



# FORMATION DU PILOTE

## PILOTAGE AUX INSTRUMENTS

### (Les principes de base en aviation)

#### Les radials et les QDR

**Les radials sont des axes** radioélectriques qui sont **repérés par leur mesure angulaire** à partir du **Nord magnétique**. Ils sont générés par une balise radioélectrique.

**QDR:** Relèvement magnétique de l'**aéronef** par une station (QDR = **Radial**: du centre vers l'extérieur du cercle, le long du rayon).

**QDM:** Relèvement magnétique de la station par l'**aéronef** (QDM = vers le **Moyeu**)

Une balise radioélectrique permet de définir 360 radials de 0° à 360° de un en un degré.

On remarque que le radial pointé vers le Nord est le 0 ou 360, vers l'Est le 090, vers le Sud le 180, et vers l'Ouest le 270.

Notons que radial est une demi-droite et qu'il ne faut pas confondre, par exemple le radial 200 avec le radial 020

**Note: QDM = QDR-180° (si  $\Delta R = \Delta Dm$  ou si Dm varie peu et la distance station-aéronef est faible)**

#### Altimétrie

Pour commencer il faut maîtriser les notions de **QFE** (Atmospheric pressure **(Q) at Field Elevation**) et QNH ( Atmospheric Pressure **(Q) at Nautical Height**). Ces deux grandeurs s'expriment en hectoPascal (hpa), le pascal est l'unité de pression qui intègre le système international (système MKS) et correspond à 1 N/m<sup>2</sup> (Newton par mètre carré). L'atmosphère standard OACI correspond à une pression atmosphérique au niveau de la mer de 1,013 10<sup>5</sup> pa c'est à dire un bar... pour les anciens ;) ce qui fait 1013 hpa ou 1013 mbar (millibar).

Le QNH ou le QFE est indiqué par l'altimètre de l'avion, c'est là qu'il faut comprendre qu'un altimètre est en fait un capteur de pression gradué en pieds (ft) et pas en hpa ! il ne mesure pas la distance qui existe entre le sol et l'avion mais uniquement la pression de l'air ambiant ! Le montagnard comprend bien que plus on grimpe, plus l'air se raréfie et plus la pression chute. Il y a en fait une relation linéaire entre l'altitude et la pression de l'air, dans les basses couches lorsque l'on grimpe de 28 ft on perd environ 1 hpa. Par conséquent, si nous connaissons la pression au niveau de la mer, il suffit de mesurer la pression au niveau de l'avion pour en déduire son altitude par rapport au niveau de la mer, c'est une simple règle de proportionnalité ( ou règle de trois ). **Lire une pression c'est lire une altitude ou une hauteur.**

Exemple: On mesure au niveau d1 de la mer une pression p1=1013 hpa. A bord de notre avion au niveau d2 par rapport à la mer, on mesure une pression p2=1000hpa. A quelle altitude sommes nous du niveau de la mer ?

$$\begin{aligned} d2-d1 & \text{ ----> } p2-p1 = 13 \text{ hpa} \\ Dd = 28 \text{ ft} & \text{ ----> } Dp = 1 \text{ hpa} \\ d2-d1 = Dd.( p2-p1 ) / Dp & = 28 \times \frac{13}{1} = 364 \text{ ft} \end{aligned}$$

Le QNH ( donné par la tour avant votre envol ) est le paramètre le plus important lorsque le vol n'

est plus local. **Le QNH correspond à la pression au niveau de la mer et vous permet donc, après le réglage de votre altimètre, de connaître l'altitude de l'avion par rapport au niveau de la mer.** Or, sur une carte de navigation, l'altitude topographique d'un obstacle est donné par rapport au niveau de la mer, cette référence commune nous permet donc de connaître notre hauteur par rapport à l'obstacle ( il suffit de retrancher l'indication d'altitude topographique de la carte à l'indication de l'altimètre convenablement étalonné).

Alors tout est bien dans le meilleur des mondes ... sauf que ... le QNH dépend du lieu, du climat et varie dans le temps !! Comme référence stable on fait mieux ! Comprendons bien que le but consiste aussi à proposer une référence commune à tous les pilotes de sorte qu'ils puissent se croiser sans se percuter...

La pression au niveau de la mer sur la côte méditerranéenne n'est en général pas celle que l'on trouve en baie de Somme, le QNH dépend du lieu car les facteurs climatiques diffèrent d'un lieu à l'autre. Et comme le climat évolue au cours du temps le QNH en fait de même.

On convient donc de fixer une valeur standard arbitraire de 1013 hpa au QNH ( au dessus de 3000 ft QNH ou au dessus de l'altitude de transition en espace contrôlé ) pour proposer une référence commune stable à tous les pilotes qui pourront se croiser sans commettre d'erreur relative d'altitude. Ce faisant on introduit une erreur dans l'estimation de notre altitude par rapport au niveau de la mer ( le QNH régional n'est pas obligatoirement de 1013 hpa ) mais le pilote d'en face commet la même erreur d'estimation lorsqu'il vous croise et par conséquent il possède la bonne information sur la hauteur relative entre son appareil et le vôtre. En l'occurrence mieux vaut avoir tort et être vivant qu'avoir raison et être mort...et lorsqu'un QNH régional croise un QNH standard à "3000 ft" cela peut se finir ainsi...

Cela dit on comprend que le QNH standard peut introduire quelques risques lorsque l'on navigue à basse altitude et dans certaines conditions.

En régime de haute pression, le QNH régional est supérieur au QNH standard ( par exemple 1026 hpa contre 1013 hpa ), l'altimètre de votre avion indique zéro ( 1013 hpa ) lorsque vous êtes à  $(1026 - 1013) * 28 = 364$  ft au dessus du niveau de la mer. On commet une erreur par excès. En régime de basse pression, le QNH régional est inférieur au QNH standard ( par exemple 1000 hpa contre 1013 hpa ), l'altimètre de votre avion indique zéro ( 1013 hpa ) lorsque vous êtes à  $(1000 - 1013) * 28 = -364$  ft c'est à dire à 364 ft au dessous du niveau de la mer ! On commet une erreur par défaut.

A basse altitude et en régime de basse pression il faut donc faire attention au relief car le relevé topographique d'un obstacle indiqué sur la carte correspond à la vraie hauteur de l'obstacle par rapport au niveau de la mer. Dans notre exemple précédent, si on se dirige vers un obstacle qui culmine à 500 ft et que l'altimètre indique 750 ft on percute l'obstacle à 114 ft au dessous de son sommet !

Conclusion, à basse altitude ( au dessous de 3000 ft QNH ou au dessous de l'altitude de transition en espace contrôlé ) il est préférable de voler au QNH régional.

Le QFE correspond à l'altitude de l'aérodrome par rapport au niveau de la mer, par conséquent si le QNH évolue, le QFE évolue de la même valeur et dans le même sens. Par exemple pour l'aérodrome du Pontreau à Cholet nous avons une altitude de 443 ft par rapport au niveau de la mer ce qui correspond à une différence de pression par rapport au QNH de  $443 / 28 = 15.8$  hpa ( environ 16 hpa ). Si le QNH régional est de 1010 hpa, le QFE de l'aérodrome est obligatoirement de  $1010 - 16 = 994$  hpa ... etc ...

Lorsque nous effectuons un vol local à basse altitude nous volons en général au QFE ou au QNH régional et on comprend que cette information soit cruciale pour le contrôleur aérien. Lors du contact avec la tour il faudra donc annoncer que l'on vole au QFE si c'est le cas ( il y a cependant des règles...voir la division des espaces aériens ). Notons que lorsque l'on vole au QFE, on annonce une hauteur par rapport à l'aérodrome de référence et pas une altitude par rapport au niveau de la mer ( QNH régional ).

# RADIONAVIGATION

L'utilisation des ondes radio comme aide à la navigation est simultanée à la découverte des **antennes à cadre directionnels** et de la **radiogoniométrie** associée. Les **radiophares** ont commencé à aider les navires en Atlantique Nord avant leur usage en aviation. Voici quelques instruments utilisés en radionavigation et utiles au pilotage»aux instruments»

## Le VOR : VHF Omnidirectional Range



VORTAC TGO (TANGO) Allemagne



Vue aérienne d'un ensemble d'antenne d'une balise VOR de Sprimont "SPI" en Belgique

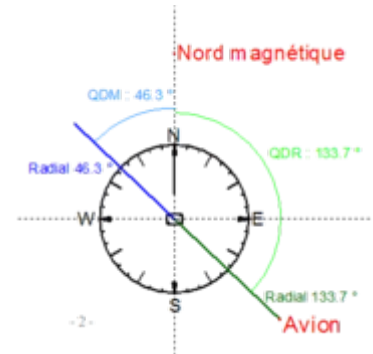


Schéma représentant les informations données par le VOR

Le **VOR** (abréviation de **VHF Omnidirectional Range**) est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne et fonctionnant avec les fréquences **VHF**.

Un récepteur VOR permet de déterminer son **relèvement magnétique** par rapport à une station au sol (balise émetteur VOR dont la position est connue), et donc le **radial** sur lequel le récepteur (donc l'avion) est situé. Par déduction il permet de suivre n'importe quelle route passant par la station (en rapprochement ou en éloignement de celle-ci), ou même de déterminer la position exacte de l'avion en utilisant deux balises VOR.

Rappelons que la route magnétique est l'angle orienté du Nord magnétique vers la trajectoire que suit l'**avion**. Par exemple, la route d'un avion se déplaçant vers l'est est égale à 90°.

La station au sol utilise la gamme de **fréquences VHF** de 108 à 117.95 MHz. Plus intéressant que le **radiocompas**, le **VOR** est moins soumis aux perturbations extérieures, telles celle de l'**ionosphère** ou simplement les **nuages**. En effet, il est à portée optique que l'on évalue souvent en aviation grâce à la formule:

$$portee(Nm) = 1,23 * \sqrt{hauteur(ft)}$$

ou:

$$portee(Km) = 4,1 * \sqrt{hauteur(m)}$$

Les balises VOR émettent avec une puissance de 200 W PAR sur la bande 108,00 à 117.95 MHz avec un pas de 50 ou 100 kHz (50 kHz en zone dense et 100 kHz dans les autres cas):

- Les balises VOR d'approche: approche des aérodromes, bande de 108,00 à 111,85 MHz avec décimale paire;

Exemples: 108,00 MHz - 108,05 MHz - 108,20 MHz - 108,25 MHz - ... - 111,80 MHz - 111,85 MHz;

- **Instrument Landing System**: système d'aide à l'atterrissage, bande de 108,10 à 111,95 MHz avec décimale impaire;

Exemples: 108,10 MHz - 108,15 MHz - 108,30 MHz - ... - 111,90 MHz - 111,95 MHz;

- Les balises VOR en route: repères des routes de l'espace aérien supérieur, bande 112 à 117.95 MHz;

Il y a donc 160 canaux pour le système VOR et 40 canaux pour le système ILS.

De plus deux technologies de VOR existent pour l'émission (qui émettent évidemment des signaux identiques du point de vue du récepteur):

- Le VOR/C (Classique ou Conventionnel);

• Le VOR/D (Doppler): plus récent et moins sensible aux phénomènes de multi trajet.  
En général, les stations **VOR** sont couplées à des stations **DME** (*Distance Measuring Equipment*) permettant ainsi à l'avion de connaître non seulement sa position par rapport à la route sélectionnée, mais aussi la distance directe qui le sépare du VOR-DME.

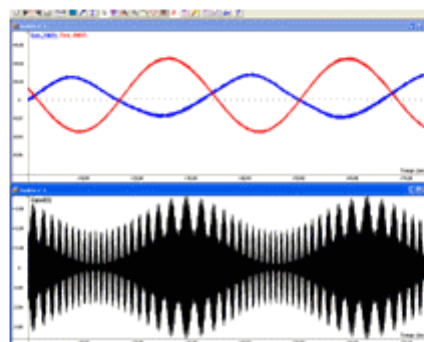
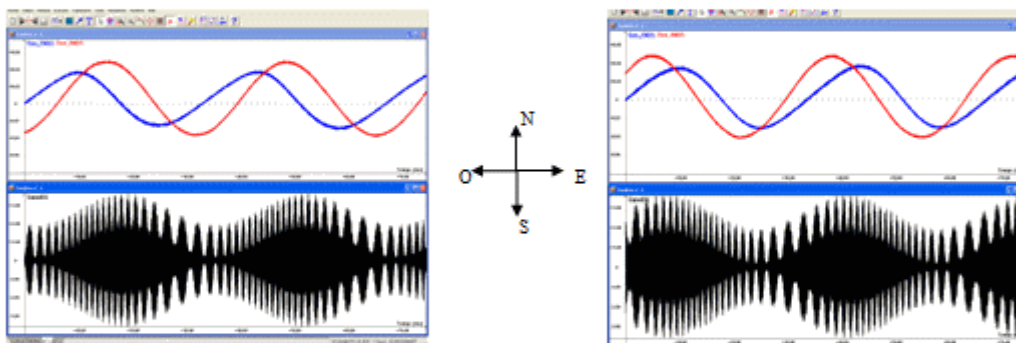
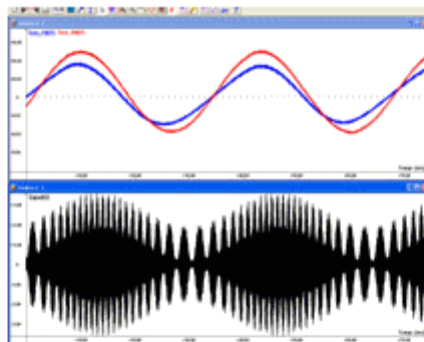
## Principe général du VOR

Le principe du **VOR** se base sur l'émission de signaux radioélectriques par des balises au sol. Le signal, reçu à bord de l'avion, donne le **relèvement** de la balise. Le VOR travaille en polarisation horizontale.

Le signal émis est à la fréquence caractéristique de la balise (entre 108 et 118 Mhz). La porteuse est **modulée en amplitude** (30%) par une sous-porteuse à 9960Hz **modulée en fréquence** par un signal de 30Hz. L'ensemble du signal obtenu est également modulé en amplitude par un autre signal de 30 Hz.

C'est le déphasage entre les deux modulations (et donc entre les 2 signaux à 30 Hz) qui permet d'accéder à la valeur du QDR (angle à la balise entre le nord et l'avion). En effet, une des deux modulations est directionnelle et l'autre est omnidirectionnelle.

À cela s'ajoute une modulation d'amplitude pour l'identification de la station (code morse), et éventuellement une modulation pour de la phonie. Ce signal (porteuse modulée) est rayonnée par une antenne omnidirectionnelle et permet au pilote de vérifier la balise sélectionnée et son bon fonctionnement.



# Principe du VOR/C

Le VOR/C utilise une antenne directionnelle qui tourne à 30 t/s et qui émet un signal dont l'enveloppe est modulé en fréquence.

Finalement

- Le signal modulé en fréquence est omnidirectionnel: il est émis dans toutes les directions de la même manière.
- La modulation d'amplitude est par contre directionnelle: elle est créée par la rotation de l'antenne (à 30 t/s) qui privilégie une direction donnée.

# Principe (simplifié) du VOR/D

Il utilise l'**effet Doppler**.

Le VOR/D utilise une antenne centrale entourée par 48 antennes disposées sur un cercle de 6,8 m de rayon.

- L'antenne centrale émet la porteuse modulée en amplitude (30 Hz)
- Deux petites antennes de part et d'autre émettent l'une en bande latérale supérieure et l'autre en bande latérale inférieure.

La somme de ces trois signaux nous donnent un signal dont l'enveloppe est à 9960 Hz et est modulé en amplitude à 30 Hz.

Le fait de faire tourner les petites antennes à la vitesse de 30 t/s autour de l'antenne centrale crée une légère (mais suffisante) modulation de fréquence de l'enveloppe (9960 +/- 480 Hz) du signal final. La rotation est virtuelle car est simulée par commutation entre les 48 petites antennes (imaginez de faire tourner des antennes à environ 4500 km/h autour de l'antenne principale!!)

Finalement :

- La modulation d'amplitude est omnidirectionnelle : elle est créée par une antenne centrale.
- Le signal modulé en fréquence est directionnel : il est émis dans toutes les directions de la même manière.

Physiquement dans les VOR/D actuels, le signal est rayonné : ils s'additionnent dans l'espace.

# L'instrument

L'information fournie au pilote est présentée sous la forme d'une aiguille qui indique un écart par rapport à une route sélectionnée.

# Le DME : Distance Measuring Equipment

Un **Distance Measuring Equipment** (DME) est un radio-transpondeur qui permet de connaître la distance qui sépare un **avion** d'une station au sol en mesurant le temps que met une impulsion radioélectrique UHF (Ultra Haute Fréquence) pour faire un aller-retour. Le DME fut inventé par **Edward George "Taffy" Bowen** et V.D. Burgmann. Le DME est fonctionnellement identique au composant distance du **TACAN**.

# Fonctionnement

L'avion envoie des paires d'impulsions qui sont reçues par la station au sol, considérablement amplifiées, puis réémises avec un retard fixe (retard systématique de 50 microsecondes), sur une fréquence qui diffère par  $\pm 63$  MHz. Le récepteur de bord mesure le temps aller-retour et en déduit la distance à la station.

Le système DME fonctionne sur base d'un **transcepteur** UHF (interrogateur) dans l'avion et d'un transcepteur dans la station au sol (**transpondeur**). L'interrogateur transmet une paire d'impulsions au transpondeur qui transmet en réponse une séquence précisément du même écart temporel (retard). Une fois identifiés deux signaux retardés correctement, l'appareil DME peut mesurer le temps pris par le signal pour parcourir l'aller-retour (déduction faite du traitement des signaux dans les différents appareils).

Les informations fournies au pilote sont la distance en milles nautiques, la vitesse sol et le temps pour rejoindre la station. La distance mesurée doit être corrigée en fonction de l'altitude de l'avion pour connaître la distance horizontale. La station au sol s'identifie par un message morse sur une fréquence fixe.

La station au sol utilise la gamme de fréquences de 960 à 1215 MHz qui sont appariées à celles des **VOR** et des **ILS**. On parle d'ailleurs souvent d'appareils VOR/DME.

Une station au sol peut traiter une centaine d'avions simultanément. Pour ce faire, chaque émetteur embarqué interroge la station à un rythme faible, avec des écarts aléatoires entre paires, afin de reconnaître le signal de retour parmi les autres. La sensibilité du récepteur (son gain) s'ajuste pour ne pas dépasser la limite du nombre d'avions que la station peut gérer (les avions les plus éloignés sont ainsi ignorés en cas de risque de saturation).

La précision d'un DME est de  $\pm(0,25 \text{ milles nautiques} + 1.25\% \text{ de la distance})$ .

## **L'ILS (*Instrument Landing System*)**

L'**ILS** (Instrument Landing System) est le moyen de radio-navigation le plus précis utilisé pour l'atterrissage en IFR.

Il comprend 2 éléments:

- un localizer qui fournit l'écart de l'avion par rapport à l'axe de la piste;
- un glide path qui fournit l'écart de l'avion par rapport à la pente nominale d'approche (le plus souvent 3 degrés).

Ces deux informations sont fournies soit sous forme d'aiguilles sur un indicateur VOR ou mieux sur un plateau de route HSI, soit sous forme d'indexes (barres, triangles, ...) sur 2 échelles, l'une horizontale, l'autre verticale, situées de part et d'autre de l'horizon artificiel (classique ou EFIS).

Les faisceaux localizer et glide path étant très étroits et sensibles aux perturbations, leur interception doit toujours être validée à l'aide d'une autre source de navigation. Pour le localizer cela peut être réalisé à l'aide d'un VOR, ADF ou de la RNAV. Pour la validation du glide path, on utilisait un ou deux markers (balise à émission verticale très ponctuelle), de plus en plus souvent remplacés par un DME (Distance Measuring Equipment) dont l'avantage est de fournir une information de distance en continu. Le DME est le plus souvent co-implanté avec le glide path, donnant ainsi directement la distance au seuil de piste, ce qui est très pratique; mais il arrive exceptionnellement qu'il soit implanté avec le localizer.

Un voyant lumineux et un signal sonore sont activés au passage de chacun des markers. L'information de distance DME est quant à elle fournie sur l'afficheur DME.

D'un point de vue pratique, l'utilisateur affiche une seule fréquence, celle du localizer, comprise dans la gamme VHF 108,0 - 111,95 Mhz. Les fréquences glide path et DME lorsqu'il existe sont dans des gammes de fréquences différentes (UHF) mais appariées à celle du localizer donc cela reste transparent pour l'utilisateur.

La portée certifiée est de 15 à 20 NM pour le localizer (30 à 50 NM en pratique); légèrement moins pour le glide path. Le DME d'un ILS, moins puissant qu'un DME en route peut néanmoins être reçu



jusqu'à 50 voire 100 NM.

Avantages de l'ILS:

- très grande précision
- sous certaines conditions (dégagement des aires critiques, séparations accrues entre avions, secours électrique, balisage spécifique, ...), permet de réaliser des atterrissages automatiques et donc de se poser avec des visibilités très faibles.

Inconvénients de l'ILS:

- sensible aux perturbations des faisceaux électriques (par véhicule ou avion au sol ou avion en vol)
- existence occasionnelle de faux axes par réflexion du faisceau sur un relief
- faisceaux étroits nécessitant une aide pour la capture.

## **Localizer**



Localizer de **Whiteman Air Force Base, Missouri.**

Le *localizer* est constitué par un ensemble d'antennes situées après le bout de la piste qui émettent une porteuse VHF entre 108 et 112MHz, première décimale impaire (111,75MHz pour la piste 26 à **Orly** par exemple).

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 150Hz est supérieur à celui du 90Hz 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 1020Hz qui transmet le code **Morse** d'identification de la station correspondant généralement à 2 ou 3 lettres de l'alphabet (OLW pour la piste 26 à Orly par exemple) transmis au moins 6 fois par minute.

Le diagramme de rayonnement est ouvert d'environ 35° dans le plan horizontal et 7° dans le plan vertical. La zone de guidage linéaire ne couvre quant à elle qu'une ouverture maximum de +/-3° autour de la position d'axe .

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



*mât et antennes Glide*

## ***Glide Path***

Le **glide path** est constitué par un ensemble d'antennes situées généralement entre 120 m et 150 m sur le côté de la piste, près du seuil, qui émettent une porteuse UHF entre 328,65 et 335,40 MHz appairée à la fréquence du localizer.

Elle est modulée par 2 basses fréquences l'une à 90 Hz et l'autre à 150 Hz. Au-dessous du plan de descente, le taux de modulation du 150 Hz est supérieur à celui du 90 Hz et inversement au-dessus du plan. La différence de taux permet d'en déduire un écart qui est affiché sur le récepteur de bord.

Ils assurent un plan de descente réglable et généralement de l'ordre de 3° (entre 2,5 et 3,5).

Le diagramme de rayonnement est ouvert d'environ 16° dans le plan horizontal et 7° dans le plan vertical.

Le faisceau du glide n'est plus exploitable à partir de 15m (50ft). Pour les atterrissage automatiques l'avion est guidé par les informations de la radiosonde et du vario.

## ***Markers***

Les **markers** sont des radiobalises à émission verticale placées sur la trajectoire finale des avions qui émettent sur 75 MHz. Ils sont peu à peu remplacés par des DME appariés à la fréquence du localizer.

Historiquement, aux pionniers du vol aux instruments tels que Gaston Génin, un opérateur radio transmettait depuis le sol en Morse 2 fois la lettre Z lorsqu'il les entendait survoler le terrain dans la brume. Ils savaient alors qu'ils pouvaient entamer leur procédure d'approche.

L'outer marker situé à environ 8 km du seuil est modulé à 400 Hz, il allume un voyant bleu dans le cockpit et émet une tonalité Morse de 2 traits par seconde ( - - ).

Le middle marker situé à environ 1 km du seuil est modulé à 1300 Hz, il allume un voyant orange dans le cockpit et émet une tonalité Morse de 2 fois 1 trait et 1 point ( - \* - \* ), mais 1 trait et 1 point par seconde ( - \* ).

L'inner marker situé à environ 100 m du seuil est modulé à 3000 Hz, il allume un voyant blanc dans le cockpit et émet une tonalité Morse de 6 points par seconde ( \* \* \* \* \* ). Il n'y a pas d'inner marker implanté sur les aérodromes Français.

Ce genre de balises n'est plus installée en France, et est remplacé par l'usage des DME ATT.

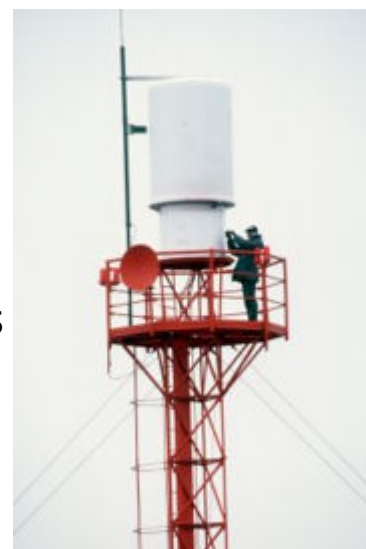
## ***Le TACAN***

Le terme **TACAN** (pour **TACT**ical Air **N**avigation) désigne un système de navigation aérienne militaire. C'est une version plus précise du système VOR utilisé dans le domaine civil.

Le TACAN travaille dans la bande UHF, sur la plage de fréquences 960-1215 MHz. Ses caractéristiques permettent d'utiliser des émetteurs plus simples et de taille moindre que ceux du système VOR, ce qui rend possible son installation sur un navire de guerre, un avion de type AWACS ou encore un avion ravitailleur.

Les systèmes TACAN utilisent un système de mesure de la distance compatible avec le DME du système VOR, ce qui conduit parfois à regrouper les deux équipements dans une même installation, alors désignée **VORTAC**.

Source : wikipédia



*Antenne TACAN*