

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION



Notions de propagation et de rayonnement des ondes

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

Avant de débiter le cours ...



Merci !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

Présentation du cours



- Introduction.
- L'onde électromagnétique.
- Fréquence et longueur d'onde.
- Les gammes de fréquences.
- Les dangers des ondes radio.
- Transmission des ondes radio.
- Transmissions par câbles coaxiaux.
- Adaptation d'impédance et ROS.
- Les antennes.
- La propagation des ondes électromagnétiques.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

Introduction



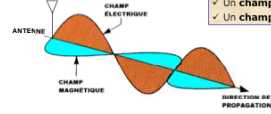
- Les ondes radio font partie de notre quotidien au point que l'on est souvent inconscient de leur existence car elles sont invisibles.
- Les ondes radio servent à de nombreuses fonctions : vous devriez être en mesure d'énumérer plusieurs dizaines d'exemples.
- Leur étude en profondeur ainsi que leur propagation dans différents milieux sont complexes.
- Les ondes radio peuvent être néfastes à la santé.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

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'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

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.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

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 $1/300.000.000^{\text{e}}$ de seconde.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

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.

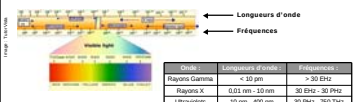
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION

Les bandes de fréquences

• Les ondes électromagnétiques s'étendent de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

• On peut ainsi définir le spectre des fréquences :



Centre	Longueur d'onde	Fréquence
Rayons Gamma	< 27 pm	> 30 EHz
Rayons X	0,01 nm - 10 nm	30 EHz - 30 PHz
Ultraviolets	10 nm - 400 nm	30 PHz - 750 THz
Visible	380 nm - 780 nm	770 THz - 385 THz
Infrarouges	780 nm - 1 mm	400 THz - 300 GHz
Micro-ondes	0,1 mm - 30 cm	3000 GHz - 1 GHz
Ondes radio	0 mm - 100 km	300 GHz - 3 kHz

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les bandes de fréquences

- Si l'on considère maintenant exclusivement les ondes électromagnétiques propres à la transmission radio, les fréquences porteuses sont positives et s'étendent de 3 KHz à 300 GHz.
- Actuellement, les technologies de pointe permettent d'atteindre des fréquences radio jusqu'à quelques centaines de gigahertz environ.
- On a l'habitude de classer les fréquences en gammes ou bandes de fréquences.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les bandes de fréquences

EHF	300 GHz	1mm
	30 GHz	1cm
SHF	3 GHz	0.1m
UHF	300 MHz	1m
VHF	30 MHz	10m
HF	3 MHz	100m
MF	300 kHz	1km
LF	30 kHz	10km
VLF	3 kHz	100km

Portée limitée par l'horizon (pour les hautes fréquences)
Portée non limitée par l'horizon (pour les basses fréquences)

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les bandes de fréquences

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

Les bandes de fréquences

Le spectre de fréquences au Canada :

Attribution des fréquences radioélectriques au Canada

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Dangers des ondes radio

- Les ondes électromagnétiques ne sont pas exemptes de dangers.
- 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 radar altimétrique, le MLS (Micro Wave Landing System), le radar Doppler, le radar météo, etc.

DANGER FRÉQUENCES ÉLEVÉES

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Dangers des ondes radio

- 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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Dangers des ondes radio

Le Centre international de Recherche sur le Cancer (OMS) a classé les ondes électromagnétiques dans les radiofréquences dans la catégorie 2B « peut-être cancérogène pour l'homme ».

MONOGRAPHIES DU CIRC SUR L'IDENTIFICATION DES DANGERS CANCÉROGÈNES POUR L'HOMME

Group	Exposition	Conclusion
Group 1	Exposition au rayonnement ionisant	Cancérogène pour l'homme
Group 2A	Exposition au rayonnement non ionisant	Probablement cancérogène pour l'homme
Group 2B	Exposition au rayonnement non ionisant	Peut-être cancérogène pour l'homme
Group 3	Exposition au rayonnement non ionisant	Non classé

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Dangers des ondes radio

Réflexion quant aux dangers des ondes électromagnétiques :

700, 800, 900, 1800, 2100 et 2600 MHz 4G

2,4 GHz

3,5 GHz 5G

5 GHz

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Transmissions des ondes radio

Il existe différents procédés pour acheminer une onde radio RF d'un point à un autre :

- Par câble : Coaxial 50 Ω ou 75 Ω ; Flat Twin = 300 Ω ;
- Par ligne imprimée :
- Par guide d'onde :

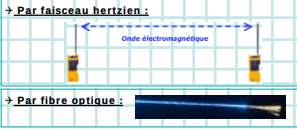
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions des ondes radio

- Il existe **différents procédés** pour acheminer une **onde radio RF** d'un point à un autre :

- **Par faisceau hertzien** :



- **Par fibre optique** :



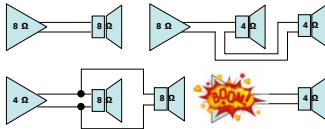
© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Impédance caractéristique

- En **électronique**, on doit toujours veiller à **adapter l'impédance de la charge** avec celle **de la source** afin de **maximiser le transfert de puissance** et le **rendement**.
- Exemple** : audio.



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

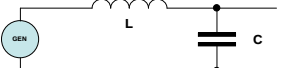
Transmissions par câbles coaxiaux

Impédance caractéristique

- Considérons une **ligne ouverte** de longueur **infinie** :



- Si on **néglige** son aspect **résistif**, son **schéma équivalent** est :



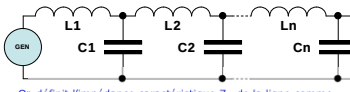
© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Impédance caractéristique

- En réalité, nous avons une **succession de cellules élémentaires LC** qui se suivent tout au long de la ligne :



- On définit l'**impédance caractéristique Zc** de la ligne comme étant :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

La fréquence n'a donc pas d'influence sur l'impédance caractéristique

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Impédance caractéristique

- L'**impédance caractéristique Zc** d'un câble coaxial peut aussi être déterminée par ses **dimensions physiques** ainsi que par le **diélectrique isolant** les deux conducteurs :



$$Z_c = \frac{138,2}{\sqrt{\epsilon}} \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)$$

Zc : impédance (Ω)
ε : constante diélectrique

- Les **impédances caractéristiques** usuelles des **câbles coaxiaux** sont : **50 Ω**, **75 Ω** et **95 Ω**.
- En **radiocommunication aéronautique**, on utilisera du câble coaxial à **50 Ω**.

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Atténuation

- Jusqu'à présent, nous avons **négligé la résistance des conducteurs** ainsi que les **pertes** dans le **diélectrique**.
- Par ailleurs, les **courants à hautes fréquences** ont tendance à se concentrer **aux extrémités** des conducteurs; c'est ce que l'on appelle « **l'effet pelliculaire** ».

On constate que la résistance d'un conducteur augmente proportionnellement avec la racine carrée de la fréquence.

- Il existe donc une **atténuation constante** exprimée pour une **fréquence donnée** par **unité de longueur** de câble; celle-ci est qualifiée en **dB/j** ou en **dB/m**.
- Certains câbles sont dits « à faible perte (Low Loss) », mais ils sont **plus chers** que les câbles standards.

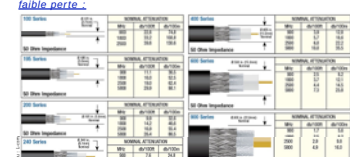
© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Atténuation

- Exemples d'atténuations pour une gamme de câbles coaxiaux à faible perte** :



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Coefficient de vélocité

- La **vitesse de propagation** d'une **onde électrique** dans un **câble coaxial** n'est pas équivalente à celle de la propagation d'une **onde électromagnétique** dans le **vide** (vitesse de la lumière).
- On définit le **coefficient de vélocité** comme étant l' de la **racine carrée de la constante diélectrique** de l'**isolant** :

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}}$$

Cv : coefficient de vélocité
ε : constante diélectrique

- La **vitesse de propagation** de l'**onde électrique** dans un **câble coaxial** est donc :

$$V_p = C_v \cdot C$$

Vp : vitesse de propagation (m/s)
C : vitesse de la lumière (m/s)

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Coefficient de vélocité

- Exemples de coefficients de vélocité pour différents types de matériaux isolants** :



- Le **coefficient de vélocité** du **câble RG58** le plus couramment utilisé (50 Ω) est **0,66**.
- En général, la propagation d'une **onde** dans un **câble coaxial** est en **mode électrique et magnétique transverse (TEM)**.
- Dans le domaine des **hyperfréquences**, il peut y avoir d'**autres formes de modes de propagation** et, dès lors, le **coefficient de vélocité** dépendra de la **fréquence**.

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

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 fabricants et respecter leurs exigences !

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

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

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Transmissions par câbles coaxiaux

Connecteurs coaxiaux

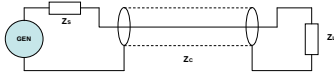
- Afin d'éviter toute perte de performance, il est impératif d'effectuer les installations de connecteurs et de câbles coaxiaux avec soin !



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS



- En théorie, pour que la transmission d'une onde par câble soit optimale d'un point de vue du rendement (transfert de puissance maximum), il faut que :

$Z_s = Z_c = Z_L$

- Voyons maintenant comment ceci s'applique en radiocommunication aéronautique ...

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

- Pour qu'une antenne rayonne ou reçoive correctement, nous verrons que sa taille sera liée à la longueur d'onde de la fréquence émise ou reçue.
- Une antenne doit également être adaptée en impédance.
- De manière standard, en aviation, on utilisera des antennes adaptées à 50 Ω.
- Ceci signifie que les connecteurs et les câbles ainsi que tous les accessoires divers placés dans la ligne doivent aussi être adaptés à 50 Ω.

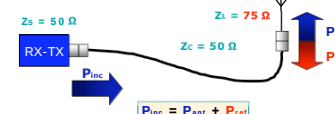


© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

- Une antenne mal adaptée provoquera une réflexion d'une partie de la puissance qu'elle est sensée rayonner.



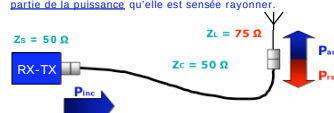
- On dispose de deux indices pour évaluer la qualité de l'adaptation d'un système : le coefficient de réflexion Γ , ainsi que le ROS (rapport d'onde stationnaire ou SWR-Standing Wave Ratio, ou encore, VSWR-Voltage Standing Wave Ratio).

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

- Une antenne mal adaptée provoquera une réflexion d'une partie de la puissance qu'elle est sensée rayonner.



$P_{inc} = P_{ant} + P_{ref}$

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} = \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{inc}}}$$

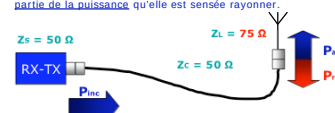
$$ROS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \text{ou} \quad ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{inc} + V_{ref}}{V_{inc} - V_{ref}}$$

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

- Une antenne mal adaptée provoquera une réflexion d'une partie de la puissance qu'elle est sensée rayonner.



$P_{inc} = P_{ant} + P_{ref}$

- On peut également définir le TOS (taux d'onde stationnaire) selon la relation ci-contre :

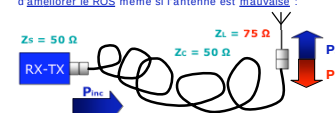
$TOS = 100 + \frac{ROS - 1}{ROS + 1}$

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

- Vu de l'émetteur, un long câble d'antenne donnera l'impression d'améliorer le ROS même si l'antenne est mauvaise !



- En effet, tant de la puissance incidente que de la puissance réfléchie sont perdues dans le long fil.
- Ceci donne l'illusion que le ROS est meilleur.
- On mesure donc le ROS d'une antenne le plus proche de celle-ci !

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

Mesure du ROS

- **Étape 1 :** mesure de la **puissance incidente** :



- **Étape 2 :** mesure de la **puissance réfléchie** :



- **Étape 3 :** **calculs** :

$$ROS = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Adaptation d'impédance et ROS

Mesure du ROS



- Pour faire du **dépannage** ou de l'**investigation**, le technicien avionique pourra utiliser un petit « SWR Meter » de **radio-amateur** couvrant également la **bande VHF aviation**.
- Il s'agit d'un accessoire **pas onéreux** qui peut rendre d'immenses **services** !

© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Rôle d'une antenne



- Lorsqu'une **onde** circulant dans un **câble** atteint une **antenne**, une **onde électromagnétique** est **produite**.
- Lorsqu'une **onde électromagnétique** frappe une **antenne**, un **signal électrique** est produit; celui-ci, bien que beaucoup plus faible, est semblable à celui qui a été émis à l'origine.
- Une antenne fonctionne donc « dans les deux sens » : en **émission** (TX) et en **réception** (RX).
- Une **antenne** est donc toujours l'**interface** entre un **signal électrique** et une **onde électromagnétique**.

© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Les caractéristiques des antennes

- On peut **caractériser** une **antenne** par les **paramètres** suivants :



- Constitution, forme et dimensions mécaniques.
- Polarisation.
- Diagramme de rayonnement.
- Impédance.
- Gain.
- Bande passante.
- Pertes.

© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Polarisation des antennes

- Nous avons vu qu'une **onde électromagnétique** était constituée d'un **champ électrique** **perpendiculaire** à un **champ magnétique**.
- A l'**émission**, l'onde électromagnétique se **propagera** d'une **façon bien précise** : selon la **polarisation de l'antenne**.



- La **polarisation de l'antenne** sera donnée par la **direction du champ électrique**; ce sera également la **direction de l'orientation physique de l'antenne**.

© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

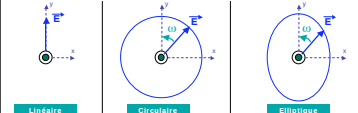
ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Polarisation des antennes

- Il existe **quatre types** de **polarisations** :

- Polarisation **verticale** (linéaire).
- Polarisation **horizontale** (linéaire).
- Polarisation **circulaire**.
- Polarisation **elliptique**.



© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Polarisation des antennes

- Dans le cas d'une **polarisation circulaire** ou **elliptique**, la **propagation de l'onde électromagnétique** en **rotation** peut avoir lieu tant dans le **sens horaire** (**dextrogyre**) que dans le **sens anti-horaire** (**lévogyre**) :



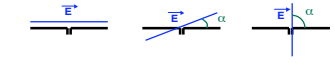
© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Polarisation des antennes

- Pour être **efficace**, on dit que la **polarisation de l'antenne de réception** doit être **identique** à celle de l'**antenne d'émission**.
- Toutefois, ceci a **moins d'importance** dans **certaines gammes d'ondes** comme les **HF** où il existe des **rotations de phase** lors de la **propagation**.
- Exemple sur un **dipôle** à **polarisation horizontale** :



© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les antennes

Polarisation des antennes

- On peut définir le **facteur de perte de polarisation** (PLF-Polarization Loss Factor) comme étant :

$$PLF_{(dB)} = 10 \times \log(\cos^2 \alpha)$$

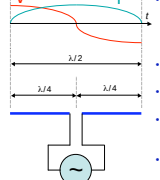
α (°)	PLF (dB)	α (°)	PLF (dB)
0	0	50	-3.8
5	-0.03	60	-6
10	-0.13	70	-9.3
20	-0.54	80	-15.2
30	-1.25	85	-21.1
45	-3	90	=

© Département d'Avionique Document 4 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Dipôle de Hertz (doublet)



- Un dipôle de Hertz est constitué de **deux conducteurs** correspondant chacun à un **quart de la longueur d'onde** de la fréquence à **émettre** ou à **recevoir**.
- Ces deux conducteurs sont **alignés** dans le **même plan**.
- Le dipôle est équivalent à un **circuit résonnant**.
- À la fréquence de **résonance**, le dipôle correspond à une **résistance pure** de **73 Ω**.
- La **tension** et le **courant** dans les deux conducteurs correspondent à une **demi-période**.

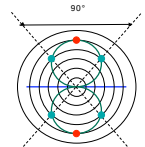
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Dipôle de Hertz (doublet)

- Du fait de la configuration des **champs électrique** et **magnétique** du dipôle, le **rayonnement** de l'antenne est **directionnel** :



- Points de rayonnement **maximum**
- Points à **- 3dB** par rapport au rayonnement maximum

En trois dimensions, le diagramme de rayonnement a l'allure d'un « beigne ».

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Monopôle de Marconi



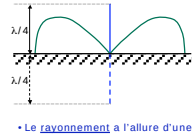
- Le **monopôle de Marconi** est un **conducteur** correspondant à un **quart de la longueur d'onde** de la fréquence à **émettre** ou à **recevoir**.
- Ce **conducteur** est placé **perpendiculairement** à un **plan de masse**.
- Le **plan de masse** « fait croire » à l'onde électromagnétique qu'il s'agit d'une **antenne demi-onde**.
- En effet, le **plan de masse** a un « **effet de miroir** » pour l'antenne et crée une **antenne image**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Monopôle de Marconi



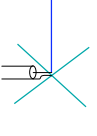
- Le **monopôle de Marconi** est un **conducteur** correspondant à un **quart de la longueur d'onde** de la fréquence à **émettre** ou à **recevoir**.
- Ce **conducteur** est placé **perpendiculairement** à un **plan de masse**.
- Le **rayonnement** a l'allure d'une « **cuvette** » et est **omnidirectionnel** dans le **plan horizontal**.
- Théoriquement, **aucune onde** ne se **propage** selon l'**axe de l'antenne**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Monopôle de Marconi



- Le **conducteur** (élément radiateur) est connecté à l'âme du **câble coaxial**.
- Les **radiants** constituant le **plan de masse** sont connectés au **blindage** du **câble coaxial**.
- Naturellement, un **monopôle de Marconi** est une antenne à **polarisation verticale**.
- Ce type d'antenne est utilisé en **aéronautique** pour les **radiocommunications VHF** et **UHF** ainsi que pour les **transpondeurs** et **DME**.
- C'est le **revêtement en alliage d'aluminium** de l'**aéronef** qui, en général, fait office de **plan de masse**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Monopôle de Marconi



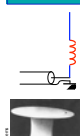
- Théoriquement, l'**impédance** d'un **monopôle de Marconi** correspond à la **moitié** de celle d'un **dipôle de Hertz**, soit environ **36,5 Ω**.
- Une manière d'**adapter l'impédance** à une valeur proche de **50 Ω** consiste à **orienter les radiants** du **plan de masse** vers le **bas**.
- On trouve ce type d'antenne pour les **communications VHF** **aéronautiques au sol** (tours de contrôle, etc.)

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Monopôle de Marconi



- Dans le cas d'une **antenne quart d'onde** devant fonctionner à **plus basse fréquence** (exemple : **CB** à **27 MHz**), on peut **réduire la taille de l'antenne** en **insérant une bobine** dans l'**élément radiateur**. Souvent, cette bobine sert également de **ressort mécanique** pour l'antenne.
- Il existe aussi des **antennes à 5/8 d'onde** : on les trouve souvent sur des **véhicules** car elles permettent d'avoir une **meilleure portée** à **proximité du sol**.
- Certaines antennes ont un « **chapeau** » : il s'agit, en fait, d'une **charge capacitive** permettant de **réduire la fréquence de résonance** de l'antenne et par le fait même, la **longueur** de l'antenne.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement



- Suivent 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**.

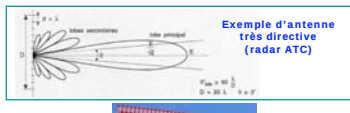
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

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



Exemple d'antenne très directive (radar ATC)

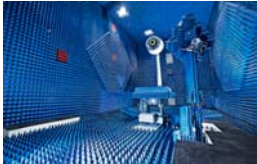
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

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



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

- On peut également effectuer des essais en milieu ambiant :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Le gain d'une antenne

- Le gain (passif) d'une antenne est le rapport entre la puissance rayonnée dans le lobe principal de cette antenne et la puissance rayonnée par une antenne de référence dans les mêmes conditions.
- L'antenne de référence peut être :
 - Une antenne isotrope (fictive) rayonnant uniformément dans toutes les directions.
 - Le gain de l'antenne isotrope est unitaire et correspond donc à 0 dB.
 - Dans la pratique, une antenne isotrope n'existe pas et on utilisera donc une antenne dipôle ayant un gain théorique de 2,14 dB.
 - On parlera, alors, de dBd.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Le gain d'une antenne

- On peut aussi définir le gain en puissance d'une antenne comme étant le rapport entre la puissance rayonnée (P_{ray}) dans le lobe principal par rapport à la puissance injectée (P_{in}) à l'antenne.
- Le gain en puissance s'exprime en décibels :

$$dB = 10 * \log \frac{P_{ray}}{P_{in}}$$

- Une antenne directive peut effectivement avoir un gain en puissance car l'énergie fournie par l'émetteur (P_{in}) est entièrement concentrée dans la direction principale de propagation de l'onde électromagnétique.

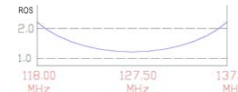
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

La bande passante d'une antenne

- Une antenne étant taillée et adaptée pour une fréquence bien précise verra son VSWR s'accroître dès que l'on s'éloigne de cette fréquence.
- Exemple : antenne VHF-COM d'aéronef.



- On définit donc une bande passante pour laquelle le ROS de l'antenne demeure dans des valeurs acceptables.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Les antennes

Exemple de caractéristiques d'une antenne VHF-COM

Convert CI 175
VHF Intercom
Modèle Convert (Type 175) 175



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques



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

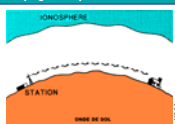
- ✓ Propagation par ondes de sol.
- ✓ Propagation par ondes de ciel.
- ✓ Propagation par ondes d'espace.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de sol



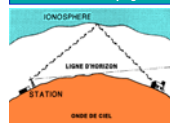
- L'onde électromagnétique suivra la courbure de la terre. La liaison peut donc s'établir entre deux points de la terre au-delà de la ligne d'horizon.
- Les gammes d'ondes concernées sont : VLF, LF et MF (LORAN C, par exemple).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

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).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

- Certaines conditions s'appliquent pour obtenir une réflexion de l'onde émise sur la couche ionosphérique :
- Un angle minimum d'incidence sinon l'onde passe à travers la couche ionosphérique (onde 6).
- Un angle maximum d'incidence sinon l'onde n'est pas réfléchi vers la terre et ne passe pas non plus à travers la couche ionosphérique (onde 1).

En fonction des conditions précédentes, pour une fréquence donnée, il existe une distance minimale à l'intérieur de laquelle il n'y a aucune réception possible par onde de ciel.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

- Pour certaines points de réception d'un signal transmis par onde de ciel, on reçoit :
- Une onde réfléchi une fois par la couche ionosphérique.
- Une onde réfléchi plus d'une fois par la couche ionosphérique.
- Compte tenu des parcours différents, la phase des différents signaux reçus n'est pas la même.
- Elle n'est pas constante et varie en fonction du temps.
- On observe alors le phénomène d'évanouissement (Fading).
- Le signal reçu augmente ou diminue en fonction de la phase des différents signaux réfléchis.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

- En fonction de ce qui a été vu précédemment, on peut voir :
- Qu'il existe une distance maximale pour un saut simple.
- Qu'il y a aussi une distance minimale pour qu'un saut double commence.
- Il se peut, dès lors qu'un récepteur se situant entre ces deux distances limites ne reçoive AUCUN SIGNAL !

Il se trouve dans « un trou noir »

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

- Les couches ionosphériques ne sont pas fixes : elles se déplacent continuellement pendant le jour et selon les saisons.
- La différence la plus marquée se situe entre le jour et la nuit à cause de la différence d'activité du soleil.
- Cette différence a une influence sur la réflexion des signaux de telle sorte qu'une réception par couche ionosphérique correcte, pendant le jour peut être interrompue le soir et vice-versa.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

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'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

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 EHE (exemple : communications VHF aéronautiques).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

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 :

$$D = 1.25 \sqrt{h}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

La propagation des ondes électromagnétiques

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

ENNA École Nationale Supérieure d'Avionique

Merci de votre attention

© Département d'avionique Document à des fins de formation