

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET AÉROTECHNIQUE



Préliminaires à la radionavigation

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET AÉROTECHNIQUE

Avant de débuter le cours ...



Merci !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET AÉROTECHNIQUE

Présentation du cours



- L'onde électromagnétique.
- Fréquence et longueur d'onde.
- Les gammes de fréquences. Transmission des ondes radio.
- Les antennes.
- La propagation des ondes électromagnétiques.
- La modulation des signaux.
- La modulation CW – *Continuous Wave*.
- La modulation d'amplitude.
- La modulation FM.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET AÉROTECHNIQUE

Présentation du cours



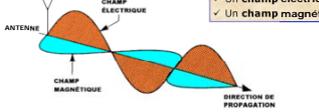
- La modulation de phase.
- Les transmissions numériques.
- Les oscillateurs.
- Les synthétiseurs de fréquences.
- Définitions.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET 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

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET 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 ($c = 300\,000\text{ km/s}$).
- 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 AÉRONAUTIQUE ET AÉROTECHNIQUE

Les bandes de fréquences

Bandes	Fréquences	Longueurs d'ondes
EHF	300 GHz	1mm
SHF	3 GHz	1cm
UHF	300 MHz	0.1m
VHF	30 MHz	1m
HF	3 MHz	100m
MF	300 kHz	1km
LF	30 kHz	10km
VLF	3 kHz	100km

↑ Portée limitée par l'horizon

↓ Portée non limitée par l'horizon

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET AÉROTECHNIQUE

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

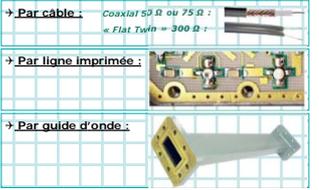
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET 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** :



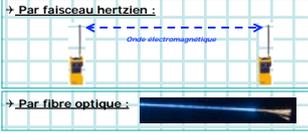
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

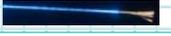
Transmissions des ondes radio

- 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 Aérospatiale

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 à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

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 à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

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**.



- E** est le vecteur représentant la direction du **champ électrique**
- M** est le vecteur représentant la direction du **champ magnétique**
- 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

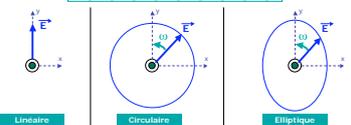
ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

Les antennes

Polarisation des antennes

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

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



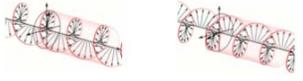
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

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)** :

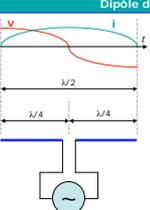


© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

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 **demie période**.

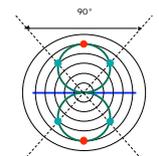
© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

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**

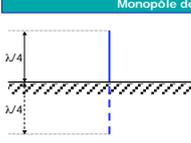
En trois dimensions, le diagramme de rayonnement a l'allure d'un « beigne ».

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale

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

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

Les antennes

Monopôle de Marconi

- Le **conducteur** (élément rayonnant) 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

Les antennes

Directivité et diagramme de rayonnement

- 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 Document à des fins de formation

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

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

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 de fréquences concernées sont : **VLF, LE et ME (LORAN C, par exemple)**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

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

© Département d'avionique Document à des fins de formation

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

La propagation des ondes électromagnétiques

Propagation par ondes d'espace (directes)

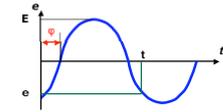
- Une règle permet de calculer la **portée « D »** d'une communication **VHF** ou **UHF** connaissant la **hauteur « h »** d'un aéronef :

$$D = 1,25 \sqrt{h}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation des signaux

- Chaque émetteur possède une fréquence d'émission particulière qui le caractérise et le signal sinusoïdal pur émis sur cette fréquence est appelé porteuse.
- Un signal sinusoïdal pur se caractérise par la relation mathématique :

$$e = E \sin(\omega t + \varphi) \text{ où } \omega = 2\pi f$$


© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation des signaux

- La modulation des signaux radioélectriques consiste à faire varier un des paramètres de la porteuse à l'image du signal à transmettre.
- On dit que la porteuse est modulée par le signal.
- Il existe donc trois possibilités de faire varier un paramètre de la relation $e = E \sin(\omega t + \varphi)$ représentant la porteuse :

- Si nous modifions l'amplitude E : modulation d'amplitude.
- Si nous modifions la fréquence f : modulation de fréquence.
- Si nous modifions la phase φ : modulation de phase.

→ Modulations d'amplitude et dérivées : AM, SSB ⇒ radiocommunication et radionavigation analogiques.
 → Modulation de fréquence : FM ⇒ radiocommunication et radionavigation analogiques.
 → Modulation de phase : PM ⇒ radiocommunication et radionavigation numériques.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation CW – Continuous Wave

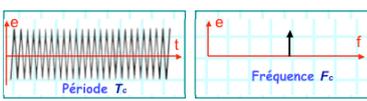
- Avant de parler de la modulation d'amplitude, effectuons un retour en arrière avec la modulation CW transmettant le code Morse.
- Il s'agit du premier moyen de transmission de messages par radio qui ait été utilisé.
- Son inconvenient est de ne pas pouvoir transmettre un message vocal en clair.
- De plus, les opérateurs à l'émetteur et au récepteur doivent connaître le code Morse de mémoire.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation CW – Continuous Wave

Représentations d'une fréquence porteuse

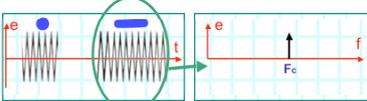


- On peut représenter un signal sinusoïdal dans un diagramme temporel.
- On peut représenter un signal sinusoïdal dans un diagramme fréquentiel.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation CW – Continuous Wave

Représentations de la modulation CW

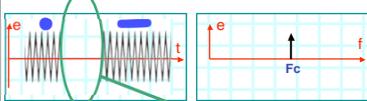


- La modulation CW consiste à activer et désactiver ce signal sinusoïdal appelé « porteuse » au rythme du code Morse.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation CW – Continuous Wave

Représentations de la modulation CW



- La modulation CW consiste à activer et désactiver ce signal sinusoïdal appelé « porteuse » au rythme du code Morse.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation d'amplitude

Equation générale

$$e = E \sin(\omega_c t + \varphi)$$

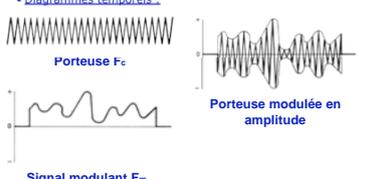
- Les variations de l'amplitude E en fonction du temps caractérisent la modulation ($E = f(t)$).
- Toute l'information (signal modulant) est transmise de cette manière.
- Avec la variante la plus courante de modulation en amplitude (modulation A3E), les variations d'amplitude sont l'image fidèle du signal modulant.
- Le spectre résultant fait apparaître la porteuse accompagnée de deux plages de fréquences placées symétriquement de part et d'autre : les bandes latérales.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation d'amplitude

Représentations de la modulation d'amplitude (AM)

- Diagrammes temporels :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

La modulation d'amplitude

Analyse spectrale

- La fréquence porteuse : $v_c = V_c \sin \omega_c t$ ($\omega_c = 2\pi f_c$)
- La modulation : $v_m = V_m \sin \omega_m t$ ($\omega_m = 2\pi f_m$)
- L'enveloppe : $v_e = V_c + v_m = V_c + V_m \sin \omega_m t$

Donc, on peut en déduire l'onde modulée en amplitude :

$$v = v_e \sin \omega_c t = (V_c + V_m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t$$

$$v = V_c \sin \omega_c t + (V_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t)$$

$$v = V_c \sin \omega_c t + \frac{1}{2} V_m (\sin(\omega_c + \omega_m)t + \sin(\omega_c - \omega_m)t)$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation d'amplitude

Analyse spectrale

• Diagrammes temporel et fréquentiel..

$$v = V_c \sin \omega_c t + \frac{1}{2} V_m [\sin(\omega_c + \omega_m)t + \sin(\omega_c - \omega_m)t]$$

Ces deux diagrammes ont la même signification !

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation d'amplitude

Analyse spectrale

• Diagrammes temporel et fréquentiel..

$$v = V_c \sin \omega_c t + \frac{1}{2} V_m [\sin(\omega_c + \omega_m)t + \sin(\omega_c - \omega_m)t]$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation d'amplitude

Le taux de modulation

$m =$ Variation maximale d'amplitude de la porteuse
Deux fois la valeur moyenne de cette amplitude

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation d'amplitude

Le taux de modulation

$m =$ Variation maximale d'amplitude de la porteuse
Deux fois la valeur moyenne de cette amplitude

$m = 100\%$
 $V_m = V_c$
 $V_{max} = 2 V_c$
 $P_m = P_c/2$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation d'amplitude

Le taux de modulation

- Si le taux de modulation est faible (50 %), l'efficacité est faible.
- Si le taux de modulation est trop élevé (plus de 100 %), il y aura une distorsion du signal ou surmodulation.
- La plupart des émetteurs de transmission de la voix ont un taux de modulation d'environ 70 %.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation d'amplitude

Le taux de modulation

• Exercice : estimez le taux de modulation de chacun des diagrammes suivants :

0 % 100 % 50 % > 100 %

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation FM

La modulation de fréquence

$$e = E \sin(\omega t + \varphi)$$

- Les variations de la pulsation ω en fonction du temps caractérisent la modulation.
- $\omega = 2\pi f$ et $f = f(t)$.
- Les variations de la fréquence porteuse transportent toute l'information du signal modulant.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation FM

La modulation de fréquence

• Diagramme temporel..

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérienne Technologique

La modulation FM

La modulation de fréquence

• Diagramme temporel..

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

La modulation FM

La modulation de fréquence

Diagramme fréquentiel

La modulation FM consiste en un déplacement de la porteuse f_c entre deux limites f_{min} et f_{max} .

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

La modulation FM

La modulation de fréquence

Avantage

- Le signal résultant sera peu sensible aux parasites car les variations accidentelles d'amplitude induites par ces derniers ne sont pas significatives.

Inconvénient

- La largeur de spectre est nettement plus grande que celle du signal modulé en amplitude si l'on souhaite émettre un signal de qualité (« broadcast » en stéréo, par exemple).

Comparaison AM/FM

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

La modulation FM

Largeur du spectre

Voici le spectre de fréquences d'une porteuse f_c modulée en fréquence par un signal modulant f_m :

- Les amplitudes des différentes raies spectrales dépendent de l'indice de modulation m_f :
$$m_f = \frac{f_d}{f_m}$$
- Où f_d est la déviation de fréquence.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

Principe de la modulation FM

Largeur du spectre

L'équation de l'amplitude d'un signal FM est la suivante :

$$v_{FM} = V_c \sin(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t)$$

- On peut la résoudre à l'aide d'un processus mathématique complexe appelé « fonctions de Bessel ».
- On peut, toutefois, utiliser le tableau ci-contre afin de déterminer l'amplitude de la porteuse et des différentes raies spectrales.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

La modulation FM

Largeur du spectre

Regardons l'évolution des amplitudes en fonction de l'indice de modulation :

Indice de modulation	Bessel (Part)									
	J0	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
0.00	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.25	0.9892	0.2423	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.50	0.9374	0.4608	0.0109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.00	0.7661	0.7661	0.0242	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.50	0.5108	0.9375	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.2238	0.7661	0.4608	0.0242	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	-0.0540	0.5108	0.7661	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.00	-0.4673	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.50	-0.8674	0.0540	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.00	-1.2111	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.50	-1.4859	0.5108	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	-1.6616	0.7661	0.5108	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000
5.50	-1.7308	0.9375	0.7661	0.5108	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000	0.0000
6.00	-1.7000	1.0000	0.9375	0.7661	0.5108	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033	0.0000
6.50	-1.5708	0.9375	0.7661	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2081	0.0033
7.00	-1.3508	0.7661	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2081
7.50	-1.0508	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108
8.00	-0.6908	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238
8.50	-0.2908	0.0540	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108
9.00	0.1608	0.0000	0.0540	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238
9.50	0.5608	0.0000	0.0000	0.0540	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108
10.00	0.8908	0.0000	0.0000	0.0000	0.0540	0.2238	0.5108	0.2238	0.5108	0.2238

- Si $m_f = 0$, il n'y a donc que la porteuse qui est transmise avec une amplitude de 100%.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

La modulation de phase

La modulation de phase (PM)

$$e = E \sin(\omega t + \phi)$$

- Les variations de la phase ϕ en fonction du temps caractérisent la modulation.
- $\phi = f(t)$.
- Les variations de la phase de la porteuse transportent toute l'information du signal modulant.
- Un exemple de modulation de phase utilisée en aéronautique est la modulation « BPSK-Binary Phase Shift Keying » des données provenant des satellites GPS.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

Les transmissions numériques

Méthodes de transmissions numériques

- On peut transférer des données numériques de deux manières :
 - Par câble.
 - Par liaison radio.
- Lorsqu'on parle de transmission par câbles conventionnels, deux options existent :
 - Paires torsadées
 - Câble coaxial

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

Les transmissions numériques

Exemple de transmission par câble : Bus ARINC 429

Codage des bits des mots ARINC 429

- Le codage s'effectue avec des impulsions de ± 10 VDC (« 1 ») et de ± 10 VDC (« 0 ») afin de maintenir une tension moyenne dans le temps nulle.
- Physiquement, un bus ARINC 429 est constitué d'une paire de fils torsadés et blindés.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aéronautique et Spatiale

Les transmissions numériques

Techniques de modulation de signaux numériques

- Pour transmettre un signal numérique par radio, tout comme en analogique, il faut moduler une porteuse.
- On pourrait imaginer transmettre un signal numérique en AM ou en FM comme un signal audio.
- Or, un signal numérique est de forme carrée et la décomposition en série de Fourier nous a appris qu'un signal non sinusoïdal comprend une infinité d'harmoniques.
- Dès lors, à moins de moduler un signal à très faible débit (Baud Rate, nombre de symboles par seconde), le spectre qui serait occupé pour la modulation AM ou FM d'un signal numérique serait phénoménal et donc irréalisable.
- Il faut donc trouver d'autres méthodes de modulation qui occupent la plus petite bande passante possible.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les transmissions numériques

Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

1 - FSK – Frequency Shift Keying

modulation par déplacement de fréquence

- Au 0 logique correspond une fréquence F_1 .
- Au 1 logique correspond une fréquence F_2 .

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les transmissions numériques

Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

2 - PSK – Phase Shift Keying

modulation par changement de phase

- Au 0 logique correspond une phase ϕ_0 .
- Au 1 logique correspond une phase $\phi_1 + 180^\circ$.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les transmissions numériques

Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

2 - QPSK – Quadrature Phase Shift Keying

modulation par changement de phase en quadrature

- Une variante du PSK est le **QPSK – Quadrature Phase Shift Keying** ou **4-PSK**.
- Permet des transmissions plus rapides que la BPSK.

Combinaison logique	Phase
00	45°
01	135°
11	225°
10	315°

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les transmissions numériques

Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

3 - QAM – Quadrature Amplitude Modulation

modulation d'amplitude en quadrature

- Permet d'être encore plus rapide que le QPSK avec un codage de 8 possibilités d'états numériques différents (8-QAM).
- Chaque phase peut avoir deux niveaux d'amplitude.
- On peut également avoir des variantes permettant des transferts encore plus rapides que le 8-QAM : 16-QAM (8 phases, 2 amplitudes), 64-QAM, 256-QAM, etc.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les transmissions numériques

Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

4 - OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

modulation d'amplitude en quadrature

Exemple : 1 Mops = 4 x 250 Kops
 $\Delta f = 250 \text{ KHz}$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les oscillateurs

Principe de fonctionnement des oscillateurs

- Principe du circuit oscillant :

Si on applique une impulsion à l'entrée de ce circuit, en sortie, on obtient une oscillation amortie de fréquence F_0 telle que :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les oscillateurs

Principe de fonctionnement des oscillateurs

- Si on souhaite entretenir l'oscillation, il faut trouver un moyen d'injecter de l'énergie dans le circuit :

Analogie :

L'énergie provient du poids entraînant le mécanisme

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les oscillateurs

Principe de fonctionnement des oscillateurs

- Réaliser une réaction de la sortie vers l'entrée :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les oscillateurs

Reaction et contre-réaction

- Reaction :

- Signal injecté à l'entrée en phase.
- Effet « Larsen » (audio).
- Instabilité.
- Application : oscillateurs.

- Contre-réaction :

- Signal injecté à l'entrée en opposition phase.
- Stabilité.
- Application : amplificateurs.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale Technologique

Les synthétiseurs de fréquences

La boucle à verrouillage de phase (PLL)

En ajustant « n » et « m » à volonté, on peut créer une multitude de fréquences inférieures ou supérieures F_0 .

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale Technologique

Définitions

AGC - Automatic Gain Control

- Tous les récepteurs disposent d'un système de contrôle du gain automatique dans le but d'ajuster les signaux toujours au même niveau de sortie (audio) quelle que soit la valeur du signal d'antenne.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale Technologique

Définitions

La sensibilité d'un récepteur

- Il s'agit de la capacité d'un récepteur à percevoir ou détecter un signal très faible.
- On l'exprime selon le rapport $\frac{S}{N}$ en dB.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale Technologique

Définitions

La sélectivité d'un récepteur

- Il s'agit de la capacité d'un récepteur à capter un canal défini et à rejeter le canal adjacent.
- Elle comprend la bande passante d'acceptation de -6 dB et celle de rejection de -60dB.
- On utilise la mesure de tension DC de l'AGC qui est proportionnelle au niveau de réception du signal détecté.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale Technologique

Définitions

Filtrage sélectif

- La sélection d'une onde reçue est réalisée généralement grâce à plusieurs étages de filtrage amenant à la sélectivité requise.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure Aérospatiale Technologique

Merci de votre attention

© Département d'avionique Document à des fins de formation