

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**Propagation des ondes et antennes**

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

Avant de débiter le cours ...

**Merci !**

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**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.

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**Principes élémentaires de radio**

- Séquence d'une transmission radio :

1. Codage électrique du message.
2. Modulation de la porteuse par le signal contenant le message.
3. Transmission du signal modulé.
4. Propagation du signal modulé.
5. Réception du signal modulé.
6. Démodulation de la porteuse pour en extraire le signal contenant le message.
7. Décodage du message.

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**L'onde électromagnétique**

• Toute onde radio se propage dans l'espace sous forme de deux champs perpendiculaires :

- ✓ Un champ électrique.
- ✓ Un champ magnétique.

- Les deux champs sont électriquement en phase.
- Les deux champs demeurent en phase même s'il y a un changement de fréquence (période) ou de puissance (amplitudes).

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

**L'onde électromagnétique**

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


**Polarisation verticale**      **Polarisation horizontale**

© Département d'Aviation Document 2 des Rqs de Formation


**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 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 ?

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

• 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 1/300 000 000 de seconde.

**Fréquence et longueur d'onde**

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

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

- 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 portées 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 gammes ou bandes de fréquences.

**Fréquence et longueur d'onde**

EHF	30 GHz	Communications - Radar	1mm
SHF	3 GHz	Navigation - Communications - Radar	1cm
UHF	3 MHz	Navigation - Communications	0.1m
VHF	300 MHz	Navigation - Communications	1m
HF	30 MHz	Communications	10m
MF	3 MHz	Navigation	100m
LF	300 kHz	Navigation	1km
VLF	30 kHz	Navigation	10km
	3 kHz	Communications sous-marines	100km

↑ Portée limitée par l'horizon  
↓ Portée non limitée par l'horizon

**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

**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.

**DANGER FRÉQUENCES ÉLEVÉES**

**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.

**DANGER FRÉQUENCES ÉLEVÉES PUISSANCES ÉLEVÉES**

**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 !

**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**.

Le prototype européen sur une plate-forme Eurocopter BK117.

**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**.

... 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
	108-118 MHz	VOR-LOC
VHF 300 MHz	118-137 MHz	VHF-COM (AM)
	144-174 MHz	VHF-HI FM COM

**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)
	2,340 GHz	XM Weather Data
3 GHz	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
EHF	10-30 GHz	SATCOM

**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**.

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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.

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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.

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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.

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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** :

**Exemple d'antenne très directive (radar ATC)**

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**Les antennes**

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

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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** assure 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.

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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**.

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**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**.

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AÉRONAUTIQUE ET D'ASTRONAUTIQUE

**Les antennes**

**Les coupleurs d'antennes**

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

© Département d'Aéronautique Document 2 des Rqs de Formation

**Les antennes**

**Les coupleurs d'antennes**

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

Pas pour le vol IFR !

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**Les antennes**

**Les coupleurs d'antennes**

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

Pas pour le vol IFR !

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**Les antennes**

**Les coupleurs d'antennes**

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

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**Les antennes**

**Quelle antenne pour quel avion ?**

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**Les antennes**

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

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**Notions élémentaires de propagation des ondes**

- 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'aéronautique Document à des fins de formation

**Notions élémentaires de propagation des ondes**

**Propagation par ondes de sol**

- L'onde électromagnétique **suivre 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).

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**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 : **ME, HF et VHF** (exemple : communications HF).

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**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.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**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, SHE et EHF** (exemple : communications VHF aéronautiques).

© Département d'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**Notions élémentaires de propagation des ondes**

**Propagation par ondes d'espace (directes)**

• Une règle permet de calculer la portée  $\ll D \gg$  d'une communication **VHF** ou **UHF** connaissant la hauteur  $\ll h \gg$  d'un aéronef :

© Département d'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**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'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**Transmissions par câbles coaxiaux**

**Câbles coaxiaux utilisés en aéronautique**

• 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 manufacturiers et respecter leurs exigences !**

© Département d'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**Transmissions par câbles coaxiaux**

**Connecteurs coaxiaux**

• 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.

© Département d'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**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 !

© Département d'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**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'Aéronautique Document 2 des IRS de formation

**ENNA** ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

**Merci de votre attention**

© Département d'Aéronautique Document 2 des IRS de formation