ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

© Pierre GILLARD/2010-14262

Notions de propagation et de rayonnement des ondes

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Avant de débuter le cours …

Merci !

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Présentation du cours

Photo © Pierre GILLARD/2015-407867

- 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*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Introduction

Photo : auteur inconnu

- 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.

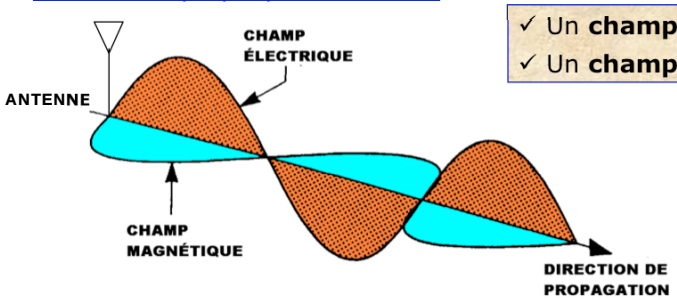
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'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'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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.

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Fréquence et longueur d'onde

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

$$\lambda = \frac{3.10^8}{300.10^6} = 1m$$

- 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 1/300.000.000e de seconde.

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Fréquence et longueur d'onde

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

$$\lambda = \frac{3.10^8}{118.10^6} = 2.542m$$

- 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.

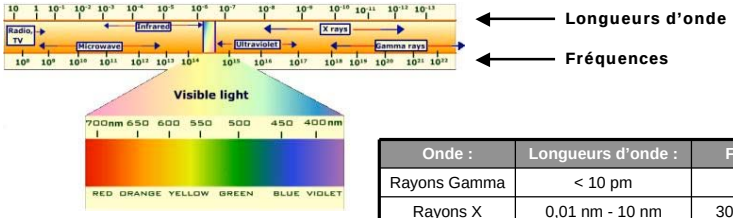
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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 :

Image : TutorVista



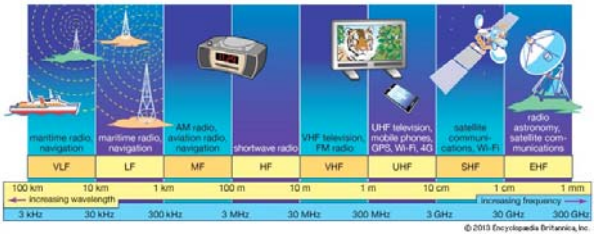
Onde :	Longueurs d'onde :	Fréquences :
Rayons Gamma	< 10 pm	> 30 EHz
Rayons X	0,01 nm - 10 nm	30 EHz - 30 PHz
Ultraviolets	10 nm - 400 nm	30 PHz - 750 THz
Visibles	390 nm - 780 nm	770 THz - 385 THz
Infrarouges	750 nm - 1 mm	400 THz - 300 GHz
Micro-ondes	0,1 mm - 30 cm	3000 GHz - 1 GHz
Ondes radio	1 mm - 100 Km	300 GHz - 3 KHz

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les bandes de fréquences

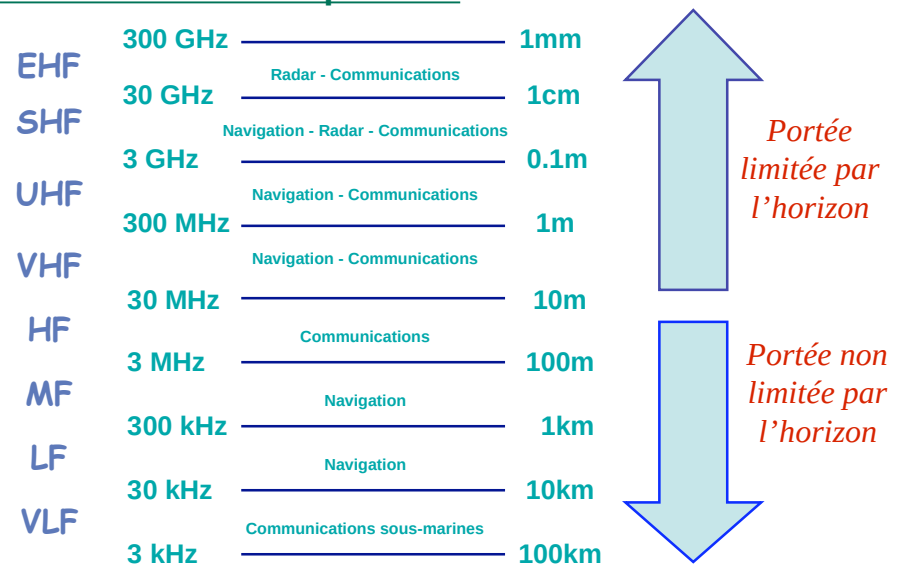
- Si l'on considère maintenant exclusivement les ondes électromagnétiques propices à la transmission radio, les fréquences porteuses sont positives et s'étendent de 3 KHz à 300 GHz.
- Actuellement, les technologies de pointe permettent d'atteindre des fréquences radio jusqu'à quelques centaines de gigahertz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



© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les bandes de fréquences



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les bandes de fréquences

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

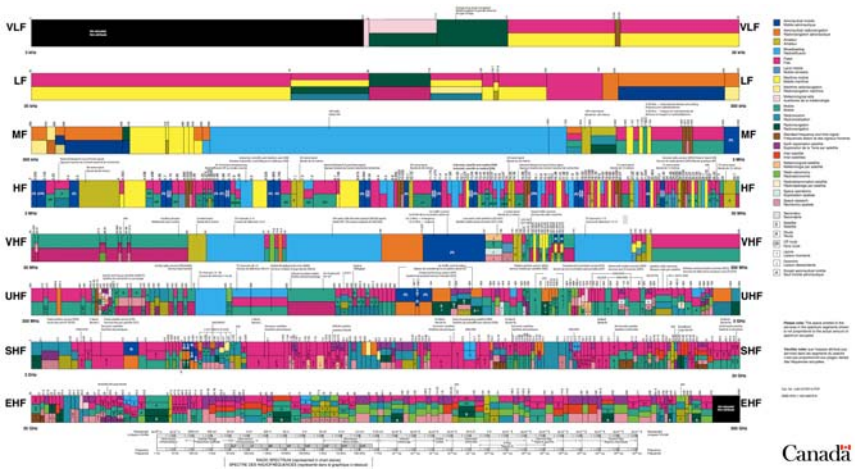
Dénomination de la bande	*Fréquences*	*Longueurs d'ondes*
L-band	1 GHz – 2 GHz	30 cm – 15 cm
S-band	2 GHz – 4 GHz	15 cm – 7.5 cm
C-band	4 GHz – 8 GHz	7.5 cm – 3.75 cm
X-band	8 GHz – 12.5 GHz	3.75 cm – 2.4 cm
Ku-band	12.5 GHz – 18 GHz	2.4 cm – 1.67 cm
K-band	18 GHz – 26.5 GHz	1.67 cm – 1.1 cm
Ka-band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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les bandes de fréquences

- Le spectre de fréquences au Canada:



Attribution des fréquences radioélectriques au Canada

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Dangers des ondes radio

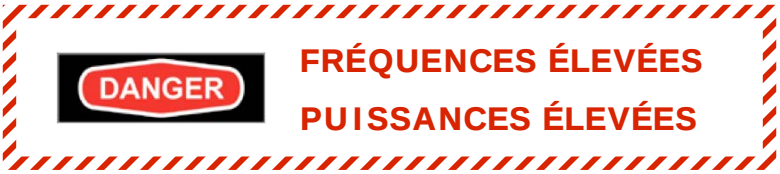
- Les ondes électromagnétiques ne sont pas exemptes de dangers.
- Il est bon de savoir qu'elles peuvent être **très néfastes pour la santé** (risque très sérieux de cancer ou de brûlures).
- Les principaux systèmes aéronautiques classés dans la gamme des micro-ondes pouvant présenter un danger sont :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

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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.



© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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 1	L'agent est *cancérogène pour l'Homme*
Group 2A	L'agent est *probablement cancérogène pour l'Homme*
Group 2B	L'agent est *peut-être cancérogène pour l'Homme*
Group 3	L'agent est *inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'Homme*

Processed meat (consumption of)	1	114	2018	
Proflavine salts	3	24, Sup 7	1987	
Progestins	2B	Sup 7	1987	
Progestogen-only contraceptives	2B	72	1999	
Pulse and power-frequency electromagnetic fields	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
Radiofrequency electromagnetic fields	2B	102	2013	
Radioiodines, including iodine-131	1	78, 100D	2012	
Radionuclides, alpha-particle-emitting, internally deposited	1	78, 100D	2012	NB: Specific radionuclides for which there is sufficient evidence in humans are also listed individually as Group 1 agents
Radionuclides, beta-particle-emitting, internally deposited	1	78, 100D	2012	NB: Specific radionuclides for which there is sufficient evidence in humans

Capture d'écran : CIRC

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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*

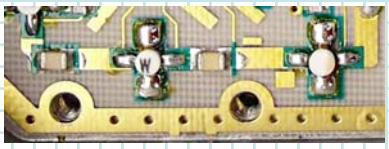
ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Transmissions des ondes radio

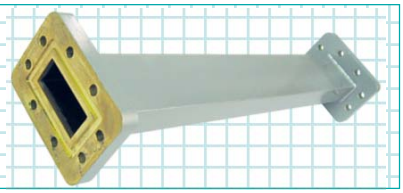
- Il existe différents procédés pour acheminer une onde radio RF d'un point à un autre :

✈ **Par câble :** *Coaxial 50 Ω ou 75 Ω :* *« Flat Twin » 300 Ω :*

✈ **Par ligne imprimée :**



✈ **Par guide d'onde :**



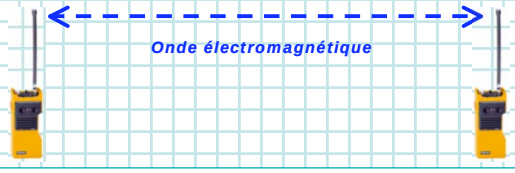
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 :**

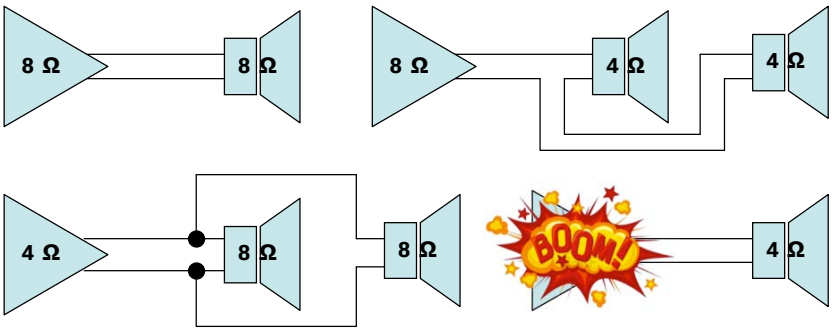
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 maximaliser le transfert de puissance et le rendement.
- *Exemple :* audio.



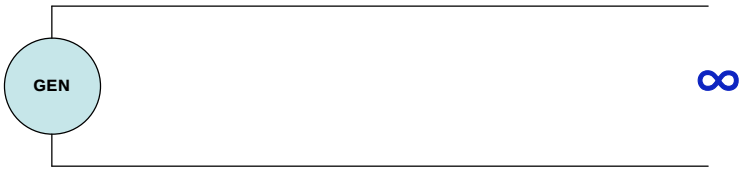
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

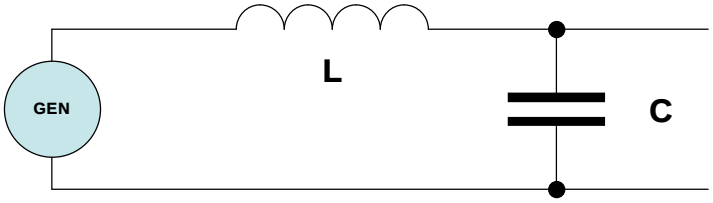
Transmissions par câbles coaxiaux

Impédance caractéristique

- Considérons une ligne ouverte de longueur infinie :



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



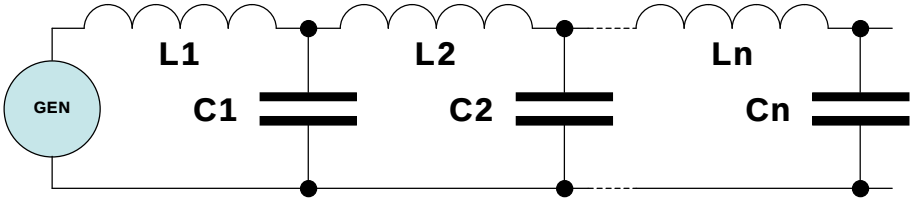
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 Z_C de la ligne comme étant :

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

L : *inductance (H/m)*

C : *capacité (F/m)*

Zc *: impédance (Ω)*

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

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Transmissions par câbles coaxiaux

Impédance caractéristique

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

Image : Axon

$$Z_C = \frac{138{,}2}{\sqrt{\varepsilon}} * \log_{10}\left(\frac{D}{d}\right)$$

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*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Transmissions par câbles coaxiaux

Atténuation

- Jusqu'à présent, nous avions négligé la résistance des conducteurs ainsi que les pertes dans le diélectrique.
- Par ailleurs, les courants à hautes fréquences ont tendance à ce 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 quantifiée en dB/ft ou en dB/m.
- Certains câbles sont dits « à faible perte (*Low Loss*) », mais ils sont plus chers que les câbles standards.

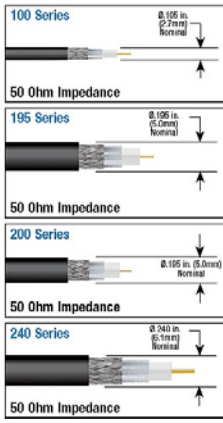
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Transmissions par câbles coaxiaux

Atténuation

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

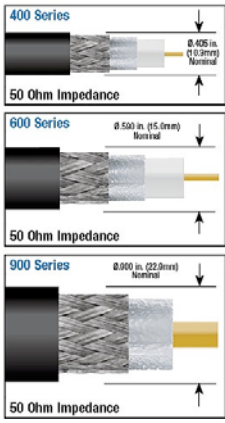


100 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	22.8	74.8
	1800	33.2	108.8
	2500	39.8	130.6

195 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	11.1	36.5
	1800	16.0	52.5
	2500	19.0	62.4
	5800	29.9	98.1

200 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	9.9	32.6
	1800	14.2	46.6
	2500	16.9	55.4
	5800	26.4	86.5

240 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	7.6	24.8
	1800	10.9	35.6
	2500	12.9	45.4
	5800	20.4	66.8



400 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	3.9	12.8
	1800	5.7	18.6
	2500	6.8	22.2
	5800	10.8	35.5

600 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	2.5	8.2
	1800	3.7	12.1
	2500	4.4	14.5
	5800	7.3	23.8

900 Series	NOMINAL ATTENUATION		
	MHz	db/100ft	db/100m
	900	1.7	5.6
	1800	2.5	8.2
	2500	2.9	9.8
	5800	4.9	16.0

Tableau : L-com

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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'inverse de la racine carrée de la constante diélectrique de l'isolant :

$$C_V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$$

Cv *: coefficient de vélocité*

ε *: constante diélectrique*

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

$$V_P = C_V * C$$

Vp *: vitesse de propagation (m/s)*

C*: vitesse de la lumière (m/s)*

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Transmissions par câbles coaxiaux

Coefficient de vélocité

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

Tableau : Wikipedia

Matériau	Coefficient de vélocité
coaxial polyéthylène plein	0,66
coaxial polyéthylène aéré	0,82 environ
coaxial teflon	0,70
circuit imprimé époxy	0,55 environ

- 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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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 manufacturiers et respecter leurs exigences !

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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.

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Transmissions par câbles coaxiaux

Connecteurs coaxiaux

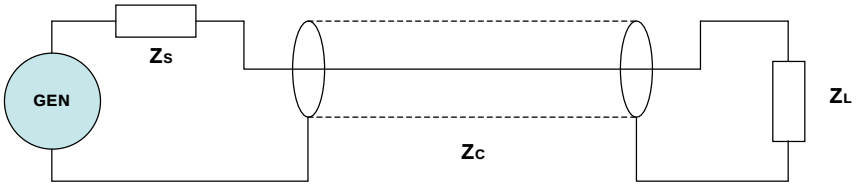
- Afin d'éviter toute perte de performance, il est impératif d'effectuer les installations de connecteurs et de câbles coaxiaux avec soin !

Photo : Wikipedia

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Adaptation d'impédance et ROS

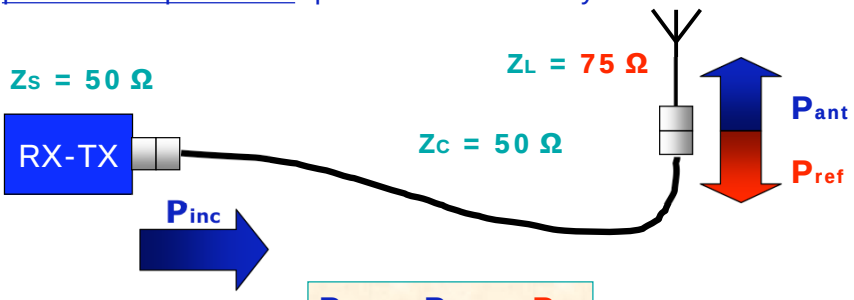
- Pour qu'une antenne rayonne ou reçoive correctement, nous verrons que sa taille sera liée à la longueur d'onde de la fréquence émise ou reçue.
- Une antenne doit également être adaptée en impédance.
- De manière standard, en aviation, on utilisera des antennes adaptées à 50 Ω.
- Ceci signifie que les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

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Adaptation d'impédance et ROS

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



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

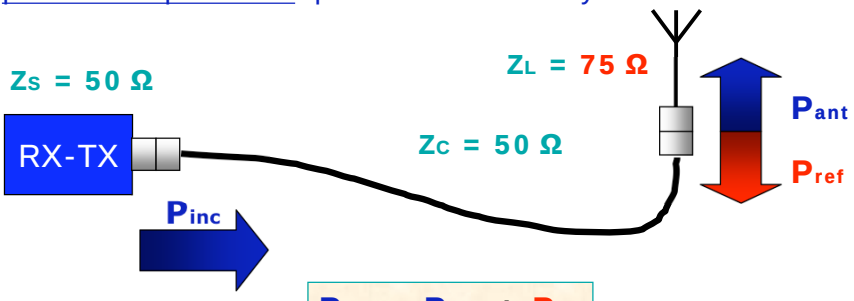
- On dispose de deux indices pour évaluer la qualité de l'adaptation d'un système : le coefficient de réflexion Γ ainsi que le ROS (rapport d'onde stationnaire ou *SWR-Standing Wave Ratio*, ou encore, *VSWR-Voltage Standing Wave Ratio*).

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Adaptation d'impédance et ROS

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



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

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

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

ou

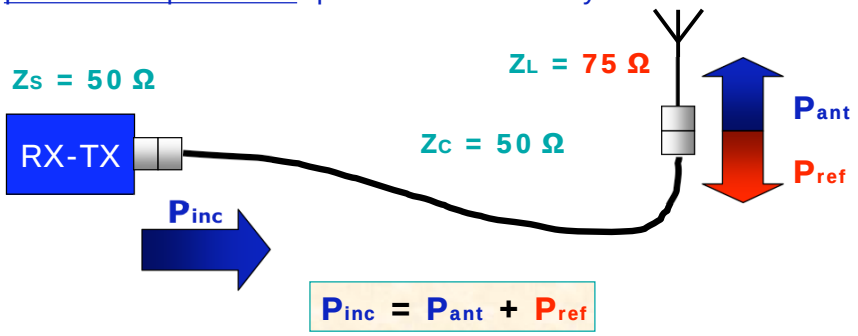
$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{inc}+V_{ref}}{V_{inc}-V_{ref}}$$

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Adaptation d'impédance et ROS

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



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

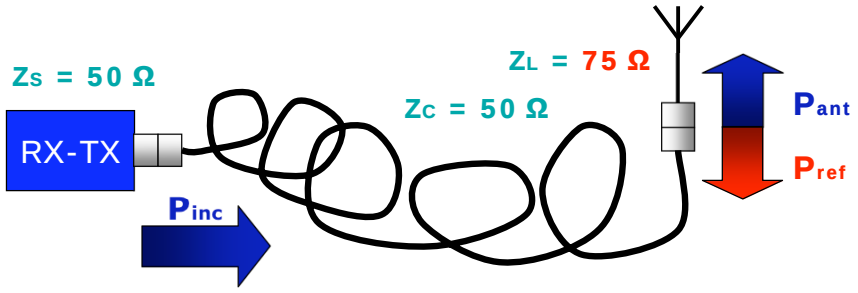
$$TOS = 100 * \frac{ROS - 1}{ROS + 1}$$

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 !

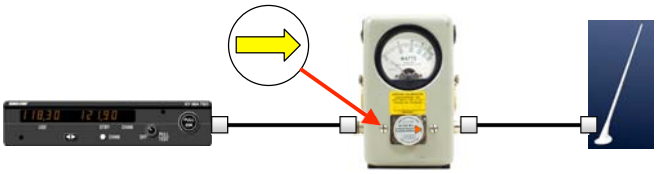
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

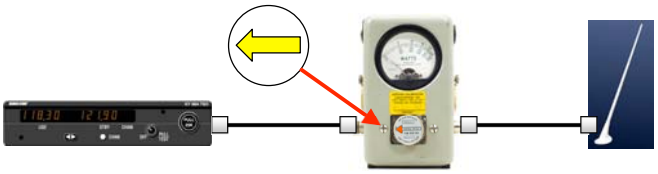
Adaptation d'impédance et ROS

Mesure du ROS

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



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



- *Étape 3 :* calculs :

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

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

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Adaptation d'impédance et ROS

Mesure du ROS

Image : Daiwa

- 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 peu onéreux qui peut rendre d'immenses services !

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Les antennes

Les caractéristiques des antennes

- On peut caractériser une antenne par les paramètres suivants :

Image : Cooper Antennas

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

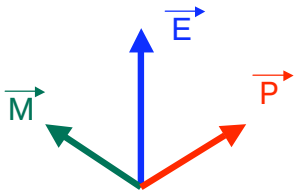
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Les antennes

Polarisation des antennes

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



$\vec{E}$ est le vecteur représentant la direction du **champ électrique**

$\vec{M}$ est le vecteur représentant la direction du **champ magnétique**

$\vec{P}$ est le vecteur représentant la direction de la **propagation**

- 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.

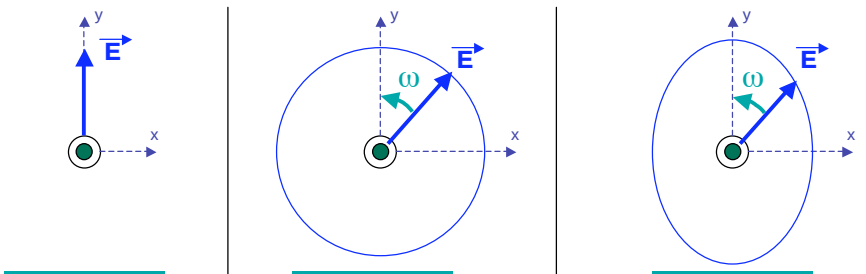
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Les antennes

Polarisation des antennes

- Il existe quatre types de polarisations :
  - ✈ Polarisation **verticale** (linéaire).
  - ✈ Polarisation **horizontale** (linéaire).
  - ✈ Polarisation **circulaire**.
  - ✈ Polarisation **elliptique**.



Linéaire | Circulaire | Elliptique

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

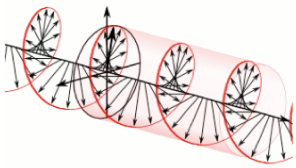
ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

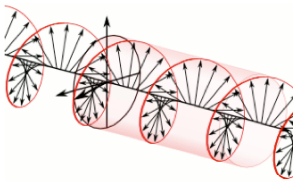
Polarisation des antennes

- 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) :

Images : Wikipedia



Polarisation circulaire dextrogyre



Polarisation circulaire lévogyre

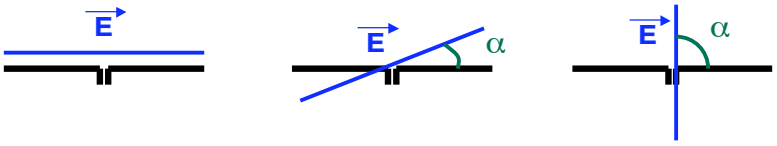
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

Les antennes

Polarisation des antennes

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

$$PLF_{(db)} = 10 * \log\left(\cos^2 \alpha\right)$$

α (°) :	PLF (dB) :
0	0
5	- 0,03
10	- 0,13
20	- 0,54
30	- 1,25
45	- 3

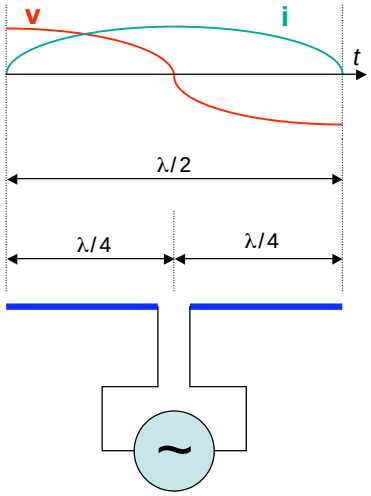
α (°) :	PLF (dB) :
50	- 3,8
60	- 6
70	- 9,3
80	- 15,2
85	- 21,1
90	∞

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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.

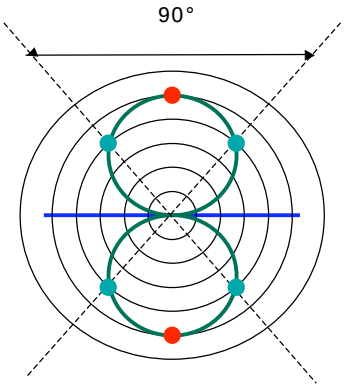
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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**

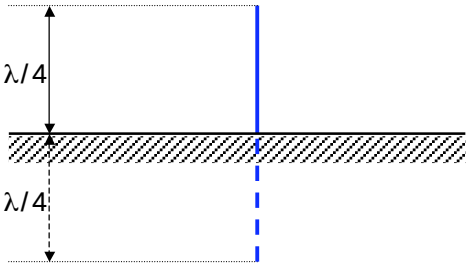
En trois dimensions, le diagramme de rayonnement à l'allure d'un « beigne ».

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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.

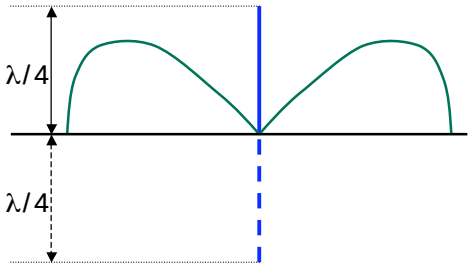
- Le plan de masse « fait croire » à l'onde électromagnétique qu'il s'agit d'une antenne demi-onde.
- En effet, le plan de masse a un « effet de miroir » pour l'antenne et crée une antenne image.

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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.

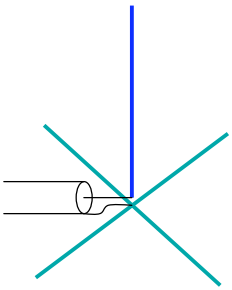
- Le rayonnement a l'allure d'une « cuvette » et est omnidirectionnel dans le plan horizontal.
- Théoriquement, aucune onde ne se propage selon l'axe de l'antenne.

© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Monopôle de Marconi



- Le conducteur (élément radiant) 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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Monopôle de Marconi

Photo : David Jordan/Wikipedia

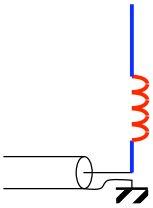
- Théoriquement, l'impédance d'un monopôle de Marconi correspond à la moitié de celle d'un dipôle de Hertz, soit environ 36,5 Ω.
- Une manière d'adapter l'impédance à une valeur proche de 50 Ω consiste à orienter les radiants du plan de masse vers le bas.
- On trouve ce type d'antenne pour les communications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

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Monopôle de Marconi



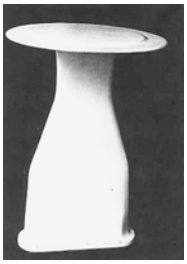


Photo : Signal Antenna Systems

- 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 radiant. 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*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

Image : RV Stallite Antennas

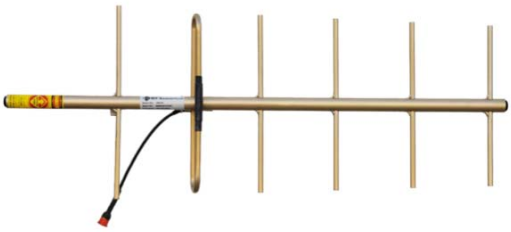


Image : Telco Antennas

- 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**.

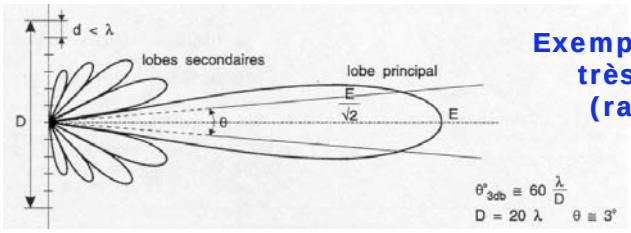
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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)

Photo : RAMET A.S.

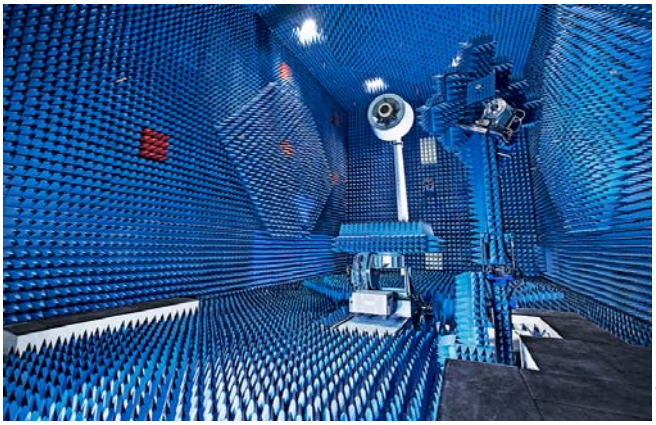
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

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



U.S. Navy

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

- On peut également effectuer des essais en milieu ambiant :

U.S. Air Force

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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 dBi.
  - 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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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.

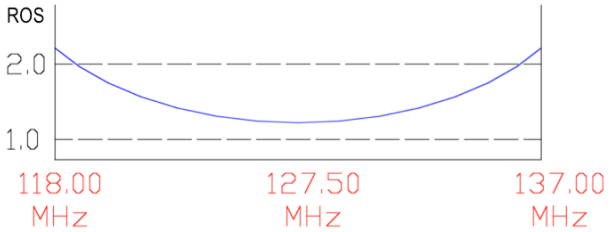
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

Les antennes

Exemple de caractéristiques d'une antenne VHF-COM

Comant CI 175
VHF Communication

COBHAM

2008 Data Sheet
The most important thing we build is trust

CI 175 VHF Communication

High strength antenna designed as an improved direct replacement for he standard Cessna 3-hole mounting configuration.

The CI 175 has been re-tested and upgraded to the new RTCA DO-160D environmental requirements and offers the 118 to 137 MHz frequency associated with DO-160D.

Applications

Single engine piston aircraft for applications of this antenna design. Consult your FBO or installation shop for best application information.

Frequencies Covered

118-137 MHz

Specifications

Electrical	
Frequency	118-137
VSWR	2.5:1 Maximum
Polarization	Vertical
Radiation Pattern	Omnidirectional
Impedance RF	50 Ohms
Power RF	50 Watts
Mechanical	
Weight	0.5 lbs Max.
Height	18.75 inches Max.
Material	Cast Housing / Fiberglass Whip
Finish	Polyurethane Enamel
Connector	BNC (female)
Environmental	
Temperature	-55 to +85 Celcius
Altitude	50,000 ft.
Airspeed	250 KTAS
Federal Specifications	
FAA TSO	C37d, C38d
RTCA Environmental	DO-160D

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

La propagation des ondes électromagnétiques

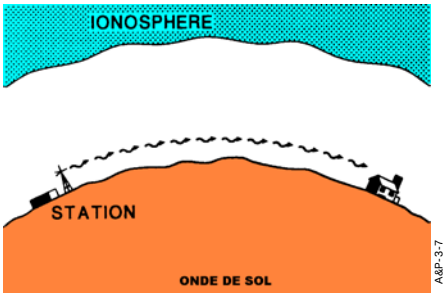
- Selon la fréquence porteuse utilisée pour une communication radio, la propagation de l'onde pourra être différente.
- On parlera de modes de propagation :

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

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de sol

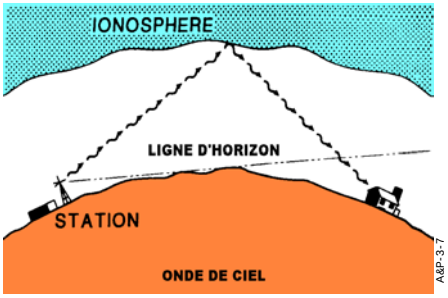


- L'onde électromagnétique suivra la courbure de la terre. La liaison peut donc s'établir entre deux points de la terre au-delà de la ligne d'horizon.
- Les gammes d'ondes concernées sont : VLF, LF et MF (LORAN C, par exemple).

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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).

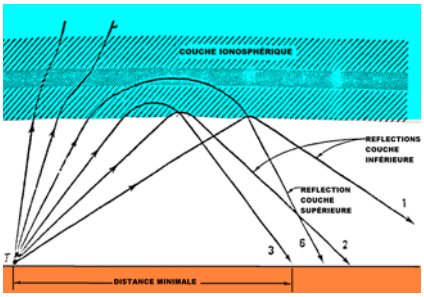
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 réfléchie 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.

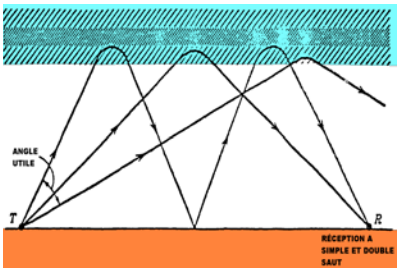
© Département d'avionique

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

- Pour certains points de réception d'un signal transmis par onde de ciel, on reçoit :



- Une onde réfléchie une fois par la couche ionosphérique.
- Une onde réfléchie 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.

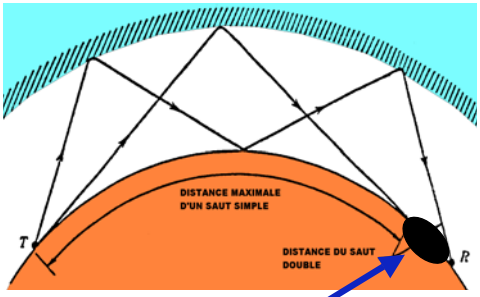
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

- En fonction de ce qui à été vu précédemment, on peut voir :



Il se trouve dans « un trou noir »

- 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 !

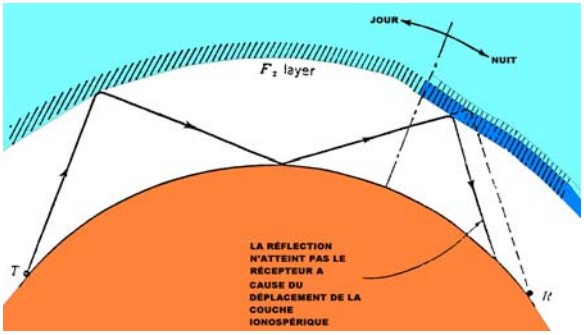
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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.



ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes de ciel

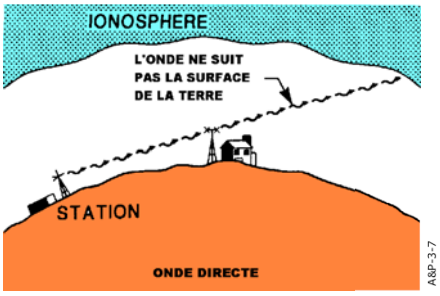
- En résumé, les communications par ondes de ciel en HF :

  - ✓ 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.

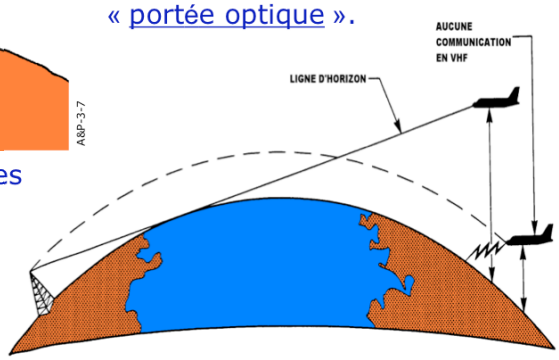
ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 EHF (exemple : communications VHF aéronautiques).

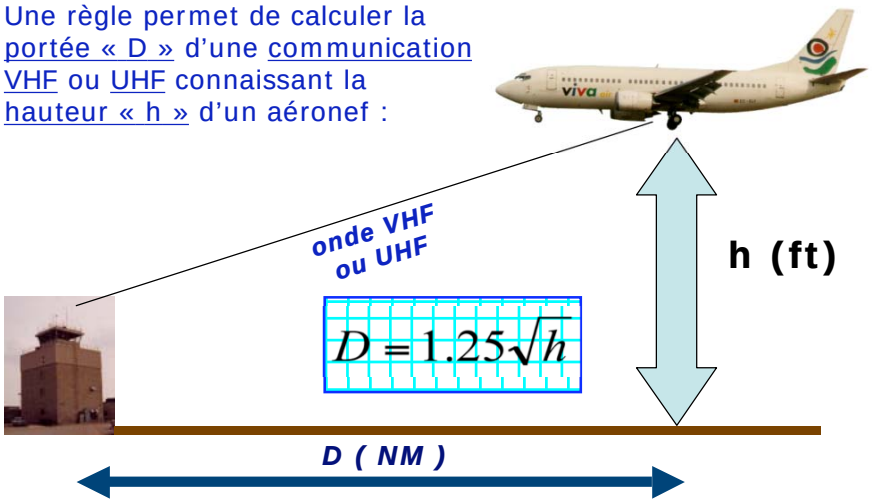
© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE

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 :



© Département d'avionique *Document à des fins de formation*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

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*

ÉNA ÉCOLE NATIONALE D'AÉROTECHNIQUE
COLLÈGE ÉDOUARD-MONTPETIT

© Pierre GILLARD/2010-12114

Merci de votre attention

© Département d'avionique *Document à des fins de formation*