

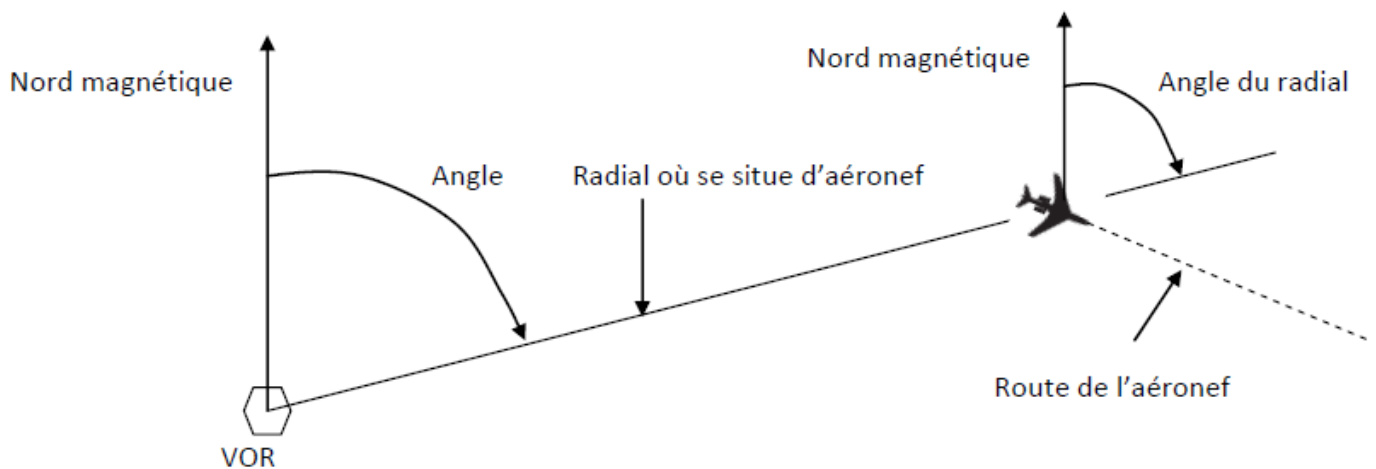
Théorie du fonctionnement du VOR

1. Introduction

Le VOR (abréviation de VHF Omnidirectional Range) est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne, depuis 1947 et fonctionnant, comme son nom l'indique, avec les fréquences de la bande VHF.

Un récepteur de navigation VOR (NAV-COM), permet de déterminer le relèvement magnétique d'un aéronef par rapport à une station radioélectrique au sol (balise émetteur VOR), dont la position est connue.

Le relèvement magnétique d'un aéronef par rapport à un VOR s'exprime par le rayon issu du VOR, sur lequel l'aéronef se trouve. Chaque rayon issu de la balise est appelé un RADIAL.



Chaque radial est nommé par l'angle qu'il forme en relation avec le nord magnétique. Cet angle était appelé QDR (appellation qui n'est plus utilisée).

Ainsi, le radial orienté (depuis la balise) :

- Plein EST sera le 090° ;
- Plein SUD sera le 180° ;
- Plein OUEST sera le 270° ;
- Plein NORD sera le 360° (on ne dit pas le radial 0°).

Un VOR n'indique toujours qu'un radial en éloignement. Il ne faut donc pas confondre le radial où se situe l'aéronef avec la route (cap) suivie par l'aéronef.

La route suivie par un aéronef (course), vers la balise et en référence au nord magnétique, s'appelait autrefois le QDM. Le QDM est l'opposé à 180° du QDR, qui est la course venant de la balise.

Depuis plusieurs années déjà, QDR et QDM ne sont plus employés. Les termes « radial en rapprochement » ou « radial en éloignement » sont préférés, afin, principalement, d'éviter les nombreuses confusions dans la réalisation des clairances. Pour plus de précisions, reportez-vous au paragraphe 5.6. du présent document.

Les avantages du VOR :

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

Les inconvénients du VOR :

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

2. Station au sol

2.1 Type de VOR

Les VOR sont implantés à des points stratégiques, en campagne pour la navigation en croisière et à proximité des aérodromes principaux, pour le guidage sur certaines approches IFR.

On rencontre donc deux types de VOR :

- Le VOR en-route a une puissance moyenne de 200 Watts et transmet sur des fréquences comprises entre 108,00 MHz et 117,95 MHz, avec des canaux espacés de 25kHz. Le rayon d'action est approximativement de 200 nm ;
- Le VOR Terminal (appelé aussi T-VOR) des aérodromes émet avec une puissance de 50 Watts environ, sur des fréquences comprises entre 108,00 MHz à 111,85 MHz dont la première décimale est paire, avec des canaux au pas de 25kHz (Ex : 108,00 MHz, 108,25 MHz). Il a une portée plus limitée, de l'ordre de seulement 40 à 50 nm (du fait, déjà, de la puissance plus faible, mais aussi du positionnement, pas forcément optimal, pour une

réception à longue distance).

2.2 Fonctionnement

Un émetteur VOR transmet une information spécifique pour chaque degré d'azimut de son rayonnement.

Pour ce faire, il émet, simultanément, deux informations distinctes :

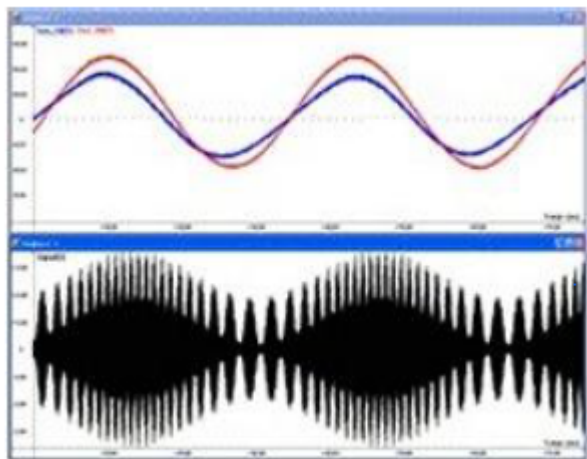
- Un premier signal de 30 Hz, omnidirectionnel, qui sert de référence ;
- Un second signal de 30 Hz, dit variable, qui est émis par une antenne directionnelle, tournant en permanence sur elle-même.

Imaginez une antenne directionnelle, qui rayonne une simple porteuse en tournant sur elle même. Un récepteur distant va alors percevoir un signal maximum quand l'antenne pointera exactement vers lui et le signal diminuera, pour atteindre un minimum, quand l'antenne lui tournera le dos. Si l'antenne tourne à 1800 tours par minute, il y aura 30 variations chaque seconde. C'est ainsi que le simple fait de faire tourner l'antenne, produit une modulation d'amplitude (AM) de 30 Hz, dont les maxima d'amplitude (et donc, la phase) seront toujours fonction de l'orientation de l'antenne. C'est le signal VAR.

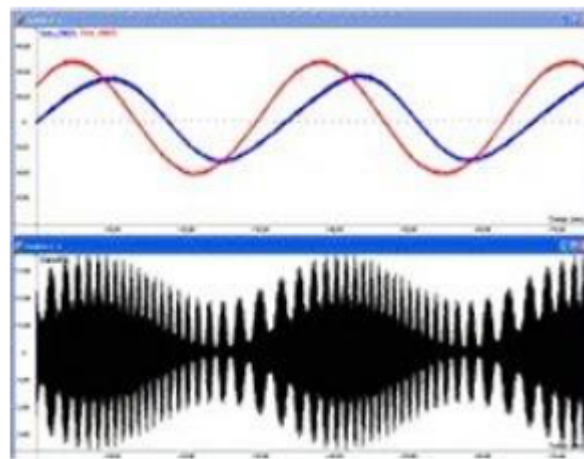
Un second signal de 30 Hz, fixe et stable, est émis avec la même force dans toutes les directions par une autre antenne. Il sert de référence et permet de faire une comparaison de phase avec le signal variable. Cette phase est alors l'image directe du gisement de l'aéronef vu par la balise. Elle peut évoluer de 0 ° à 360 °. Les modulations et la rotation du diagramme sont ajustées de sorte que le déphasage soit nul pour un aéronef situé exactement au nord magnétique de la station.

Cependant, il n'est pas possible de moduler directement deux fréquences identiques sur une même porteuse. Le récepteur serait incapable de différencier l'une de l'autre. Pour que ça fonctionne, on va moduler une sous-porteuse de 9960 Hz par cet autre signal de 30 Hz en modulation de fréquence (FM), qui, à son tour, modulera alors la porteuse VHF en modulation d'amplitude (AM). On se retrouve alors avec une porteuse VHF, modulée en amplitude par un premier signal de 30Hz (donc "contenant" ce signal), puis, par un second de 9960 Hz, ce dernier encapsulant le second signal de 30 Hz, en modulation de fréquence.

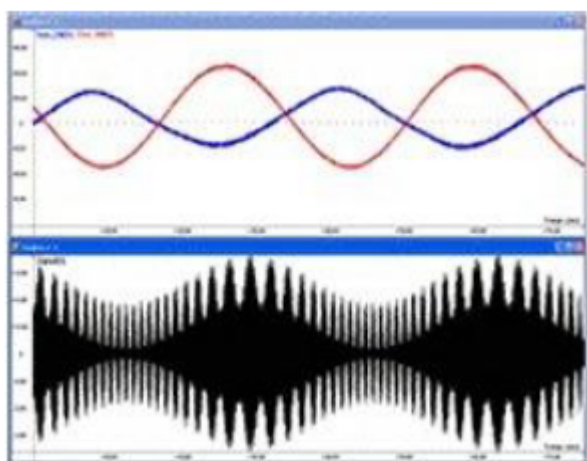
Ci dessous, exemples de signaux VOR 30Hz démodulés et modulés par le 9960Hz :



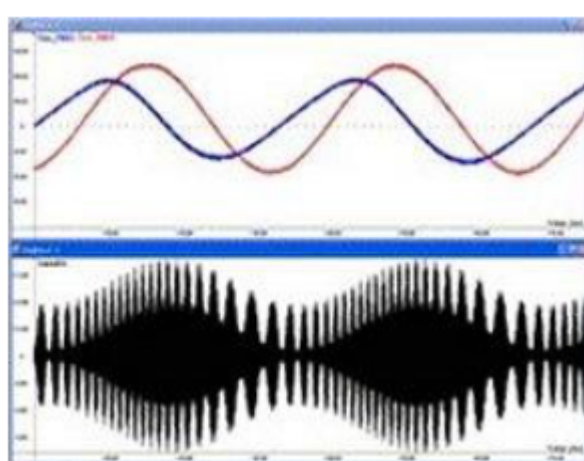
En phase = radial nord (360°)



Décalage de + 90° = radial est (90°)



Opposition de phase = radial sud (180°)



Décalage de + 270° = radial ouest (270°)

Des espaces de bande passante sont ménagés de façon à permettre l'émission de l'identification de la balise en code morse (1200Hz), mais aussi de pouvoir transmettre un message modulé en phonie en cas de nécessités (panne des moyens de radiocommunication d'un ATC, par exemple).

Tous ces signaux « basse-fréquence » modulent une porteuse VHF, qui est la fréquence indiquée sur les cartes aéronautique et synchronisée sur les instruments de navigation.

2.3 VOR conventionnel

A l'origine, la rotation de l'antenne directionnelle s'effectuait uniquement mécaniquement. La maintenance était alors importante. Il y avait des soucis d'usure des roulements et des connexions haute fréquence.

Les versions modernes des VOR n'utilisent plus d'antennes tournantes. Ils utilisent, maintenant, quatre antennes directionnelles, fixes, qui ont chacune des diagrammes d'émission déphasés de 90°. La rotation est électroniquement simulée en jouant avec le déphasage des antennes.

Ces deux types de balise sont appelés VOR Conventionnel :



Photographie

aérienne d'un VOR conventionnel "moderne"

Tout VOR possède au moins une antenne latérale additionnelle de réception, qui sert au monitoring de calibration. En cas d'écart relevé trop important, le système s'arrête (mieux vaut pas de balise qu'une balise transmettant des informations erronées)

2.4 VOR Doppler

Une seconde forme de VOR est le VOR Doppler. Un VOR Doppler possède quarante huit antennes disposées en cercle autour d'une tour centrale.



VOR Doppler

De façon très simplifiée, imaginez maintenant un VOR classique mais sans antenne rotative. A la place, un système électronique complexe simule, par modulation d'espace, une petite antenne omnidirectionnelle qui se déplacerait très vite sur un rail virtuel formant un cercle de 13,4 mètres de diamètre, pour effectuer 30 tours par seconde. Selon l'effet Doppler, un récepteur distant va alors voir la fréquence de la porteuse augmenter quand l'antenne vient vers lui et diminuer quand elle s'en éloigne. NB : Aucun système mécanique ne pourrait permettre le déplacement physique d'une antenne sur un cercle, à pareille vitesse.

La Modulation d'espace est le nom donné aux rayonnements complexes des 48 antennes, combinés dans l'espace, en tout point, qui s'ajoutent ou se retranchent pour réaliser le déplacement virtuel des antennes.

Une antenne omnidirectionnelle est une antenne qui rayonne à la même puissance dans toutes les directions sur 360° d'angle.

En fait le système « simule » deux antennes, diamétralement opposées sur le cercle, émettant, l'une avec un offset positif (par rapport à la fréquence centrale de la porteuse) et l'autre avec un offset négatif, une sous porteuse AM de 9960 Hz. C'est cette dernière qui se trouve donc modulée en fréquence (FM) par le déplacement spatial des émissions « mobiles » sur les 48 antennes (+/- 480Hz).

Au final, le 30 Hz de référence est émis de manière omnidirectionnelle en AM et c'est le 30 Hz variable, contenu dans la sous porteuse 9960Hz, qui est alors modulé en FM. Sachant que la FM est moins sujette aux perturbations externes que l'AM, la précision est ainsi améliorée.

Pour le récepteur, il n'y a que très peu de différence entre le spectre d'un VOR Conventionnel et celui d'un VOR Doppler. Seules des bandes latérales plus étendues que celle d'un VOR Conventionnel y sont présentes, mais elles sont purement et simplement éliminées par les filtres passe bande du récepteur. A l'usage du pilote, il n'y a aucune différence d'exploitation entre un VOR Conventionnel et un VOR Doppler.

Les avantages en précision du VOR Doppler sont indéniables, mais il demande plus d'espace au sol et est nettement plus coûteux à implanter.

Quand un observateur placé sur le bord d'une route et entend un camion de pompier arriver vers lui, il entend une certaine hauteur de son (Tonalité). Cette dernière augmente (plus aiguë) quand le camion se rapproche et baisse lorsqu'il s'éloigne (plus grave) : c'est l'effet Doppler.

Ce changement de hauteur des sons est dû au fait que la vitesse de déplacement du camion s'ajoute ou se retranche à la fréquence du son émis. Ce phénomène vaut pour tous les spectres d'ondes, qu'ils soient sonores, radioélectriques ou lumineux.

2.5 TACAN et VORTAC

Le TACAN est une variante militaire du VOR. Leurs principes de base et leurs fonctionnements respectifs sont assez identiques. Les différences résident dans les fréquences utilisées pour un TACAN, qui se situent dans la bande UHF (Ultra High Frequency) et dans le fait qu'il inclut, d'office, la fonction de calcul de la distance.



TACAN



VORTAC (VOR Doppler couplé avec un TACAN)

Un TACAN, seul, ne peut donc être exploité totalement (fonction d'indication du radial) que par un récepteur TACAN (récepteurs militaires UHF). Mais la fonction d'indication de la distance est commune avec les DME.

Ainsi, un avion civil peut toujours exploiter la fonction DME d'un TACAN seul et de plus, il doit considérer tous les VORTAC (VOR + TACAN) exactement comme des VOR/DME (indication du radial et de la distance)

2.6 Distance de réception ou portée radioélectrique

Les fréquences VHF ont une portée plus réduite que les ondes moyennes utilisées pour les NDB. Elles sont stoppées ou déviées par les gros obstacles (montagnes).

Leur rayonnement se propage en ligne droite et d'une façon simple, on peut dire que la portée de ces émetteurs est à peu près équivalente à la portée visuelle.

La formule ci dessous permet de la calculer plus précisément :

$$D(NM) = 1.23 \times \sqrt{\text{Hauteur}(ft)}$$

Nous pouvons voir facilement que plus la hauteur au dessus du sol de l'aéronef est grande, plus la distance de réception du VOR sera étendue.

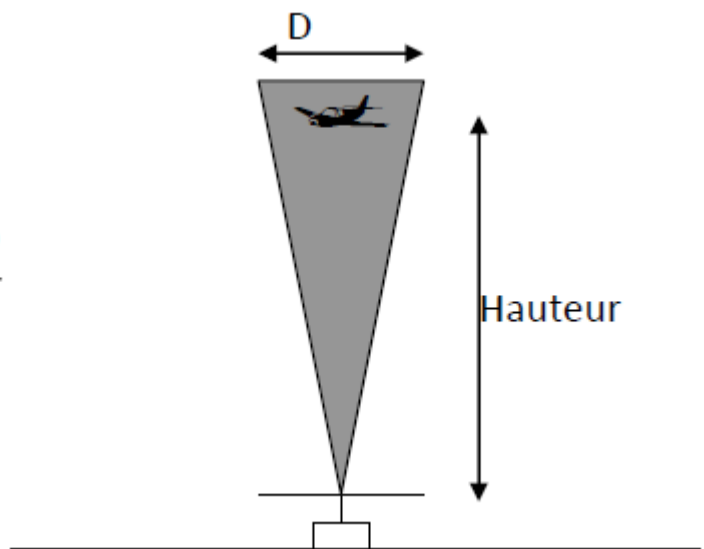
Les fréquences UHF ont les mêmes propriétés que les VHF et sont même plus facilement stoppées par les gros obstacles. Cependant, leur longueur d'onde, plus courte, permet une meilleure précision angulaire.

2.7 Passage à la verticale du VOR

A la verticale d'un VOR, le signal VAR n'a plus aucun effet directionnel. Le récepteur VOR devient alors incapable de différencier un radial d'un autre. Le drapeau OFF apparaît sur l'afficheur et l'information du radial se met en butée droite ou gauche pour éviter toute erreur, jusqu'à ce que l'aéronef ait dépassé cette zone critique.

Cette dernière est appelée cône de silence (Le silence est une expression imagée pour signifier que le récepteur ne peut pas déterminer une valeur de radial, exactement comme si le VOR ne transmettait pas). C'est un cône renversé dont le sommet est la balise VOR et le diamètre de la zone est en fonction de l'altitude de l'appareil. Le diamètre de la zone de silence traversée par l'aéronef est déterminable par la formule simplifiée suivante :

$$D(NM) = \frac{Hauteur(ft)/1000}{2}$$



Exemple :

- à 20000ft, cette zone de silence aura un diamètre $D = 20/2 = 10$ NM ;
- à 4000ft (durant une approche), la zone de silence aura un diamètre $D = 4/2 = 2$ NM.

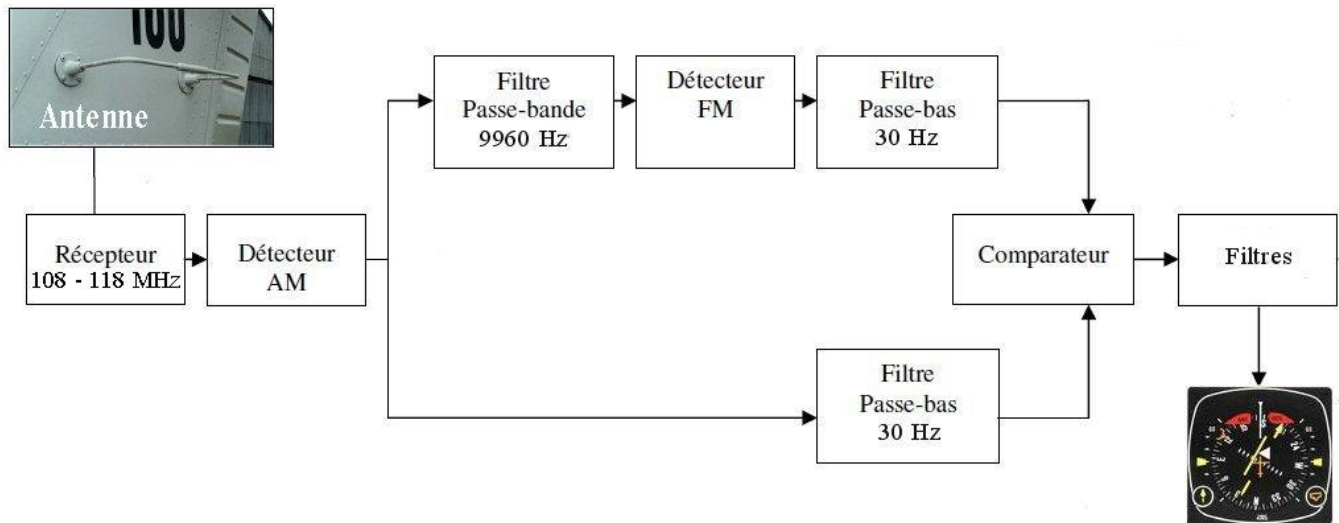
3. Fonctionnement de la détection

Comme précédemment expliqué, un VOR émet, simultanément, deux informations distinctes :

- Un premier signal de 30 Hz, omnidirectionnel, fixe, qui sert de référence ;
- Un second signal de 30 Hz, directionnel et dit variable,.

Nous avons également vu que, pour que cela fonctionne, on module l'un des signaux directement en AM sur la porteuse et le second, en modulation de fréquence (FM) sur une « sous porteuse » AM de 9960 Hz.

Ci-dessous, est donné le synoptique d'un récepteur VOR (ou récepteur de NAV)



Synoptique d'un récepteur NAV-VOR

- Tout d'abord, les ondes électromagnétiques VHF sont reçues par l'antenne ;
- Le signal de la balise désirée est syntonisé, 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 30Hz AM ;
- La branche du haut est le filtrage passe-bande du signal 9960Hz, 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.

Revision #3

Created 4 March 2025 00:09:09 by Liam Iveton

Updated 23 April 2025 22:03:15 by Liam Iveton