en site : rôle du contreponds

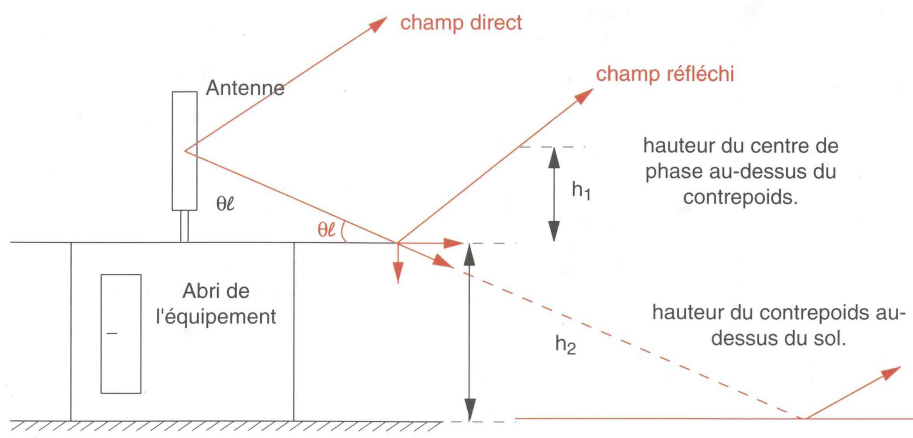


Figure 14 : Rayonnement en site

L'antenne est située au-dessus d'un plan métallique appelé "contre-poids". Le champ reçu au lointain est donc la combinaison de 3 champs émis :

- Le champ issu du trajet direct antenne - récepteur.
- Le champ réfléchi par le contre-poids.
- Le champ réfléchi par le sol.

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

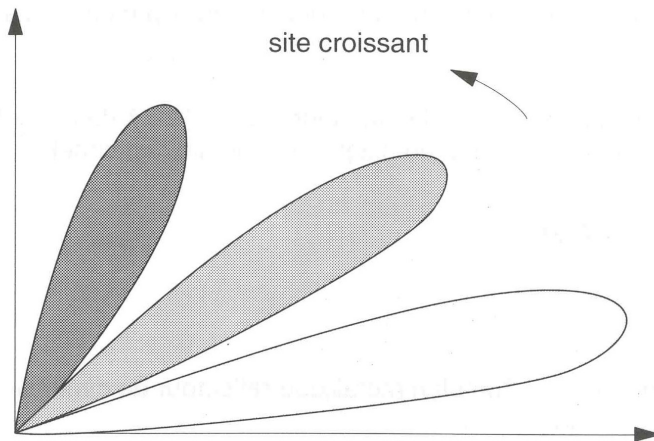


Figure 15 :
Rayonnement sans contre-poids

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

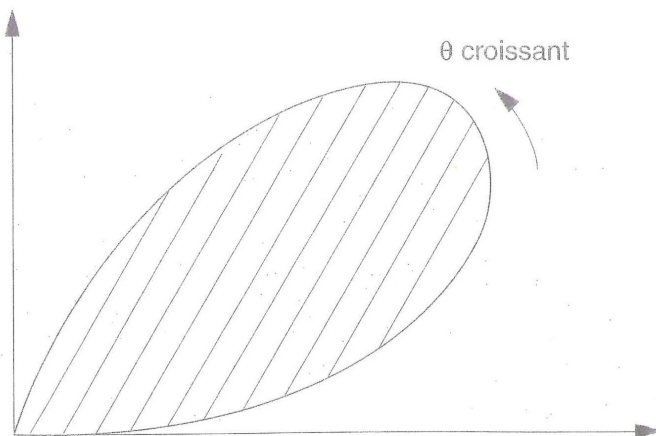


Figure 16 :
Rayonnement avec contre-poids infini

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

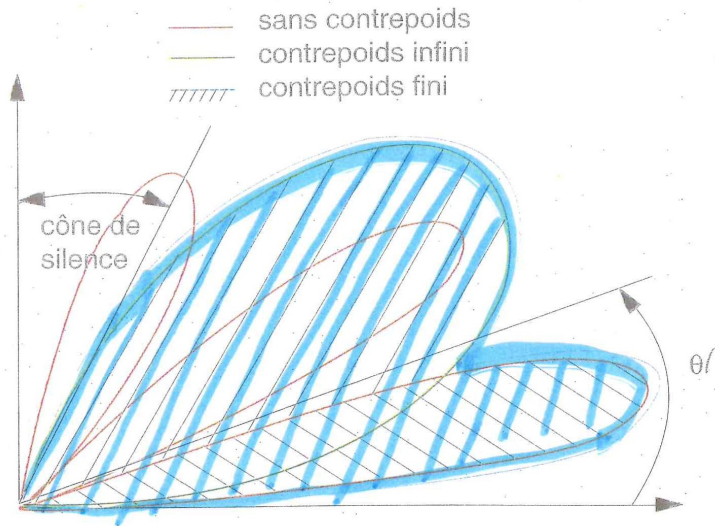


Figure 17 :
Rayonnement avec
contrepois fini

IV.) Le VOR D



Figure 18 : Le VOR D de Biarritz

IV.1 Pourquoi le VOR Doppler ?

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

Si l'on parvient à inverser les rôles, c'est-à-dire transmettre le signal variable porteur de l'information azimut en modulation de fréquence et le signal référence en modulation d'amplitude, l'avantage qui en résulte est une amélioration de la précision du système VOR (de l'ordre de 10). De plus on conserve un format de signal identique à celui rayonné par le VOR C, assurant de ce fait une compatibilité totale du VOR D vis-à-vis d'un récepteur VOR.

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

En conclusion, lorsque l'amplitude des erreurs dues aux obstacles est trop importante et que le choix d'un autre site n'est pas envisageable, alors la sélection du VOR Doppler malgré son coût plus élevé s'impose. Également le VOR D devient un choix privilégié lorsque la structure des radiales revêt une importance particulière (cas des VOR de procédure par exemple). Toutefois, sa robustesse aux multitrajets a des limites. Aussi, le VOR D ne pourra pas être implanté dans tous les cas de figure et il conviendra de respecter certaines normes de dégagement.

IV.2 Représentation de la phase des 30 Hz

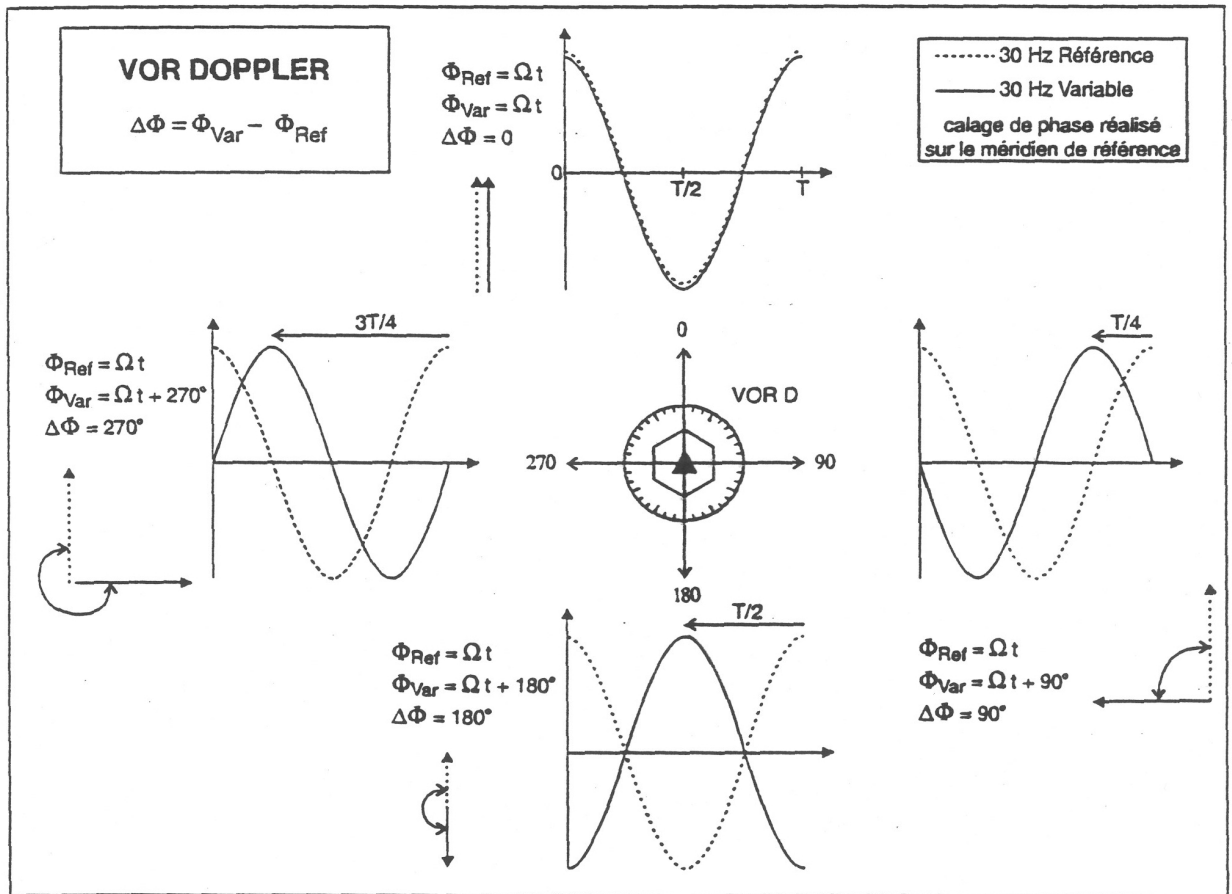


Figure 19 : Phase des 30 Hz en VOR D

IV.3 Rappel du format du signal rayonné par le VOR D

Les spécifications du format du signal VOR Doppler doivent être telles que le signal rayonné par la station soit compatible avec les récepteurs VOR de bord. Ce qui impose deux contraintes sur le signal :

- Le spectre reste identique à celui du VOR C.
- L'information d'azimut du signal n'impose aucun traitement différencié à bord.

Comme nous l'avons déjà vu dans les principes du VOR, le VOR Doppler utilisera les même types de modulation (le 30 Hz REF est modulé en amplitude et le 30Hz VAR est modulé en fréquence) et donc son spectre sera identique à celui du VOR C. De plus, l'information d'azimut d'un récepteur bord est donnée par :

$$\Delta\phi = \phi_{MF} - \phi_{MA} \Rightarrow \Delta\phi = \phi_{VAR} - \phi_{REF} \Rightarrow \phi_{VAR} = \phi_{REF} + \Delta\phi$$

Donc le signal VAR s'écrit :

$$\phi_{VAR} = \Omega t + \alpha$$

IV.4 Principe de la génération du signal VOR D

IV.4.1 Rappel de l'effet Doppler

Le déplacement relatif d'une source par rapport à un récepteur se traduit par un décalage de la fréquence reçue par rapport à celle de la source.

Ce décalage est tel que : $\Delta f = \frac{V_r}{\lambda}$ avec $\lambda = \frac{C}{f_s}$ et $C=3.10^8$ m/s

Où f_s est la fréquence de la source qui se déplace selon la direction V et V_r sa vitesse relative suivant la direction source - récepteur.

La fréquence reçue est : $f_r = f_s + \Delta f$

Attention, Δf peut être positif ou négatif en fonction de l'orientation de V_r .

Si V_r fait en sorte que le récepteur et la source se rapproche, la fréquence reçue augmente, donc Δf est positif.

Si V_r fait en sorte que le récepteur et la source s'éloigne, la fréquence reçue diminue, donc Δf est négatif.

IV.4.2 Analyse du signal à générer

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

$$e(t) = E_p \cdot [1 + m_1 \cdot \cos[\omega_0 t + n \sin(\Omega t + \alpha)] + m_4 \cdot \cos(\Omega t)] \cdot \cos \omega t$$

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

Signal référence : $E_p \cdot \cos \omega t \cdot [1 + m_4 \cdot \cos \Omega t]$

C'est un signal très facile à réaliser, c'est une modulation d'amplitude avec un signal modulant fixe de 30 Hz, émis par une antenne omnidirectionnelle.

Signal VAR : $E_b \cdot \cos \omega t \cdot \cos[\omega_0 t + n \sin(\Omega t + \alpha)]$ Avec $E_b = m_1 \cdot E_p$

Ce signal est une modulation trop complexe pour pouvoir être générée directement. Pour cela, on décompose cette bande latérale en deux composantes, une bande latérale supérieure et inférieure.

$$\frac{1}{2} E_b \cdot \cos[(\omega + \omega_0)t + n \cdot \sin(\Omega t + \alpha)] + \frac{1}{2} E_b \cdot \cos[(\omega - \omega_0)t - n \cdot \sin(\Omega t + \alpha)]$$

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

IV.4.3 Etude d'une source animée d'un mouvement circulaire uniforme

Considérons le schéma suivant d'une antenne omnidirectionnelle S qui tourne sur un cercle de rayon a à une vitesse angulaire constante Ω dans le sens des α négatifs. A un instant donné t la position de l'antenne est définie par l'angle θ ayant pour origine la direction de référence.

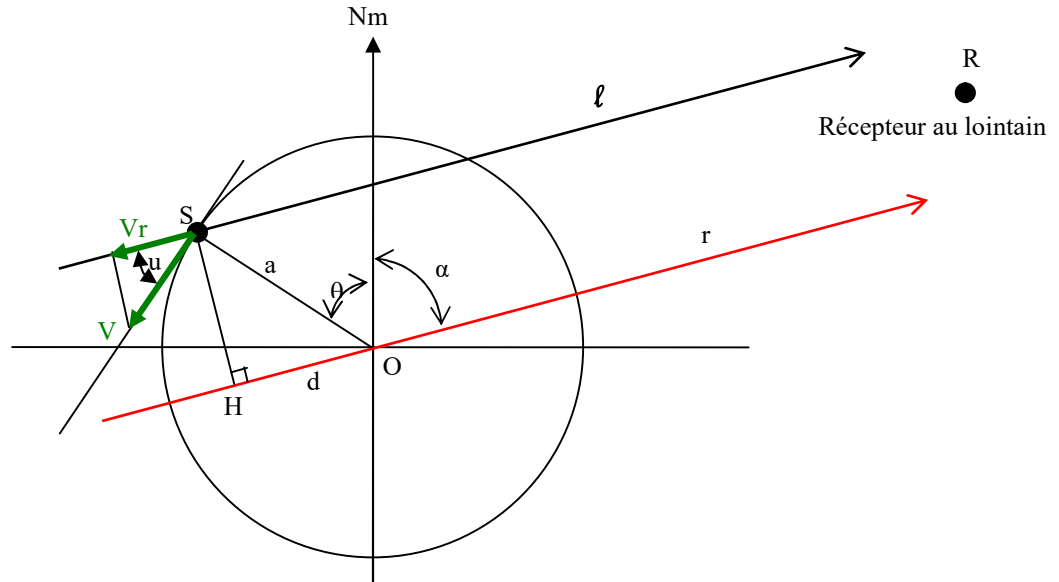


Figure 20 : Etude d'une source animée d'un mouvement circulaire uniforme

Hypothèse ondes planes : le récepteur est au lointain dans l'azimut α et les trajets SR et OR sont parallèles.

Pour l'étude du phénomène, deux approches sont possibles selon que l'on s'intéresse à la fréquence du signal ou à sa phase. Dans le premier cas, il faut évaluer la vitesse de la source par rapport au récepteur. Dans l'autre cas, il faut évaluer la distance source – récepteur.

a) Evaluation de la vitesse source – récepteur : calcul de la fréquence reçue

$$u + \frac{\pi}{2} = \theta + \alpha \Leftrightarrow u = (\Omega t + \alpha) - \frac{\pi}{2}$$

$$Vr = V \cdot \cos(u) \Leftrightarrow Vr = V \cdot \cos\left(\Omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) \Leftrightarrow Vr = V \cdot \sin(\Omega t + \alpha)$$

$$\text{Fréquence : } f(t) = fs + \frac{Vr}{\lambda} \Leftrightarrow f(t) = fs + \frac{V}{\lambda} \sin(\Omega t + \alpha) \text{ avec } V = a \cdot \Omega.$$

L'expression du signal reçu par le récepteur correspond à la modulation de fréquence recherchée, soit une modulation selon une loi sinusoïdale contenant l'information α .

Les valeurs à donner aux paramètres sont par identification :

- $fs = f + f_0 = f + 9960 \text{ Hz}$: fréquence latérale supérieur.
- Vitesse de rotation $\Omega = 2\pi \cdot 30 \text{ (rad/s)}$.
- Excursion en fréquence : $\Delta f = \frac{V}{\lambda}$, et $V = a \cdot \Omega$, soit $\Delta f = \frac{a \cdot \Omega}{\lambda}$.

Noter qu'ici, seul le rayon permet de fixer l'excursion en fréquence $\Delta f = 480 \text{ Hz}$.

Soit $a = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{\Omega}$. Avec λ de l'ordre de 2,65m $\Rightarrow a = 6,75 \text{ m}$

b) Evaluation de la distance source – récepteur : calcul de la phase reçue

On a : $l = r + d$

$$d = a \cdot \cos(\pi - \theta - \alpha) = -a \cdot \cos(\theta + \alpha)$$

$$l = r - a \cdot \cos(\Omega t + \alpha)$$

Le signal reçu au point R à pour expression :

$$S_r(t) = \frac{Eb}{r} \cos(\omega_s t - \frac{2\pi l}{\lambda}) = \frac{Eb}{r} \cos(\omega_s t + \frac{2\pi a}{\lambda} \cos(\Omega t + \alpha) - \frac{2\pi r}{\lambda})$$

Posons $\varphi_0 = \frac{2\pi r}{\lambda}$.

φ_0 représente le déphasage sur le trajet de référence (trajet antenne centrale - récepteur).

L'expression obtenue par cette deuxième approche ($S_r(t)$) est celle d'une modulation angulaire d'une porteuse VHF par un signal sinusoïdal de pulsation Ω et dont la phase varie comme l'azimut α .

La forme de cette expression est identique à celle des bandes latérales uniques que l'on cherchait à générer (voir chap IV.4.2). L'identification terme à terme des deux expressions permettra de dégager les valeurs à donner aux différents paramètres pour satisfaire le format du signal VOR Doppler.

1) Pour générer la bande latérale supérieure : $Eb \cdot \cos[(\omega + \omega_0)t + n \cdot \sin(\Omega t + \alpha)]$

- Fréquence de la source : $f_s = f + f_0$ avec f fréquence de la station et $f_0 = 9960 \text{ Hz}$.

- Vitesse de rotation : $\Omega = 2\pi \cdot 30 \text{ rad/s}$.

- Calage de phase à l'origine du signal modulant : l'identité $n \cdot \sin(\Omega t + \alpha) = n \cdot \cos(\theta + \alpha)$

$\Leftrightarrow n \cdot \cos(\Omega t + \alpha - \pi/2) = n \cdot \cos(\theta + \alpha)$ n'est pas vérifiée pour $\theta = \Omega t$ contrairement aux hypothèses précédentes mais pour $\theta = \Omega t - \pi/2$. Ce qui signifie qu'à l'instant $t=0$, la source doit positionnée dans $\alpha = +90^\circ$. C'est cette opération de calage initial des 30 Hz que les signaux seront reçus en phase par l'avion.

- Phase radioélectrique à l'origine : φ_0 . Cette valeur représente le déphasage sur le trajet de référence. Elle est commune aux trois sources (FLI, FLS et FO). Si elles émettent en phase, alors elles se sommeront en phase dans l'espace. L'écriture peut alors avantageusement se simplifier en prenant φ_0 comme nouvelle origine de phase.

- L'indice de modulation : $n = 2\pi a / \lambda$. Le rayon est le seul paramètre de réglage $a = n\lambda / 2\pi$. Pour des raisons de simplification de la réalisation mécanique, le rayon ne sera pas adapté à la longueur d'onde en vigueur, mais calculé d'après une longueur d'onde moyenne. La bande de fréquence VOR va de 108 à 118 MHz. La fréquence moyenne est de 113 MHz, la longueur d'onde correspondante est : $\lambda = 2,65 \text{ mètres}$, ce qui nous donne pour un indice $n=16$,

un rayon $a=6,75$ mètres. En gardant ce rayon et en l'appliquant aux fréquences extrêmes de la bande (108 et 118 MHz), on obtient une variation de n compris entre 15,3 et 16,7. Ce qui reste tout à fait acceptable car dans les tolérances OACI ($n=16\pm 1$).

2) Pour générer la bande latérale inférieure : $Eb.\cos[(\omega - \omega_0)t - n.\sin(\Omega t + \alpha)]$

- Fréquence de la source : $f_s = f - f_0$ avec f fréquence de la station et $f_0 = 9960$ Hz.

- Calage de phase à l'origine : $-n.\sin(\Omega t + \alpha) = n.\cos(\theta + \alpha)$

$$\Leftrightarrow -n.\cos(\Omega t + \alpha - \pi/2) = n.\cos(\theta + \alpha) \Leftrightarrow n.\cos(\Omega t + \alpha - \pi/2 + \pi) = n.\cos(\theta + \alpha)$$

Soit $\theta = \Omega t + \pi/2$, obtenu en positionnant la source à l'instant $t=0$ dans $\alpha = +270^\circ$. Ce qui veut dire que cette source est diamétralement opposée à la source qui génère la bande latérale supérieure. Les deux sources tournent à la même vitesse.

- Les autres paramètres (Ω, φ_0, n) sont identiques à l'autre source.

IV.5 Problèmes posés par la réalisation pratique

A cause de ses dimensions ($a = 6,75\text{m}$), les vitesses mises en jeu ($v = 6,75 \times 2\pi \times 30 = 1272$ m/s ou 4570 km/h), une rotation mécanique des sources n'est pas envisageable. Il sera donc choisi une rotation électronique, obtenue par commutation successive d'antennes fixes réparties régulièrement sur la circonférence du cercle de 13,5m de diamètre. Le choix de Thomson s'est porté sur 48 antennes, ce qui est à peu près le maximum d'antennes possibles sur cette circonférence (c'est également le choix d'autres constructeurs).

Il faut commuter 48 antennes tous les $1/30$ de seconde, soit un temps de $1/(48 \times 30) = 1/1440$ seconde par antenne (environ toutes les 0.7 milliseconde).

Les antennes sont disposées régulièrement tous les $2\pi/48$ (soit $7,5^\circ$), le sens croissant de numérotation des antennes est celui du sens simulé et l'antenne 1 est à proximité immédiate de la direction de référence. Par construction, la direction de référence passe entre les antennes 1 et 48.

V.) Contrôle des VOR

Pour garantir à l'utilisateur que le VOR est d'une précision d'emploi suffisante, il est associé au système un certain nombre de contrôles à caractères permanents et périodiques.

V.1 Contrôle au sol

V.1.1 Principes

Il revient à contrôler les performances de l'équipement sol donc à évaluer les erreurs intrinsèques du VOR.

Un contrôle permanent est assuré par deux détecteurs (un placé aux environs du nord magnétique et l'autre soit à l'opposé soit à 90°). Nous verrons par la suite ce qu'il doit surveiller.

En cas de fonctionnement hors tolérances, il y a déclenchement d'une alarme qui provoque le basculement sur l'ensemble secours (si ce dernier est présent) ou l'arrêt de la station.

Un contrôle périodique (opération de maintenance) consiste à vérifier et régler les informations VOR émises par la station : mesure des alimentations et de la puissance, des antennes, réglages de la voie REF et VAR, contrôle des moniteurs ...

Les résultats de ce contrôle se matérialisent entre autre par une courbe donnant l'erreur en fonction de l'azimut appelée "courbe d'erreurs". On distingue deux types d'erreur.

- Les erreurs systématiques qui sont des erreurs inévitables et liées à la conception même de la station. Dans notre cas, il s'agira de diagrammes de rayonnement imparfaits.

- Les erreurs de réglages et de dérives : le bon fonctionnement du VOR dépend d'un certain nombre de paramètres et de réglages associés. De plus l'évolution de ces réglages dans le temps introduit des erreurs de dérive qui peuvent provoquer une information d'azimut erronée.

V.1.2 Courbe d'erreurs en VOR

Au sol, cette courbe ne peut s'effectuer qu'en VOR C, car l'antenne est montée sur un pied pivotant, permettant de faire tourner celle-ci de 360° . On peut connaître l'orientation de l'antenne grâce à un système de vernier apposé sur le mât pivotant (pour le VOR Doppler, cette courbe ne peut être effectuée que par l'avion de calibration en vol).

On branche un récepteur VOR sur un capteur, et tous les 45° on regarde la différence entre la valeur mesurée de l'azimut par le récepteur, et la valeur théorique de l'azimut considéré.

La courbe se présente de la façon suivante :

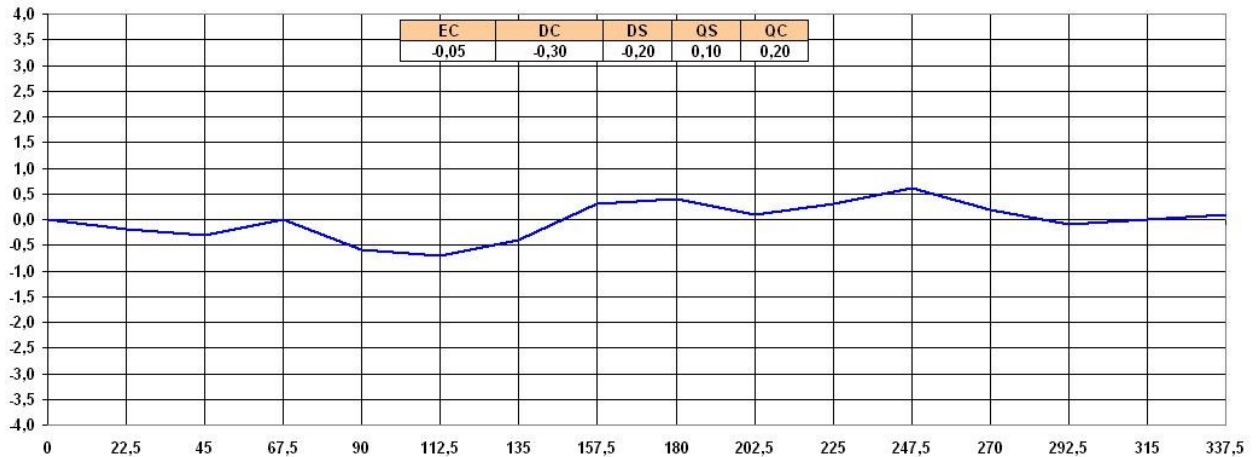


Figure 21 : Courbe d'erreurs du VOR C de Sauveterre 2011

Cette courbe permet le calcul des différentes erreurs VOR. Chacune de ces erreurs traduit un défaut de conception ou de réglage de la station.

L'erreur constante est la moyenne de toutes les erreurs mesurées sur l'ensemble de la rose. Elle traduit un défaut de calage de l'antenne par rapport au nord magnétique et/ou un défaut de calage BF entre le 30 Hz REF et VAR.

L'erreur d'antenne sinus et d'antenne cosinus présentent 2 maxima et ont pour origine un mauvais alignement des nuls de champ de l'antenne sinus et/ou de l'antenne cosinus. Cela est dû à un déséquilibre du courant d'alimentation d'une des paires de fentes de l'antenne. Celles-ci génèrent ainsi un diagramme avec 2 lobes dissymétriques, entraînant une déviation des nuls de champ. L'annulation de ce phénomène peut être obtenue en agissant avec une faible amplitude sur les courts-circuits de réglage des deux fentes opposées qui constituent l'antenne sinus ou cosinus.

L'erreur quadrantale cardinale présente quatre maxima dans les points cardinaux et provient d'un déséquilibre d'amplitude entre les diagrammes cosinus et sinus. Cette erreur peut avoir plusieurs causes :

- 1) des ROS d'antenne VAR inégaux.
- 2) A la réception, les signaux porteuse et BL sinus ou porteuse et BL cosinus ont des phases VHF différentes.
- 3) Une inégalité des amplitudes des signaux BL sinus et cosinus en sortie de la baie.

La correction se fera en ajustant les trois paramètres dans l'ordre ci-dessus.

L'erreur quadrantale semi-cardinale présente quatre maxima dans les points semi-cardinaux. On distingue deux types d'erreur quadrantale semi-cardinale :

- 1) L'erreur quadrantale semi-cardinale antenne qui est due à l'antenne. Elle a pour origine une mauvaise quadrature des diagrammes des antennes VAR (nuls de champ non orthogonaux). Seule la construction de l'antenne peut être mise en cause et son remplacement doit être envisagé en présence d'une erreur trop importante ($>0,5^\circ$).
- 2) L'erreur quadrantale semi-cardinale BF qui a pour cause la non orthogonalité des axes BF, c'est-à-dire des enveloppes BF des BL sinus et cosinus. L'anomalie ne peut provenir que d'un défaut du système de génération des bandes latérales.

La courbe d'erreurs donne une valeur de l'erreur quadrantale semi-cardinale globale qui la somme des deux erreurs quadrantales semi-cardinales précédentes.

On déduit les différentes erreurs de la courbe d'erreurs par les formules suivantes :

$$\text{Erreur constante : } E_C = \frac{\sum \varepsilon_N}{N}$$

$$\text{Erreur duantale cosinus : } D_C = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{225^\circ}}{2}$$

$$\text{Erreur duantale sinus : } D_S = \frac{\varepsilon_{135^\circ} - \varepsilon_{315^\circ}}{2}$$

$$\text{Erreur quadrantale cardinale : } Q_C = \frac{\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ} + \varepsilon_{180^\circ} - \varepsilon_{270^\circ}}{4}$$

$$\text{Erreur quadrantale semi-cardinale : } Q_S = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{135^\circ} + \varepsilon_{225^\circ} - \varepsilon_{315^\circ}}{4}$$

V.2 Contrôle en vol

Les mesures au sol ne permettent pas d'apprécier les performances de l'équipement dans les conditions réelles d'utilisation. Seul un contrôle en vol permet d'évaluer l'ensemble de la chaîne d'équipement sol et du segment de propagation (permet de prendre en compte les erreurs de multitrajets dus à la réflexion des signaux sur des obstacles).

On pourra alors mesurer :

- Des courbes d'erreur en vol.
- Des structures d'axe radial.
- Le cône de silence.
- Les différents paramètres radioélectriques (taux de modulation, indicatif ...).

Les contrôles en vol sont effectués par la DGAC par un service spécialisé au sein de la DTI (Direction de la Technique et de l'Innovation) à Toulouse. Pour cela, la DTI possède trois avions spécialement équipés (1 ATR 42 et 2 Beech 200).



Figure 21 : ATR 42 du contrôle en vol

Ces avions sont pilotés par des équipages du SEFA (Service d'Exploitation de la Formation Aéronautique) spécialement formés aux vols de calibration. A bord se trouve un ingénieur de calibration pour relever les différents paramètres.

Les activités du contrôle en vol sont de deux types :

a) Calibration des VOR

Il s'agit du relevé de l'ensemble des performances du système pour vérifier la conformité avec les normes lors d'une mise en service. Ce type de contrôle en vol se fait avec une référence de localisation obtenue avec un système GPS différentiel.

b) Inspection périodique des VOR

Cette inspection a lieu une fois par an et est dite "campagne Haute Altitude". Elle consiste en la vérification de la bonne tenue des performances dans le temps. En France, ces inspections sont effectuées au cours d'une campagne appelée SAVVAN : Système Automatique de Vérification en Vol des aides à la Navigation.

Après un léger lissage de la courbe d'erreur, celle-ci devra satisfaire aux conditions ci-dessous :

- Erreur moyenne comprise entre -1° et $+1^\circ$.
- Erreur minimale : supérieur ou égale en valeur relative à l'erreur moyenne moins 2° .
- Erreur maximale : inférieur ou égale en valeur relative à l'erreur moyenne plus 2° .

Tout dépassement devra entraîner une intervention sur l'équipement.

V.3 Normes concernant le VOR

Le VOR, moyen de radionavigation courte et moyenne distance normalisé par l'OACI et défini de façon précise par l'Annexe 10. Il est complété par le document appelé PROMESS VOR (PROcédure de Mise En Service et de Suivi des stations sol VOR). Le premier document est international et fixe l'ensemble des caractéristiques radioélectriques alors que le second décrit les méthodes de réglage, les cadences de maintenance, les normes à appliquer en France... C'est un document élaboré par la France qui présente les procédures utilisées par la DSNA (Direction des Services de la Navigation Aérienne) comme moyen de conformité au regard des exigences réglementaires (arrêté du 05 décembre 2008 relatif à la mise en service et au suivi des VOR). Il permet de démontrer aux autorités de surveillance comment la France respecte les normes issues de l'annexe 10.

V.3.1 Caractéristiques radioélectriques (Annexe 10)

Exemples de normes les plus importantes :

Fréquence : bande 111,975 MHz à 117,975 MHz. Utilisation possible dans la bande ILS (108 à 111.975 MHz) sous réserve de n'assurer qu'une couverture limitée et de ne pas provoquer de brouillage ILS.

Espacement des canaux : 50 kHz.

Tolérance sur la porteuse : 0,002%.

Polarisation : émission en polarisation horizontale. L'influence d'une polarisation verticale résiduelle sur la précision sera déterminée par des essais en vol.

Précision : $\pm 2^\circ$ pour tous les angles de site compris entre 0° et 40° du centre du réseau d'antennes.

Couverture : la limite de portée utile se définit pour un signal reçu de $90 \mu\text{V/m}$ ou -107 dBW/m^2 .

Identification : émission en code morse international d'un indicatif de 2 ou 3 lettres. Le taux de modulation est de 10%.

Cône de silence : il n'excèdera jamais plus de 100° .

Indice de modulation : $n = 16 \pm 1$.

V.3.2 Dispositifs de contrôle au sol

Un dispositif de contrôle automatique interrompra les modulations des signaux de navigation ou le rayonnement et transmettra une signalisation à distance pour :

- Un décalage de l'information d'azimut supérieur à 1° à l'endroit du détecteur.
- Une baisse de plus de 15% du niveau du signal "30 VAR" et "30 REF".
- Une baisse de 2 dB de la puissance de la porteuse.
- Une absence ou chute de plus de 50% du niveau de modulation de l'indicatif.
- Une panne du dispositif de contrôle.