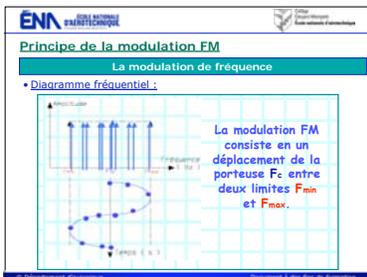
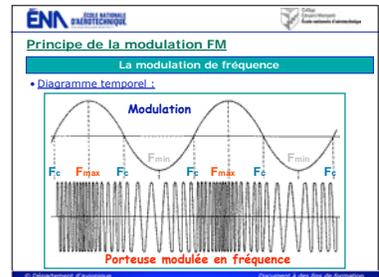
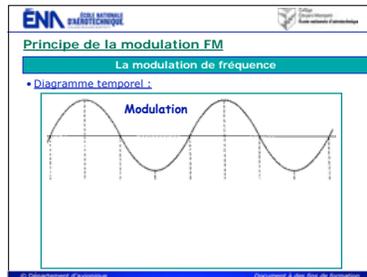




Principe de la modulation FM
La modulation de fréquence

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

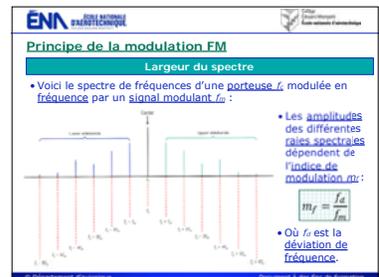
- Les variations de la pulsation ω en fonction du temps caractérisent la modulation.
- $\omega = 2\pi f$ et $f = f(t)$.
- Les variations de la fréquence porteuse transportent toute l'information du signal modulant.



Principe de 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 :



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'aéronautique Document à des fins de formation

Principe de la modulation FM

Largeur du spectre

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

Indice de modulation	Amplitude de la porteuse	Amplitude de la 1 ^{ère} raie latérale	Amplitude de la 2 ^{ème} raie latérale	Amplitude de la 3 ^{ème} raie latérale	Amplitude de la 4 ^{ème} raie latérale	Amplitude de la 5 ^{ème} raie latérale
0	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.25	0.9809	0.1240	0.0243	0.0026	0.0002	0.0000
1	0.7661	0.4413	0.1909	0.0540	0.0109	0.0024
2	0.2239	0.5818	0.3528	0.1436	0.0472	0.0116

- Si $m = 0$, il n'y a donc que la porteuse qui est transmise avec une **amplitude de 100%**.
- Regardons maintenant les amplitudes obtenues avec un indice de modulation $m = 0.25$, $m = 1$ et $m = 2$.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

Principe de la modulation FM

Largeur du spectre

- Comment peut-on maintenant évaluer la **largeur de spectre** nécessaire et donc pouvoir évaluer l'**espace** entre **chaque canal** ?
- Prenons, par exemple, un **signal modulant** de **3 KHz** au maximum et une **déviaton en fréquence** de **6 KHz**.
- On peut donc déduire un **indice de modulation** de **2** et on constate qu'il y a **4 raies spectrales** de part et d'autre de la porteuse dans ces conditions.
- Sachant que **chaque raie spectrale** est **séparée** de sa voisine par **3 KHz**, on peut déterminer que la **bande passante** nécessaire correspond à **24 KHz**.
- On pourrait, donc, écrire ceci sous la **forme suivante** :

$$BP = 2 f_m N$$

- Où BP est la **bande passante** et N le **nombre de raies spectrales** compte tenu de l'**indice de modulation**.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

Principe de la modulation FM

Largeur du spectre

- Une autre manière de déterminer la **bande passante** requise est la **régle de Carson**.
- Celle-ci ne prend en compte que les **raies spectrales** dont l'**amplitude** est **supérieure à 2%**.
- La **régle** est la suivante :

$$BP = 2(f_m + f_{\Delta f})$$

- Ce qui nous donne, pour notre exemple : $BP = 2(6 \text{ KHz} + 3 \text{ KHz}) = 18 \text{ KHz}$.
- Même si **cette façon** d'évaluer la bande passante requise amène à des **résultats inférieurs** à ceux obtenus avec la **méthode précédente**, on a constaté qu'elle **reste valable** malgré tout pour transmettre un **signal intelligible**.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

Principe de la modulation FM

Problème du bruit

- Du fait que c'est une **variation de fréquence** qui représente la **modulation** et **non l'amplitude**, du **bruit** ou des **parasites** peuvent être simplement **éliminés** :

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

Principe de la modulation FM

Problème du bruit

- On constate que le **bruit**, par contre, a une **grande influence** sur les signaux à **haute fréquence** (ex. : **Driscocast**).
- Une manière de procéder est de les **amplifier avant la modulation** et de les **atténuer après la démodulation**.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

Applications de la modulation FM

- Diffusion radio grand public (**Driscocast**).
- Radiocommunications **services publics**.
- Radiocommunications **marine**.
- Radiocommunications **militaires**.
- Radioamateurs.
- Radioaviation **aéronautique** (VOR).
- Transmission de données **numériques**.
- Téléométrie.
- Radar.
- Prospection **sismique**.
- Synthèse FM dans les **synthétiseurs de musique**.
- Etc.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

La modulation FM en aéronautique

- On trouve de la **modulation de fréquence** en **aéronautique** dans les **systèmes suivants** :

→ VOR : signal de 30 Hz de référence modulé en fréquence par une sous-porteuse à 9960 Hz.
→ Radiocommunications « services publics » en VHF et UHF.
→ Transmission de données numériques.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

Les radiocommunications FM en VHF et UHF

- Il n'y a **pas** réellement de **communications vocales en FM** en **aéronautique**.
- Par contre, il existe des **systèmes de radiocommunication FM** prévus pour être **installés à bord d'aéronefs** permettant de **dialoguer** sur des **bandes de fréquences VHF et UHF** destinées aux **services publics, chantiers, marine, etc.**
- Ces **bandes** sont les suivantes :

→ VHF 30 MHz à 50 MHz.
→ VHF 66 MHz à 88 MHz.
→ VHF 138 MHz à 174 MHz.
→ UHF 403 MHz à 512 MHz.

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Les radiocommunications FM en VHF et UHF

- Exemple d'un appareil : Technisonic TFM-550 :

MODEL TFM 550
 Mobile FM Transceiver



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Projet 25 (P25)

- Le projet 25 a été développé pour les services publics en Amérique du Nord.
- Il s'agit de communications numériques.
- Les appareils aux normes P25 doivent pouvoir continuer à fonctionner en analogique pour être interopérables avec les réseaux de communications analogiques.

Compatible with P25 - Interoperable Equipment in Transition



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

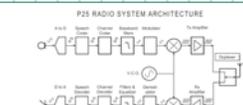
ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Projet 25 (P25)

- Trois phases d'implantation ont été définies :

Phase 1:	Équipements compatibles avec les systèmes analogiques et transmission numériques selon le protocole Continuous 4 level FM (C4FM, essentiellement de la modulation QPSK).
Phase 2:	en cours de développement pour ajouter des fonctionnalités EDMA et/ou TDMA.
Phase 3:	également en cours de développement pour permettre le transfert de données à haut débit, de la voix ou de la vidéo.

P25 RADIO SYSTEM ARCHITECTURE



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Projet 25 (P25)

- Exemple de radio compatible P25 : Technisonic TDFM-9000 :

TECHNISONIC
 YOU DESIGN IT. WE BUILD IT.



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Installation des équipements

Exemples d'installations

- Il existe deux catégories d'émetteurs-récepteurs FM : les appareils monoblocs et ceux avec tête de contrôle séparée.
- Voici quelques exemples d'installations possibles :

Technisonic TFM-138



Wulfsberg Flexcomm II



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Les antennes et leur implantation

Antennes pour la bande de 30 MHz

FM10-304
 VHF COMMUNICATIONS ANTENNA



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Les antennes et leur implantation

Antennes pour la bande de 138 MHz

Comant C1 173-1
 The Extended Base

COBHAM



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Les antennes et leur implantation

Antennes pour la bande de 138 MHz

Comant C1 200-3
 The Extended Base

COBHAM



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA École Nationale Supérieure de l'Électronique et de l'Automatique

Les antennes et leur implantation

Antennes pour la bande de 138 MHz

Comant C1 205-250
 Mast Top - Mast Section Section

COBHAM



© Département d'Électronique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Antennes pour la bande de 406 MHz

Comant CI 106
Antenne



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Antennes pour la bande de 406 MHz

Comant CI 177-20
Antenne



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Antennes pour la bande de 406 MHz

Comant CI 275 Series
VHF Antennas



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Antennes pour la bande de 406 MHz

Comant CI 285
Antennas



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Antennes pour la bande de 88 MHz à 108 MHz

Comant CI 222-1
VHF Antenna



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Implantation des antennes sur les aéronefs

- Les antennes VHF pour les radiocommunications FM peuvent être montées au-dessus ou en dessous de l'aéronef comme c'était le cas avec les radiocommunications VHF AM.
- En ce qui concerne les antennes UHF, il est préférable de les monter en dessous de l'aéronef pour avoir la meilleure liaison avec le sol qui n'est pas obstruée.



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Les antennes et leur implantation
Implantation des antennes sur les aéronefs

- Exemple sur un Cessna 208B Grand Caravan de la GRC :



© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE

Programmation et utilisation des équipements

- Les émetteurs-récepteurs de radiocommunication FM ne permettent pas un accès direct à la fréquence porteuse.
- Il est nécessaire de passer par une étape de programmation de canaux comprenant les éléments suivants :

→ Identification et /ou nom du canal.	
→ Fréquence(s) porteuse(s).	
→ Simplex ou duplex.	
→ Tonalités sub-audibles CTCSS ou DCS.	
→ Fréquence de garde.	
- Les émetteurs-récepteurs compatibles P25 nécessiteront la programmation de bien plus de paramètres.

© Département d'Avionique Document à des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION TECHNOLOGIQUE



Merci de votre attention

© Département d'Avionique Document à des fins de formation