

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT

Collège Édouard-Montpetit École nationale d'aérotechnique



Pierre GILLARD/EXT.1634

Propagation des ondes et antennes

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT

Collège Édouard-Montpetit École nationale d'aérotechnique

Avant de débiter le cours ...



Merci !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Présentation du cours



- Introduction.
- Principes élémentaires de radio.
- L'onde électromagnétique.
- Fréquence et longueur d'onde.
- Les antennes.
- Notions élémentaires de propagation des ondes.
- Transmission par câbles coaxiaux.
- Conclusions.

Introduction



- Les systèmes radio utilisent les ondes électromagnétiques pour communiquer entre eux.
- Il existe plusieurs gammes de fréquences propices à la propagation de ces ondes.
- Chaque gamme de fréquences a des propriétés de propagation qui lui sont spécifiques.
- L'interface entre le signal électrique et l'onde électromagnétique est l'antenne.
- Selon le mode de propagation et la fréquence utilisée, l'antenne a des dimensions et des formes particulières.

Principes élémentaires de radio

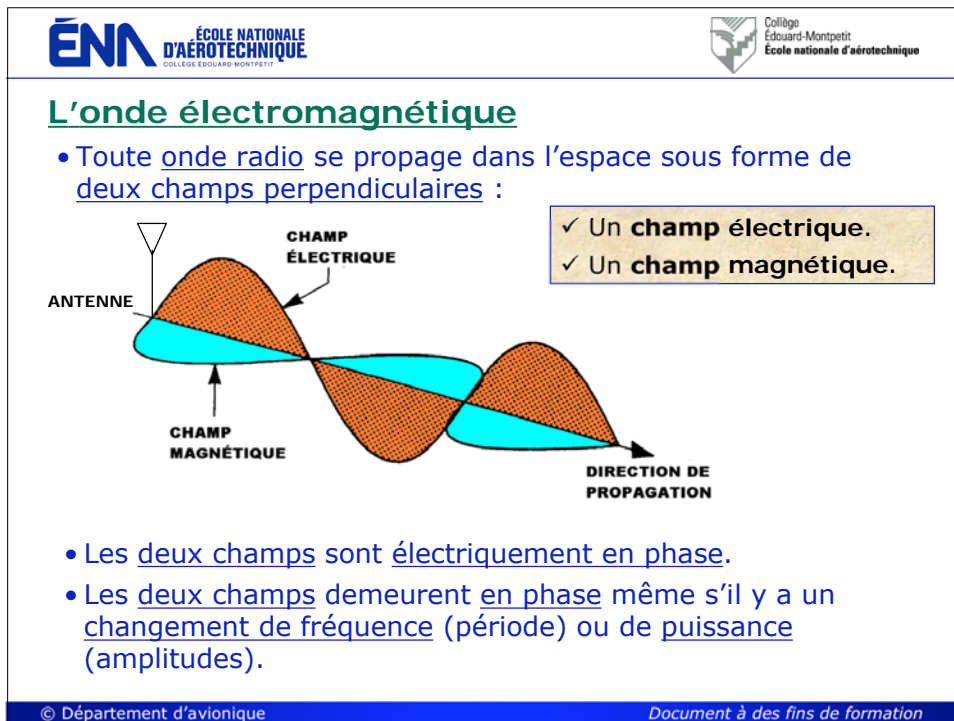
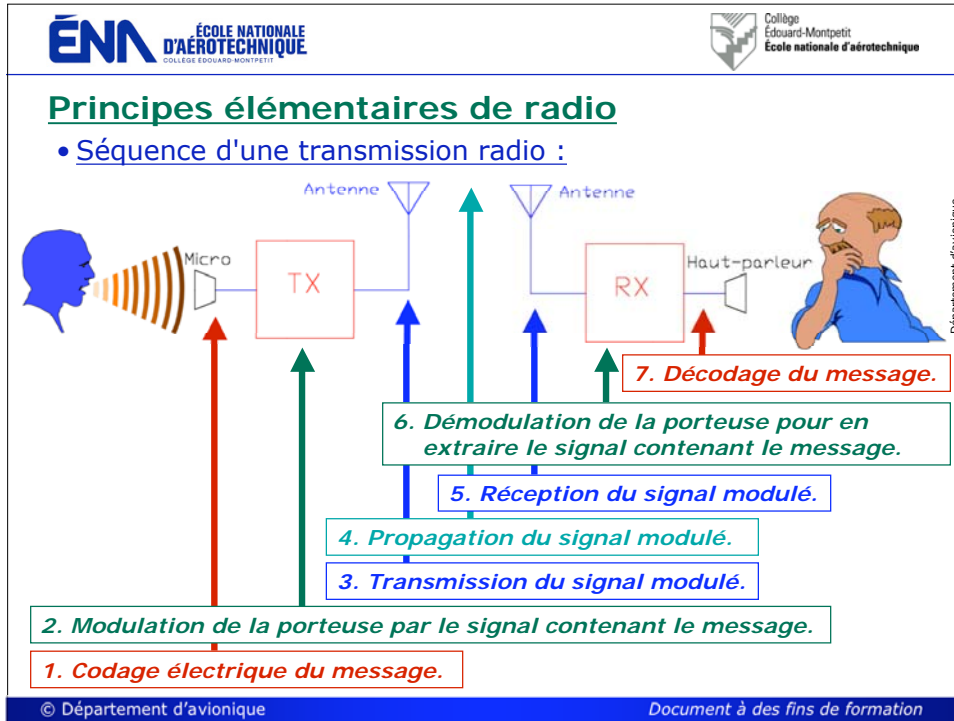


- Le principe des communications radio est de « transporter » un message vocal ou non d'un point vers un autre.
- Le message vocal ou les données à transmettre sont codés sous forme d'un signal électrique.
- Parfois, le message est crypté (applications militaires).
- Suivant la portée et l'allocation du spectre de fréquences, on choisit une « fréquence porteuse » (*Carrier Frequency*).
- Le rôle de la fréquence porteuse consiste à transporter le signal électrique d'un émetteur vers un récepteur.

Principes élémentaires de radio

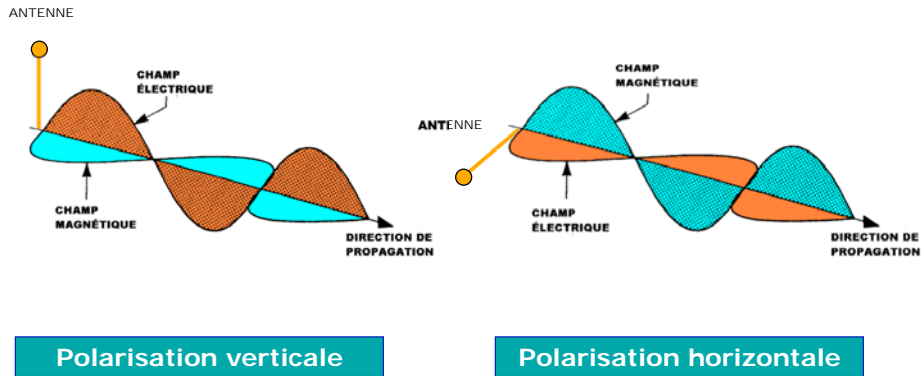
- Le signal électrique à transporter module la fréquence porteuse.
- Différents types de modulations existent.
- Voici les plus courantes utilisées en aviation :

- ✓ **Modulation d'amplitude (AM)** : communications aéronautiques VHF à courte distance, ADF, VOR, ...
- ✓ **Modulation de fréquence (FM)** : communications VHF et UHF à courte distance (services publics), VOR, ...
- ✓ **Modulation de phase (PM)** : GPS (modulation BPSK), ...
- ✓ **Modulation à bande latérale unique BLU (SSB)** : communications HF à longue distance (suivant la bande latérale utilisée, on parlera de « *USB-Upper Side Band* » ou de « *LSB-Lower Side Band* »); en aviation, seule la USB est employée.



L'onde électromagnétique

- Le plan dans lequel se trouve le champ électrique détermine la polarisation de l'onde électromagnétique :



L'onde électromagnétique

- En résumé :

CHAMP ÉLECTRIQUE VERTICAL = POLARISATION VERTICALE
POLARISATION VERTICALE = ANTENNE VERTICALE

Exemple :



Antenne VHF-COM

CHAMP ÉLECTRIQUE HORIZONTAL = POLARISATION HORIZONTALE
POLARISATION HORIZONTALE = ANTENNE HORIZONTALE

Exemple :



Antenne NAV

Fréquence et longueur d'onde

- Les ondes électromagnétiques utilisées pour les communications radio se propagent dans l'atmosphère à la vitesse de la lumière ($c = 300\ 000\ \text{km/s}$).
- On peut établir une liaison de proportionnalité inverse entre une longueur d'onde « λ » exprimée en mètres et une fréquence « f » exprimée en hertz :

$$\lambda = c / f$$

- Cette propriété nous indique qu'il y aura des conséquences quant à la conception des antennes, les dimensions de celles-ci étant liées à la longueur d'onde.

Fréquence et longueur d'onde

- Exemple : quelle est la longueur d'onde correspondant à 300 MHz ?

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^6} = 1\text{m}$$

- En d'autres termes, cela signifie qu'une onde à 300 MHz aura parcouru une distance de 1 mètre après un temps équivalent à une période, c'est-à-dire 1/300 000 000e de seconde.

Fréquence et longueur d'onde

- Exemple : quelle est la longueur d'onde correspondant à 118 MHz ?


$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{118 \cdot 10^6} = 2.542 \text{ m}$$

- 118,00 MHz est la première fréquence dans la bande de radiocommunication aéronautique VHF-AM.
- Sachant que les antennes de radiocommunication sont taillées au quart d'onde, cela signifie qu'une antenne VHF-COM aura une hauteur de l'ordre de 60 cm.


Fréquence et longueur d'onde



- En théorie, les fréquences porteuses sont positives et s'étendent de l'infiniment petit à l'infiniment grand.
- Actuellement, les technologies de pointe permettent d'atteindre des fréquences radio jusqu'à la centaine de gigahertz environ.
- On a l'habitude de classer les fréquences en gamme ou bandes de fréquences.


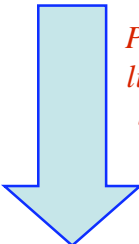


**ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE**
COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT




Collège
Édouard-Montpetit
École nationale d'aérotechnique


Fréquence et longueur d'onde

EHF	300 GHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	1mm	 <p style="color: red; font-style: italic;">Portée limitée par l'horizon</p>
		Communications - Radar		
SHF	30 GHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	1cm	
		Navigation – Communications - Radar		
UHF	3 GHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	0.1m	
		Navigation - Communications		
VHF	300 MHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	1m	
		Navigation - Communications		
HF	30 MHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	10m	
		Communications		
MF	3 MHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	100m	 <p style="color: red; font-style: italic;">Portée non limitée par l'horizon</p>
		Navigation		
LF	300 kHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	1km	
		Navigation		
VLF	30 kHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	10km	
		Communications sous-marines		
	3 kHz	<hr style="border: 1px solid blue;"/>	100km	

© Département d'avionique
Document à des fins de formation



**ÉCOLE NATIONALE
D'AÉROTECHNIQUE**
COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT



Collège
Édouard-Montpetit
École nationale d'aérotechnique

Fréquence et longueur d'onde

- Au-dessus de 1 GHz, on parle de micro-ondes :

Dénomination de la bande	Fréquences	Longueurs d'ondes
L-band	1 GHz – 2 GHz	30 cm – 15 cm
S-band	2 GHz – 4 GHz	15 cm – 7.5 cm
C-band	4 GHz – 8 GHz	7.5 cm – 3.75 cm
X-band	8 GHz – 12.5 GHz	3.75 cm – 2.4 cm
Ku-band	12.5 GHz – 18 GHz	2.4 cm – 1.67 cm
K-band	18 GHz – 26.5 GHz	1.67 cm – 1.1 cm
Ka-band	26.5 GHz – 40 GHz	1.1 cm – 0.75 cm
Millimeter-band	40 GHz – 300 GHz	7.5 mm – 1 mm
Sub-millimeter-band	300 GHz – 3 000 GHz	1 mm – 0.1 mm

© Département d'avionique
Document à des fins de formation

Fréquence et longueur d'onde

- Au-dessus de 1 GHz, on parle de micro-ondes.
- Il est bon de savoir qu'elles peuvent être **très néfastes pour la santé** (risque très sérieux de cancer ou de brûlures).
- Les principaux systèmes aéronautiques classés dans la gamme des micro-ondes pouvant présenter un danger sont : le transpondeur, le DME, le TCAS, le TACAN, les SATCOM, le radioaltimètre, le MLS (*Micro Wave Landing System*), le radar Doppler, le radar météo, etc.



Fréquence et longueur d'onde

- Les puissances radiées élevées présentent également un danger potentiel.
- En aviation, on parle essentiellement des systèmes de radiocommunication HF qui peuvent rayonner des puissances de plusieurs centaines de watts.



Fréquence et longueur d'onde

- Les fréquences les plus basses utilisées en aviation sont les VLF pour les communications avec les sous-marins !



L'E-6B possède deux antennes pour communiquer avec les sous-marins : l'une de 28 000 ft et l'autre de 5 000 ft de long !



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Fréquence et longueur d'onde

- Il y a quelques années, la gamme de fréquences la plus élevée utilisée en aviation était de l'ordre de 30 GHz.
- Il s'agissait de radars permettant de rendre un hélicoptère tout temps.

Images : Military Aircraft Photographs



Le prototype européen sur une plate-forme Eurocopter BK117.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Fréquence et longueur d'onde

- Il y a quelques années, la gamme de fréquences la plus élevée utilisée en aviation était de l'ordre de 30 GHz.
- Il s'agissait de radars permettant de rendre un hélicoptère tout temps.



Images : Amphitec

*... et l'OASys-Obstacle
Awareness System
d'Amphitec développé à
Laval.*

Fréquence et longueur d'onde

- Depuis quelques années, les systèmes SATCOM prennent de l'expansion dans les bandes Ku, K et Ka (12,5 GHz à 40 GHz).
- Exemples :

- ✓ **INMARSAT 5** : bande Ka (17-20 GHz et 28-30 GHz).
- ✓ **IRIDIUM** : liaisons de et vers le sol ainsi qu'entre les satellites (autour de 19 GHz, 22 GHz et 23 GHz).
- ✓ **IRIDIUM NEXT** : bande Ka (en développement).
- ✓ **VIASAT** : bandes Ku (Yonder) et Ka (Exede).
- ✓ **GOGO** : bandes Ku (Aerosat, Intelsat et SES) et Ka (Inmarsat 5).

Fréquence et longueur d'onde



- Des chercheurs allemands et suédois pensent qu'il serait possible de transmettre des émissions en HDTV vers les avions à 60 GHz.
- Le problème est la sensibilité de cette gamme d'onde au moindre obstacle entre l'émetteur et le récepteur.
- Pour éviter des interruptions du signal TV, on peut utiliser plusieurs émetteurs avec le même signal transmis avec des délais bien définis.

Fréquence et longueur d'onde

3 kHz	10-14 kHz	VLF Omega
VLF		
30 kHz	100 kHz	LORAN C
LF		
300 kHz	190-500 kHz	NDB (ADF)
MF		
3 MHz	550-1750 kHz	AM broadcast (ADF)
HF		
30 MHz	2-30 MHz	HF-COM
	30-88 MHz	VHF-LO FM COM
	75 MHz	MKR-Marker Beacons
VHF		
	108-118 MHz	VOR-LOC
	118-137 MHz	VHF-COM (AM)
	144-174 MHz	VHF-HI FM COM
300 MHz		

Fréquence et longueur d'onde

300 MHz	225-400 MHz	UHF-COM AM (militaire)
	328-336 MHz	GS-Glide Slope
UHF	962-1215 MHz	DME et TACAN
	1030-1090 MHz	ATC Transponder/TCAS
	1,1-1,6 GHz	GPS/GLONASS/GALILEO
	1,5-1,6 GHz	SATCOM (Inmarsat)
3 GHz	2,340 GHz	XM Weather Data
	4,250-4,350 GHz	Radar Altimeter
	5,030-5,091 GHz	MLS
SHF	7,25-7,75 GHz	SATCOM (militaire)
	8,8 GHz	Doppler
	9,375 GHz	Weather Radar
30 GHz	10-30 GHz	SATCOM
EHF		

Les antennes



Nous avons vu que pour pouvoir émettre et recevoir une onde électromagnétique, on utilise une antenne.

- Afin d'obtenir un rendement élevé de la part d'une antenne, on constate que sa taille doit être en proportion d'une fraction de la longueur d'onde.
- C'est ainsi qu'on parlera d'antennes « demi-onde », « quart d'onde » et « 5/8 d'onde », par exemple.

Les antennes

- À moins d'artifices particuliers (coupleurs d'antennes), une antenne ne pourra fonctionner que pour une fréquence bien précise ou, tout au plus, une bande de fréquences très restreinte.

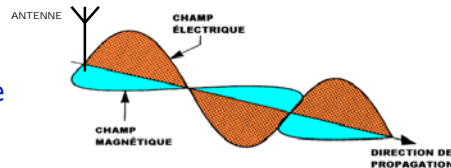


© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Les antennes

- On a déjà défini une antenne par sa polarisation, c'est-à-dire par la direction de son champ électrique :



- Polarisation verticale : l'antenne est verticale, le champ électrique est vertical et le champ magnétique est horizontal.

Images : Comant Industries et King

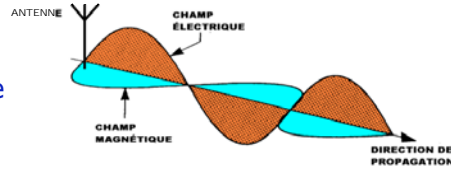


© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Les antennes

- On a déjà défini une antenne par sa polarisation, c'est-à-dire par la direction de son champ électrique :



- Polarisation horizontale : l'antenne est horizontale, le champ électrique est horizontal et le champ magnétique est vertical.

Images : Comant Industries, Dorne & Margolin et Rami

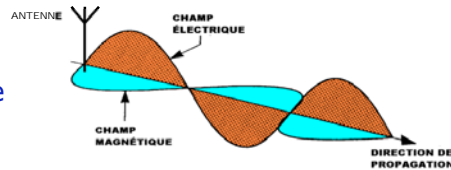


© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Les antennes

- On a déjà défini une antenne par sa polarisation, c'est-à-dire par la direction de son champ électrique :



- Polarisation circulaire : l'antenne est parabolique ou à réseau de phase, le champ électrique est toujours perpendiculaire au champ magnétique et ensemble, ils subissent une rotation dans l'espace.

Images : Comant Industries, Garmin et Pierre GILLARD



© Département d'avionique

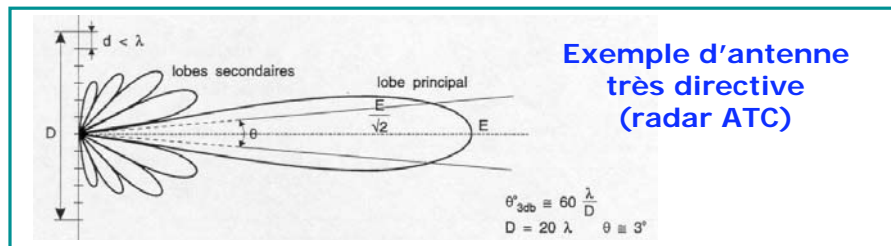
Document à des fins de formation

Les antennes

- Suivant la disposition des éléments d'une antenne ainsi que la phase de l'onde rayonnée par chacun de ces éléments, on peut définir deux grandes familles d'antennes :

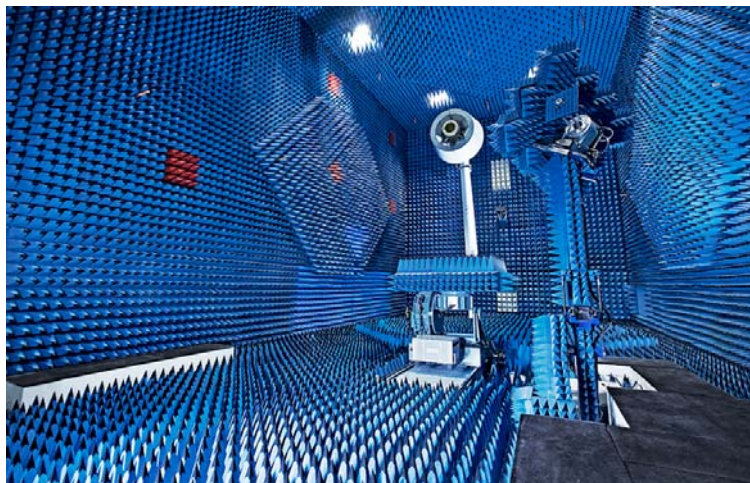
- ✓ Antennes à rayonnement **omnidirectionnel**.
- ✓ Antennes à rayonnement **directionnel**.

- On peut déterminer la directivité d'une antenne en établissant son diagramme polaire :



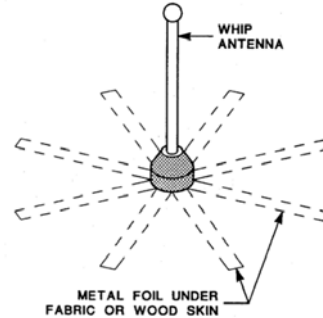
Les antennes

- La mesure du diagramme polaire d'une antenne se déroule dans une chambre anéchoïque :



Les antennes

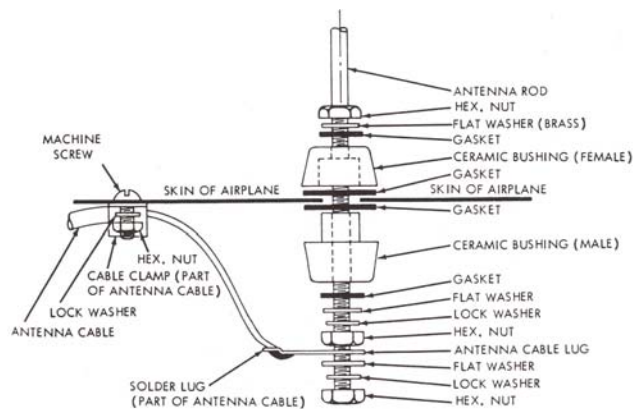
- Un grand nombre d'antennes nécessitent un plan de masse pour rayonner valablement avec un bon rendement.
- Sur les avions métalliques, le revêtement de l'avion assurera le rôle de plan de masse.
- Sur les avions en matériaux composites, il sera nécessaire d'en créer un par métallisation d'une surface par exemple.
- Souvent, des problèmes liés à l'émission ou à la réception proviennent d'un mauvais plan de masse ou d'une mauvaise connexion avec celui-ci.



AC43.13

Les antennes

- Pour installer des antennes sur un aéronef, on se fiera sur la documentation du manufacturier (exemple : SPM).
- Par défaut, on consultera l'AC.43-13.



AC43.13

Les antennes

Les coupleurs d'antennes

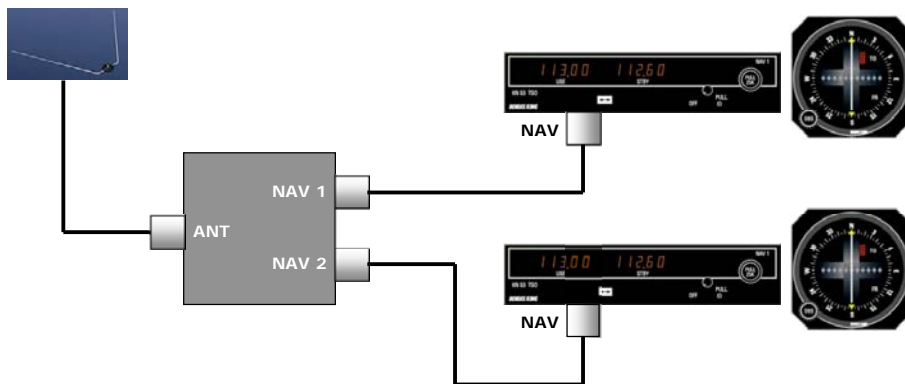
- Dans certains cas, pour éviter une « floraison » d'antennes sur un aéronef, on utilisera une seule antenne alimentant plusieurs récepteurs.
- Dans ce cas, pour adapter les lignes en impédance, on utilisera des diplexeurs, triplexeurs ou quadriplexeurs.



Les antennes

Les coupleurs d'antennes

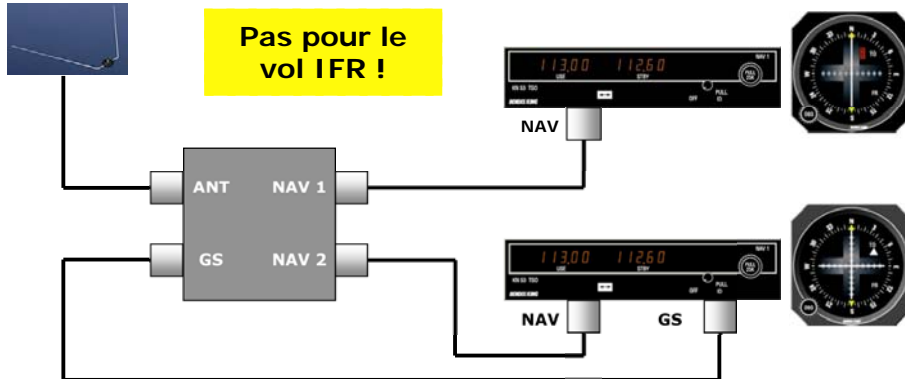
Un « diplexeur » permet de brancher deux récepteurs NAV (VOR-LOC) sur une seule antenne :



Les antennes

Les coupleurs d'antennes

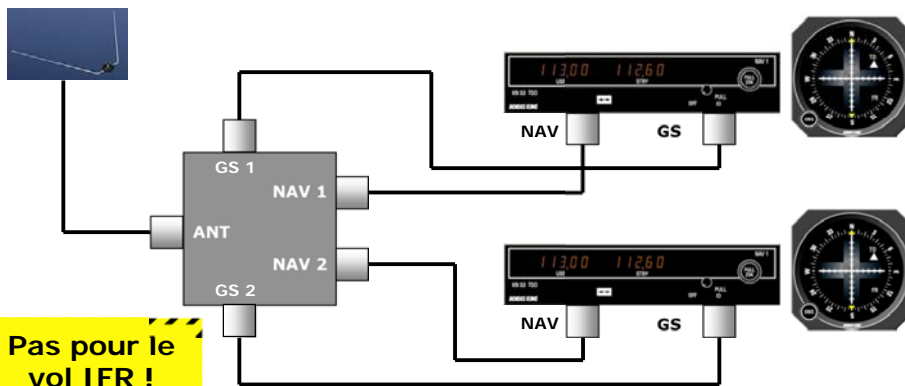
Un « tripleur » permet de brancher deux récepteurs NAV (VOR-LOC) et un Glide Slope sur une seule antenne :



Les antennes

Les coupleurs d'antennes

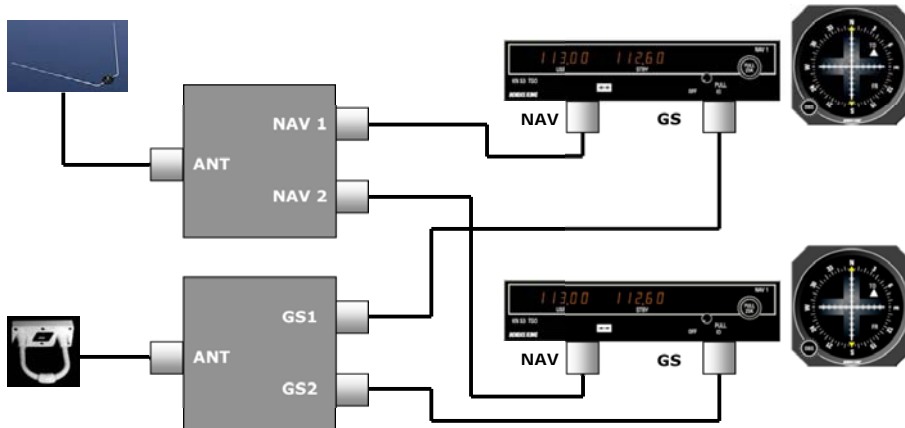
Un « quadripleur » permet de brancher deux récepteurs NAV (VOR-LOC) et deux Glide Slopes sur une seule antenne :



Les antennes

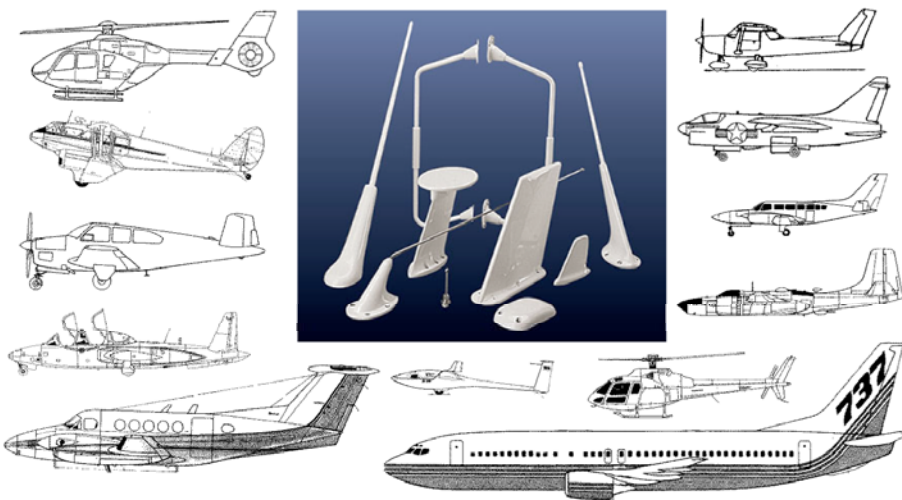
Les coupleurs d'antennes

Pour être certifié pour le vol IFR, il faut deux « diplexeurs » :



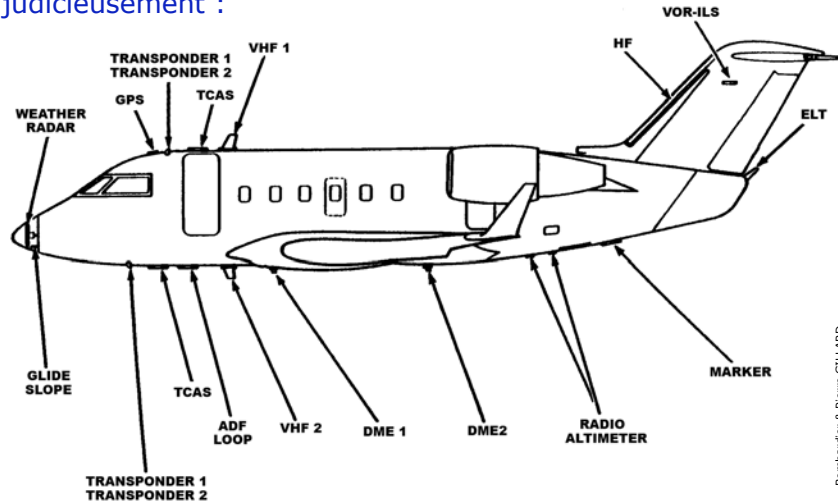
Les antennes

Quelle antenne pour quel aéronef ?



Les antennes

- L'emplacement des antennes sur un aéronef doit être établi judicieusement :



Bombardier & Pierre GILLARD

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Notions élémentaires de propagation des ondes



Photo © Pierre GILLARD/ENMA0162

- Selon la fréquence porteuse utilisée pour une communication radio, la propagation de l'onde pourra être différente.
- On parlera de modes de propagation :

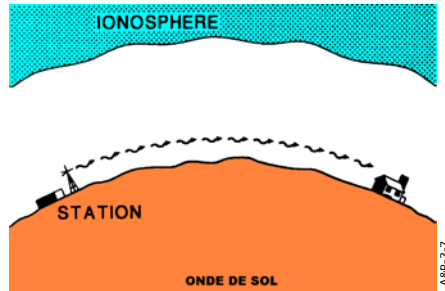
- ✓ Propagation par **ondes de sol**.
- ✓ Propagation par **ondes de ciel**.
- ✓ Propagation par **ondes d'espace**.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Notions élémentaires de propagation des ondes

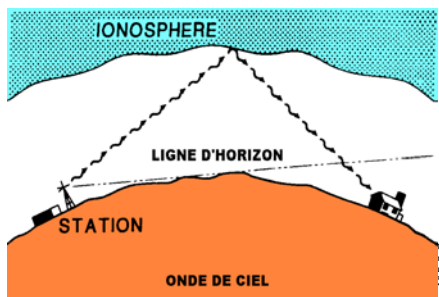
Propagation par ondes de sol



- L'onde électromagnétique suivra la courbure de la terre. La liaison peut donc s'établir entre deux points de la terre au-delà de la ligne d'horizon.
- Les gammes d'ondes concernées sont : VLF, LF et MF (LORAN C, par exemple).

Notions élémentaires de propagation des ondes

Propagation par ondes de ciel



- La couche ionosphérique ceinture la terre à des altitudes variant entre 50 km et 500 km.
- Elle a une influence sur la réflexion des ondes; la réflexion des ondes sur la couche ionosphérique varie avec la saison et le moment de la journée.
- Suivant le moment du jour, on pourra utiliser certaines fréquences pour communiquer avec un point situé au-delà de l'horizon par réflexion de l'onde porteuse.
- Les bandes de fréquences concernées sont : MF, HF et VHF (exemple : communications HF).

Notions élémentaires de propagation des ondes

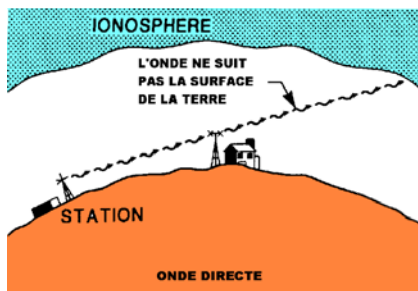
Propagation par ondes de ciel

- En résumé, les communications par ondes de ciel en HF :

- ✓ Sont bien adaptées pour les longues distances (avions au-dessus des océans).
- ✓ Se déjouent des obstacles (montagnes, immeubles, ...)
- ✓ Dépendent des conditions des couches ionosphériques (jour/nuit, saison).
- ✓ Demandent une bonne expérience (exemple : radio-amateurs).
- ✓ Ne peuvent être considérées comme fiables en tout moment.

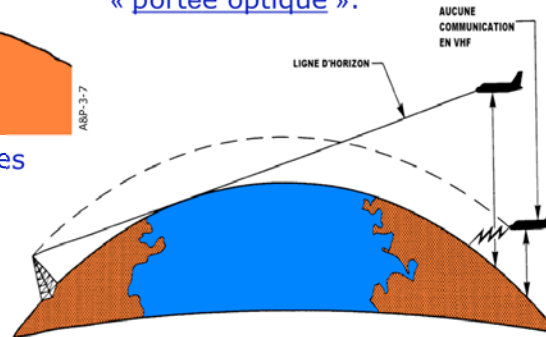
Notions élémentaires de propagation des ondes

Propagation par ondes d'espace (directes)



- Dans ce cas, il n'est plus possible de communiquer avec un point situé au-delà de l'horizon; on parle alors de « portée optique ».

- Les bandes de fréquences concernées sont : VHF, UHF, SHF et EHF (exemple : communications VHF aéronautiques).



ÉNN ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT

Collège Édouard-Montpetit École nationale d'aérotechnique

Notions élémentaires de propagation des ondes

Propagation par ondes d'espace (directes)

- Une règle permet de calculer la portée « D » d'une communication VHF ou UHF connaissant la hauteur « h » d'un aéronef :

The diagram shows a ground station on the left and an aircraft on the right. A line of sight connects them, labeled 'onde VHF ou UHF'. The aircraft's height is indicated by a vertical double-headed arrow labeled 'h (ft)'. The ground range is indicated by a horizontal double-headed arrow labeled 'D (NM)'. A blue box contains the formula $D = 1.25\sqrt{h}$.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ÉNN ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLEGE EDOUARD-MONTPETIT

Collège Édouard-Montpetit École nationale d'aérotechnique

Notions élémentaires de propagation des ondes

Propagation par ondes d'espace (directes)

- En résumé, les communications par ondes d'espaces en VHF et UHF :

- ✓ Ne peuvent être utilisées que pour les courtes distances (à proximité des établissements ATC).
- ✓ Sont perturbées par les obstacles (montagnes, immeubles, ...)
- ✓ Ne dépendent en général pas trop des conditions atmosphériques.
- ✓ Sont simples à utiliser.
- ✓ Peuvent être considérées comme fiables.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Transmissions par câbles coaxiaux

Câbles coaxiaux utilisés en aéronautique

Image : Aircraft Spruce



- De nombreux types de câbles coaxiaux sont utilisés en aéronautique selon l'application.
- Le plus répandu est le RG58C/U (à ne pas confondre avec les variantes du RG59 à 75 Ω).
- Mais on peut aussi avoir du RG400 ayant de meilleures performances ou, encore, des variantes du RG213, tous à 50 Ω .

Toujours consulter les recommandations des fabricants et respecter leurs exigences !

Transmissions par câbles coaxiaux

Connecteurs coaxiaux

Image : Moton Industrial



- Tous les connecteurs coaxiaux sont également adaptés en impédance (exemple : 50 Ω ou 75 Ω).
- Ici aussi, il est opportun de choisir des connecteurs dont les spécifications rencontrent celles émises par les manufacturiers.

- Certains connecteurs coaxiaux sont à sertir, d'autres à souder.

Transmissions par câbles coaxiaux

Connecteurs coaxiaux

- Afin d'éviter toute perte de performance, il est impératif d'effectuer les installations de connecteurs et de câbles coaxiaux avec soin !



Photo : Wikipedia

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Conclusions



- La compréhension des différents modes de propagation est capital lorsque l'on parle de radiocommunication ou de radionavigation.
- La qualité, les dimensions, la forme et l'emplacement des antennes sur un aéronef revêt une importance primordiale si l'on souhaite réaliser une liaison radio fiable.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation



Photo Copyright © Maurice Hendrika

AIRLINERS.NET

Merci de votre attention