

Travaux pratiques

RÉCEPTEUR FM À TDA7088 – PRÉSENTATION -

Objectifs :

Les travaux pratiques proposés traitent des principes de fonctionnement d'un récepteur FM "grand public" et des structures de base utilisées.

Les activités proposées permettent à l'étudiant d'acquérir :

- Des connaissances générales sur la réception et la démodulation de signaux radiofréquences modulés en fréquence par un signal musical.
- Des connaissances et des savoir-faire pour caractériser expérimentalement des fonctions et des structures d'un récepteur à modulation de fréquence.
- Une connaissance approfondie d'un circuit intégré spécialisé (TDA7088) dans le but de le mettre en œuvre. Chaque étudiant aura, à l'issue de ce TP, la charge de développer et réaliser un prototype de récepteur FM de poche, à base de TDA7088.

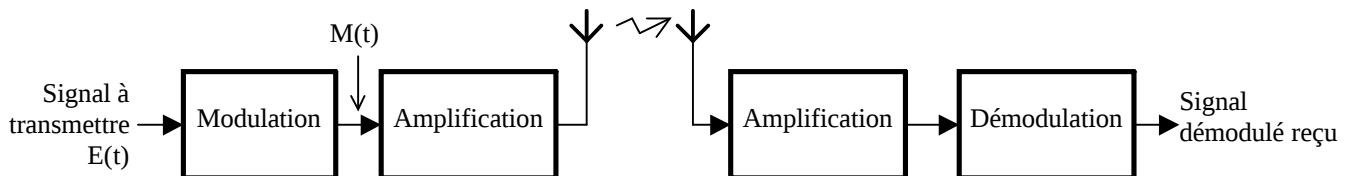
I) Introduction

I.1) Nécessité de moduler

La propagation des ondes électromagnétiques est utilisée pour réaliser des transmissions distantes sans nécessiter la mise en place d'un support physique (câble, fibre optique, ...). Les domaines d'application sont très divers : radio et télédiffusion, téléphonie mobile, transmissions privées (militaires, ambulances, pompiers, ...) ...

La sélectivité en fréquence des antennes et le partage du milieu de transmission (l'espace) nécessitent la fonction **modulation**. Elle permet le **multiplexage fréquentiel** des émetteurs.

Schéma simplifié d'une transmission radiofréquence

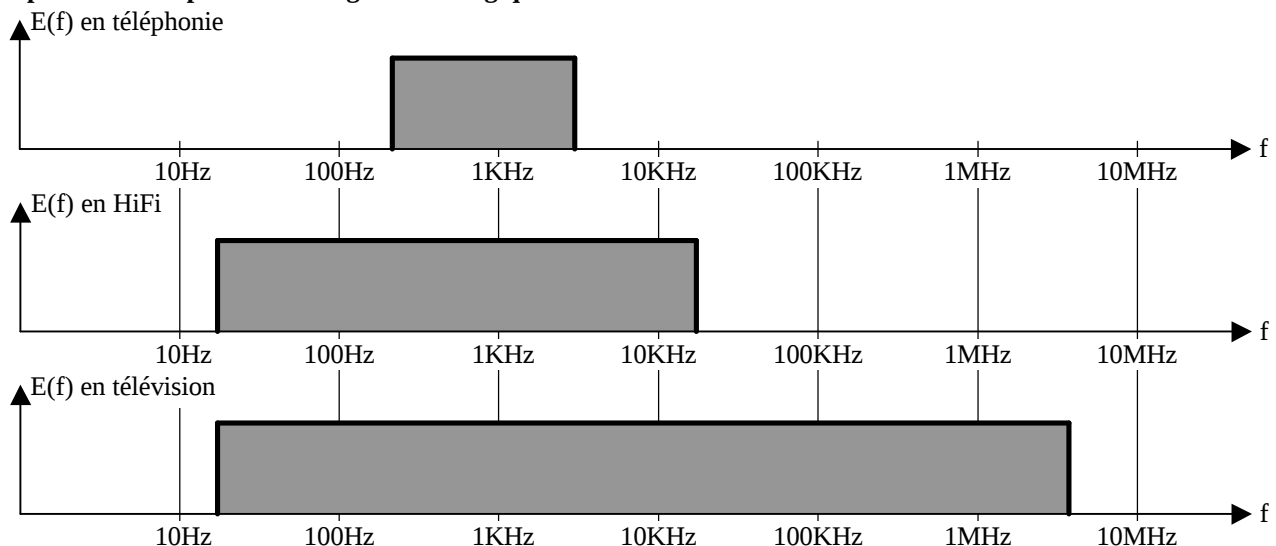


Ce procédé de transmission permet de réaliser des liaisons à très longues distances (jusqu'à plusieurs minutes lumières dans l'espace) sans nécessiter la mise en place d'un support physique de transmission.

Liste non exhaustive des types de signaux E(t) à transmettre :

- Signaux analogiques :
 - Téléphonie : bande occupée (BO) : 300Hz à 3400Hz (exemples : CT0 et CT1),
 - Haute fidélité : BO = 20Hz à 15KHz (ce qu'on appelle communément la "bande FM" : 88MHz à 108MHz),
 - Télévision : BO = 25Hz à 6MHz (terrestre et satellite).
- Signaux numériques :
 - Débits de qq. centaines de bauds à qq. Mbauds,
 - Formats : asynchrones et synchrones,
 - Exemples : GSM, GPS, DECT, télévision numérique, transmissions militaires cryptées, ...

Représentation spectrale des signaux analogiques :



Il est impossible de transmettre ces signaux tels quels (on dit en **bande de base**) en utilisant les ondes électromagnétiques pour les raisons suivantes :

- recouvrement des spectres de fréquence (aucune sélectivité à la réception),
- impossibilité d'émettre simultanément plusieurs signaux de même nature (à cause du recouvrement des spectres),
- antennes non réalisables (bande passante trop large par rapport à la fréquence centrale et longueurs d'ondes excessives).

Solution : transposition des spectres par un procédé de modulation (AM, BLU, FM, PM, FSK, PSK, APSK, ...)

I.2) Modulation d'amplitude (AM)

C'est le procédé de modulation le plus simple. Il reste encore largement utilisé :

- Transmissions longues distances en ondes courtes (OC),
- Télécommandes diverses (433,92MHz),
- Télévision à transmission terrestre (malgré la sensibilité aux parasites radioélectriques de cette modulation).

Le modulateur produit le signal $M(t)$ à partir de $E(t)$ tel que : $M(t) = M \cdot [1 + k \cdot E(t)] \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot t)$

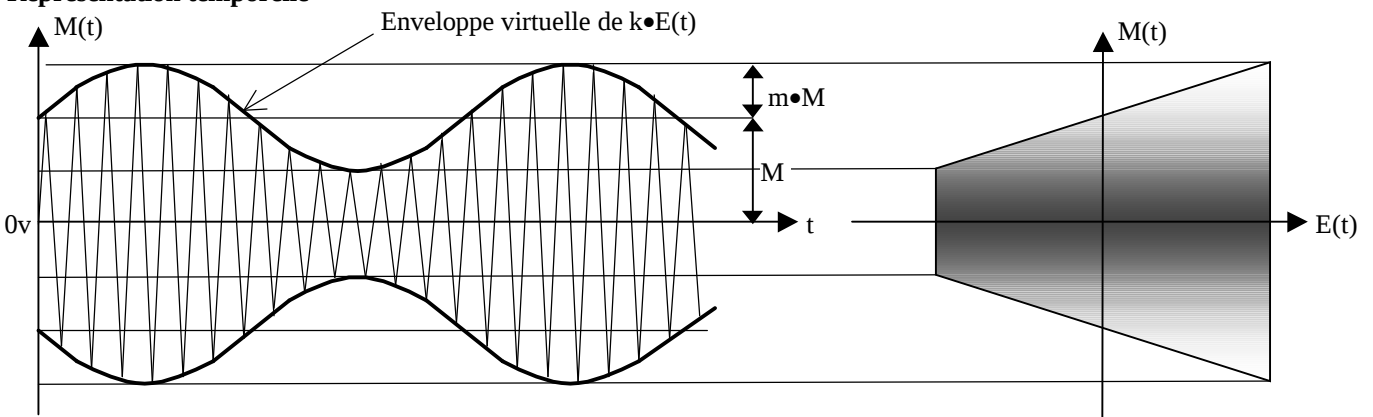
On note :

- F_0 : fréquence de la "porteuse"
- M : amplitude de la porteuse (pour $E(t) = 0V$, c'est à dire porteuse non modulée)
- $M \cdot [1 + k \cdot E(t)]$: amplitude "instantanée" de $M(t)$

Si $E(t) = E \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_E \cdot t)$ alors $M(t) = M \cdot [1 + k \cdot E \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_E \cdot t)] \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot t)$

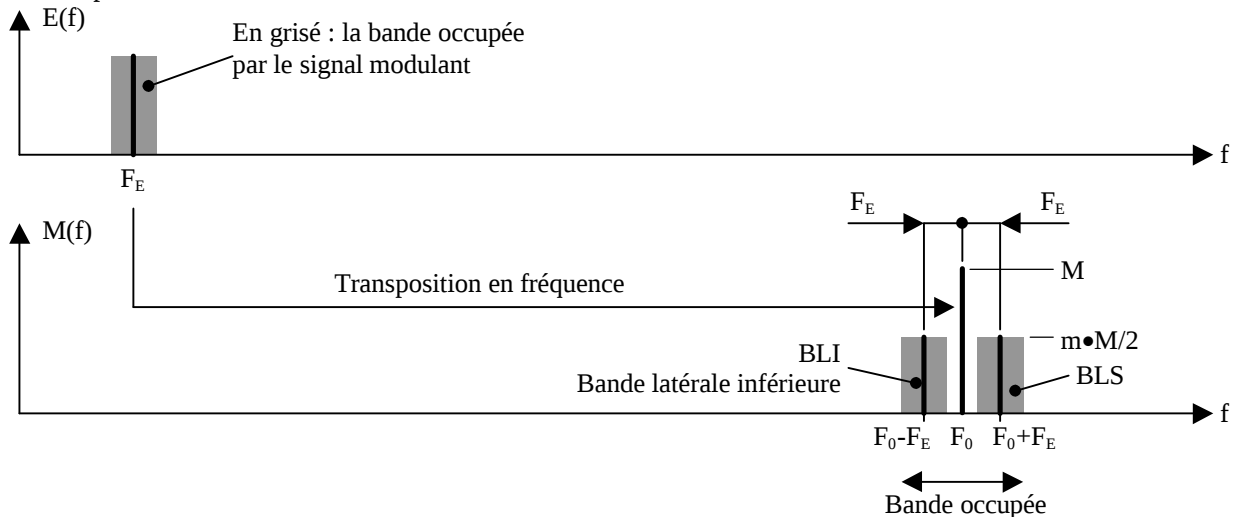
On note : $m = k \cdot E$: **le taux de modulation**. Il peut être compris entre 0 et 100%.

Représentation temporelle



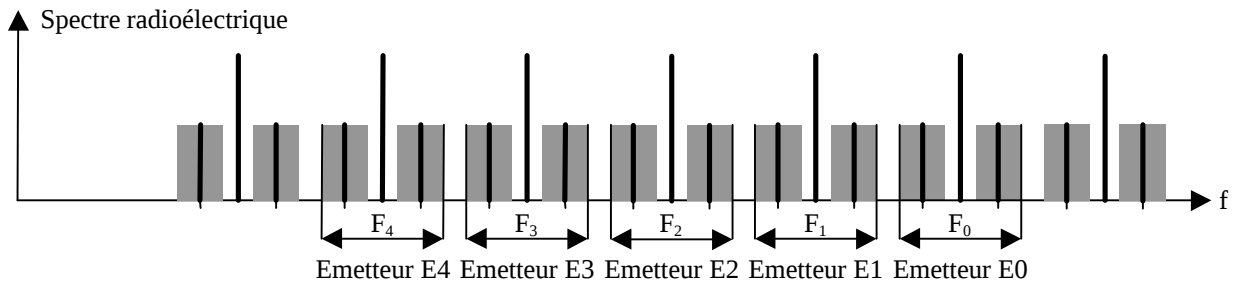
Représentations spectrales

En développant $M(t)$: $M(t) = M \cdot \sin(2\pi \cdot F_0 \cdot t) + \frac{m \cdot M}{2} \cos[2\pi \cdot (F_0 - F_E) \cdot t] - \frac{m \cdot M}{2} \cos[2\pi \cdot (F_0 + F_E) \cdot t]$, on met en évidence ses 3 composantes :



Ainsi, pour permettre la transmission simultanée de plusieurs communications dans une zone géographique donnée, on affecte à chaque émetteur une fréquence porteuse spécifique : on réalise un **multiplexage fréquentiel**.

Sauf cas particulier, l'affectation de la fréquence est imposée par l'État. Si leur répartition est judicieuse en fonction de la bande occupée et de la portée de la transmission, de nombreux émetteurs peuvent transmettre simultanément sans se perturber. Le récepteur doit toutefois posséder une sélectivité suffisante pour éliminer par filtrage les émetteurs indésirables.



Pour améliorer le rendement de l'émetteur (portée / puissance) et diminuer la bande occupée, on utilise parfois des modulations d'amplitude particulières :

- Modulation d'amplitude sans porteuse : $M(t) = k.M.\sin(2\pi.F_0.t)E(t)$. Le rendement est amélioré mais la fonction démodulation du récepteur est plus complexe (il faut reconstituer la porteuse).
- Bande latérale unique : on élimine par filtrage (ou par d'autres procédés notamment numériques) la bande latérale indésirable et la porteuse. On augmente ainsi le rendement et on réduit la bande occupée, ce qui permet d'améliorer la sensibilité du récepteur. Celui-ci est par contre plus complexe.

1.3) Modulation de fréquence (FM)

Ce procédé est plus complexe que la modulation d'amplitude. Il est utilisé dans les applications suivantes :

- Téléphonie privée "sans fil" : normes CT0 et CT1
- Téléphonie publique mobile : norme Radiocom 2000 (obsolète)
- Radiodiffusions publiques ("bande FM"),
- Télécommandes diverses (433,92MHz) ...

Certaines transmissions numériques (GSM, CT2, DECT, ...) utilisent des procédés dérivés de la modulation de fréquence (FSK, MSK, GMSK, ...).

Un signal modulé en fréquence est défini par la relation suivante : $M(t) = M.\sin[2\pi.(F_0 + K.E(t))]$

M : amplitude de la porteuse

F_0 : fréquence de la porteuse

$E(t)$: signal modulant à transmettre

K : constante en Hz/V

La fréquence "instantanée" du signal $M(t)$: $f_i = F_0 + K.E(t)$ est modifiée par le signal $E(t)$ à transmettre. La variation crête de f_i par rapport à F_0 est nommée **l'excursion de fréquence**.

Si $E(t) = E.\sin(2\pi.F_E.t)$ alors $M(t) = M.\sin[2\pi.(F_0 + K.E.\sin(2\pi.F_E.t))]$

L'excursion de fréquence est : $\Delta F = K.E$

Pour des raisons énoncées ci-dessous, on préfère utiliser l'indice de modulation m :

Indice de modulation : $m = \frac{\Delta F}{F_E}$. Il peut prendre toutes valeurs entre 0 et ∞

La représentation **temporelle** est sans intérêt pour ce type de modulation. Elle ne permet pas de mesurer facilement l'excursion de fréquence. Seule l'amplitude M peut être mesurée directement.

La représentation **fréquentielle** est nettement plus riche, mais le calcul de la composition spectrale (série de Fourier) est très complexe. A notre niveau, on utilise les **fonctions de Bessel** qui permettent de résoudre graphiquement le problème.

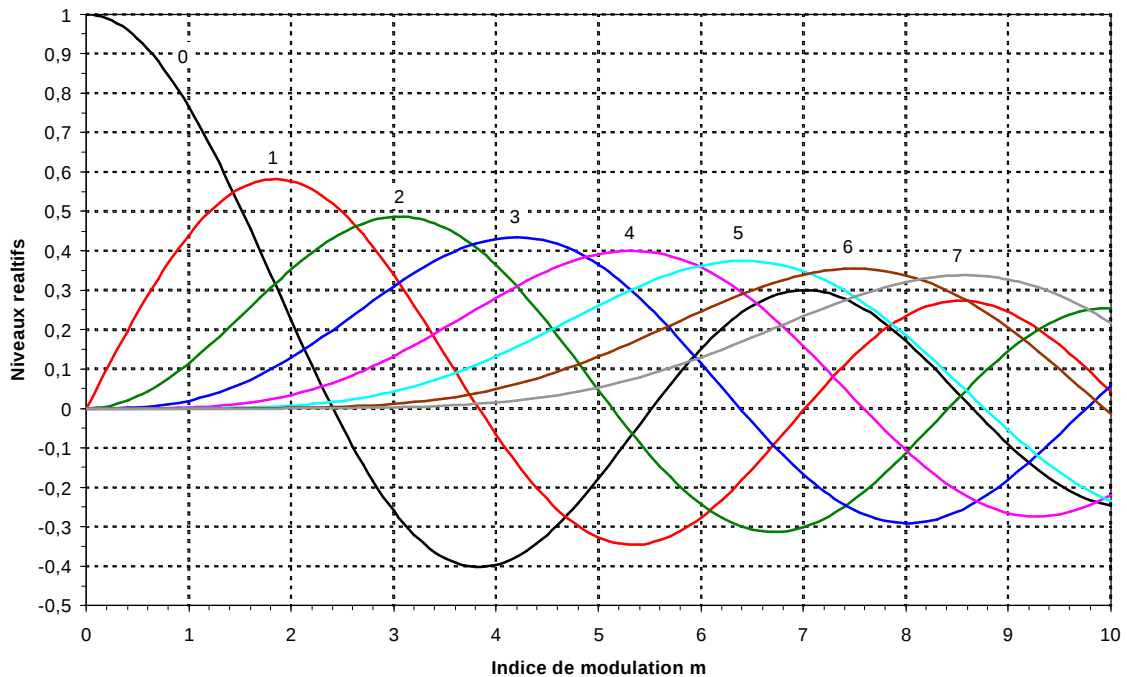
Les fonctions de Bessel indiquent les niveaux relatifs de chaque composante fréquentielle d'un signal modulé en fréquence, d'amplitude normalisée $M=1$, en fonction de l'indice de modulation m :

- La composante fondamentale de fréquence F_0 : repère 0
- Les composantes de fréquence $(F_0 - 1.F_E)$ et $(F_0 + 1.F_E)$ de même amplitude : repère 1
- Les composantes de fréquence $(F_0 - 2.F_E)$ et $(F_0 + 2.F_E)$ de même amplitude : repère 2
- Les composantes de fréquence $(F_0 - 3.F_E)$ et $(F_0 + 3.F_E)$ de même amplitude : repère 3
- Etc ...

Exemple : pour un indice de modulation de 1 ($\Delta F = F_E$), le signal modulé en fréquence est constitué (voir graphe ci-dessous) :

- D'une composante fondamentale de fréquence F_0 et d'amplitude : 0,76.M
- D'une composante de fréquence $F_0 - F_E$ et d'amplitude : 0,44.M (repère 1)
- D'une composante de fréquence $F_0 + F_E$ et d'amplitude : 0,44.M (repère 1)
- D'une composante de fréquence $F_0 - 2.F_E$ et d'amplitude : 0,115.M (repère 2)
- D'une composante de fréquence $F_0 + 2.F_E$ et d'amplitude : 0,115.M (repère 2)
- D'une composante de fréquence $F_0 - 3.F_E$ et d'amplitude : 0,02.M (repère 3)
- D'une composante de fréquence $F_0 + 3.F_E$ et d'amplitude : 0,02.M (repère 3)
- Les autres composantes ont une amplitude négligeable.

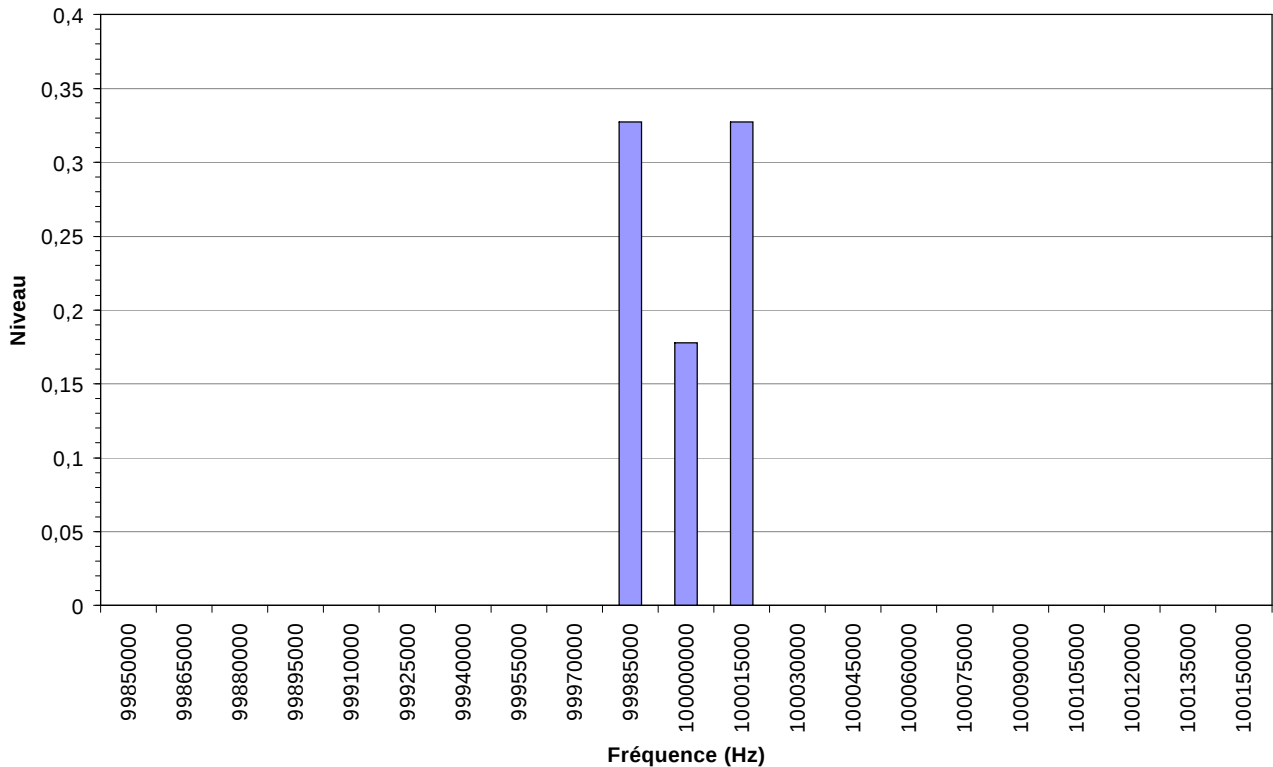
Fonctions de Bessel



Exercice :

En radiodiffusion FM, l'excursion de fréquence maximum est de 75kHz

- Calculer l'indice de modulation si le signal modulant est sinusoïdal et de fréquence 15000Hz.
- Le signal $M(t)$ produit par le modulateur de l'émetteur a les caractéristiques suivantes :
 - Amplitude de la porteuse $M = 1V$
 - Fréquence de la porteuse $F_0 = 100,000MHz$.
- En déduire les fréquences et les amplitudes de toutes les composantes de la porteuse modulée.
- Compléter le graphe ci-dessous :



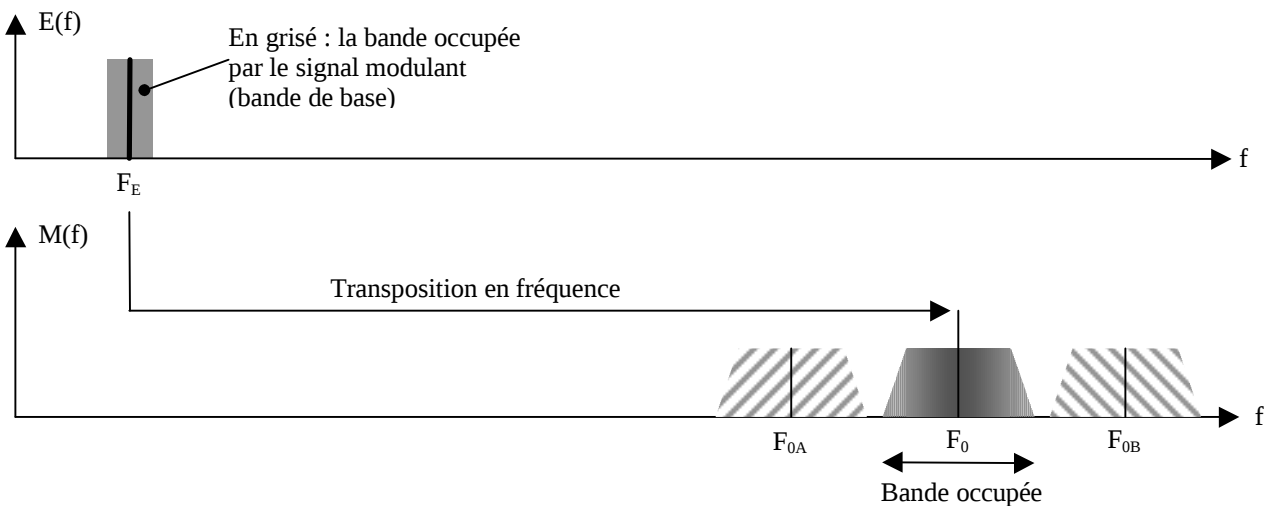
Comme l'indiquent les fonctions de Bessel, le nombre de composantes est théoriquement infini. En fait leurs niveaux diminuent très rapidement quand le rang augmente et la bande de fréquence occupée par le signal modulée n'est pas infinie. De plus, un filtre passe-bande à la sortie du modulateur élimine les résidus indésirables.

On adopte ainsi souvent la règle de Carson pour déterminer la bande occupée par le signal modulé :

$$\text{R\`egle de Carson : Bande Occup\`ee} = \boxed{BO = 2.(F_E + \Delta F)}$$

Conclusion :

La modulation de fréquence permet de r\`ealiser la fonction de transposition en fr\`equence. Toutefois, la bande occup\`ee par le signal modul\`ee (BO) est nettement plus large que celle du signal modulant (bande de base).



Exemple: en radiodiffusion la bande de base est volontairement limit\`ee \`a 15kHz. L'excursion de fr\`equence est normalement limit\`ee \`a 75kHz.

Dans ces conditions et d'apr\`es l'exercice pr\`ec\`edent, la bande occup\`ee du signal modul\`e est : **BO = 180kHz** environ, soit 12 fois plus que la bande de base.

Si ce signal est \`emis par une antenne, il ne doit pas \`etre alt\`er\`e dans sa bande de fr\`equence par d'autres \`emetteurs. La fr\`equence porteuse de ces \`emetteurs doit donc \`etre d\`ecal\`ee d'au moins 180kHz par rapport \`a F_0 . Dans la pratique, TDF (T\`el\`e-Diffusion de France) impose un \`ecart minimum de 200kHz entre les fr\`equences porteuses de 2 \`emetteurs d\`eservant une m\`eme r\`egion (par ex. F_{0A} et F_0 ci-dessus).

F5 : Amplification FI : la fonction F6 (démodulation FM) nécessite un niveau d'entrée suffisant. Le niveau du signal RF capté par l'antenne varie dans de fortes proportions en fonction de la puissance de l'émetteur, de la nature de l'antenne et surtout de la position de l'émetteur par rapport au récepteur. La fonction F5 doit donc accepter des niveaux d'entrée très différents et produire un signal de sortie F_{IA} d'amplitude constante (seule la fréquence est intéressante).

- Gain maximum : $G_{5_{MAX}}$
- Seuil d'écrtage : niveau d'entrée pour lequel le signal de sortie est juste écrté
- Niveau de sortie à l'écrtage

F6 : Démodulation FM : cette fonction est caractérisée par sa

- Sensibilité : $S_6 = \frac{\partial AUD}{\partial F_{FIA}}$ à F_{FI} (en V/Hz)
- Distorsion avec un signal modulant de 1kHz ,une excursion $\Delta F=75\text{kHz}$ et un niveau suffisant : D6

F7 : Amplification AF : cette fonction permet d'obtenir une écoute confortable avec un casque "haute impédance" :

- Puissance : $P_{MAX} = 100\text{mW}$ à 1kHz dans 30Ω environ
- Amplification réglable de 0 à la valeur permettant d'obtenir P_{MAX} pour le niveau d'entrée nominal
- Bande passante : 50Hz à 15kHz (à -3dB) minimum
- Distorsion : $\leq 10\%$ à 100mW et 1kHz

F8 : Production d'un signal sinusoïdal.

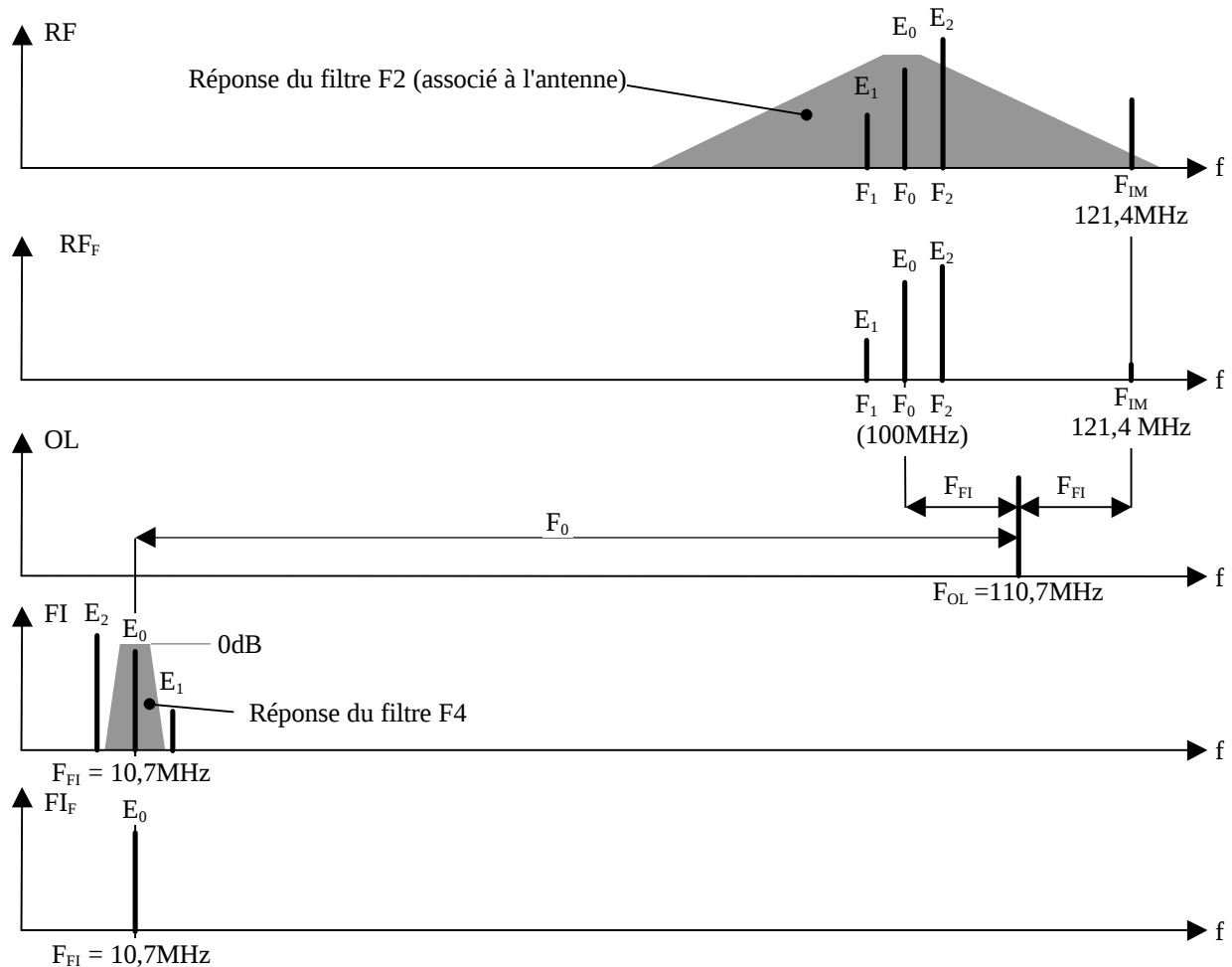
- Fréquence réglable de $88\text{MHz} + F_{FI}$ à $108\text{MHz} + F_{FI}$
- Niveau de sortie adapté à la fonction F3
- Stabilité :
- Modulation de fréquence parasite : $\leq 50\text{Hz}$ dans la bande 50Hz-15kHz
- Harmoniques : niveaux à plus de 20dB du fondamental

Description fonctionnelle**Fonctions F1 à F4**

Les spectres ci-dessous ont été dessinés dans le cas général d'un récepteur FM de radiodiffusion : $F_{FI} < F_0 < F_{OL}$.

E_0, E_1 et E_2 représentent 3 émetteurs voisins dans la bande FM. L'oscillateur local du récepteur est réglé pour démoduler l'émetteur E_0 , de porteuse $F_0 = 100\text{MHz}$.

La fréquence intermédiaire choisie est de 10,7MHz. La valeur sera différente pour le TDA7088.



L'espace est saturé d'ondes électromagnétiques (il n'existe pratiquement plus de bande libre). Contrairement à ce qui est dessiné ci-dessus, le signal RF comporte une infinité de raies correspondant à tous les émetteurs de la région capté par l'antenne.

Les 3 raies dessinées sur le graphe RF représentent, à titre d'exemple, les bandes utilisées par 3 émetteurs E_0, E_1 et E_2 autour des fréquences porteuses F_0, F_1 et F_2 . Le récepteur doit démoduler l'émetteur E_0 de porteuse 100 MHz.

Le **procédé superhétérodyne** offre de nombreux avantages (simplicité, performances), malheureusement il présente un inconvénient majeur : sans précautions particulières et pour un accord donné, le récepteur est sensible à 2 fréquences : F_0 (l'accord désiré) et F_{IM} (accord non désiré sur la fréquence "image").

Dans l'exemple représenté, la **fréquence "image"** F_{IM} vaut 121,4MHz quand le récepteur est réglé pour écouter l'émetteur E_0 de porteuse $F_0 = 100\text{MHz}$. Si la fréquence F_{IM} n'est pas occupée, la réception est parfaite. Par contre, si un autre émetteur utilise cette fréquence, le récepteur traitera de la même façon les 2 porteuses modulées, et l'écoute sera inaudible.

La fonction F2 permet de limiter ce phénomène en atténuant autant que possible le niveau de l'éventuelle porteuse de fréquence F_{IM} . Cette atténuation est d'autant plus forte que F_{IM} est éloignée de F_0 . L'écart entre ces 2 fréquences est égal à $2.F_{FI}$, on choisit ainsi généralement une fréquence intermédiaire aussi grande que possible, sans pour autant augmenter les coûts. Les récepteurs professionnels utilisent souvent une fréquence intermédiaire de 50MHz.

Cette fonction F2 n'est, par contre, pas capable d'éliminer les émetteurs voisins E_1 et E_2 indésirables.

Le spectre du signal RF_F est transposé autour de F_{FI} grâce à F3 et à l'oscillateur local. La fonction F3 est réalisée par un circuit non linéaire ; on peut utiliser un multiplieur.

Si la fonction F3 réalise parfaitement la multiplication :

$$FI = K_3 \times RF_F \times OL$$

Si on injecte une porteuse non modulée au niveau de l'antenne (pour un test par exemple) :

$$RF_F = E_0 \cdot \sin(2\pi \cdot F_0 \cdot t)$$

Si la fonction F8 produit un signal sinusoïdal pur :

$$OL = U_{OL} \cdot \sin(2\pi \cdot F_{OL} \cdot t)$$

En décomposant la multiplication, le signal produit par la fonction F3 est alors :

$$FI = \frac{K_3 \cdot E_0 \cdot U_{OL}}{2} \cdot \cos[2\pi \cdot (F_{OL} - F_0) \cdot t] - \frac{K_3 \cdot E_0 \cdot U_{OL}}{2} \cdot \cos[2\pi \cdot (F_{OL} + F_0) \cdot t]$$

Les 2 composantes du signal FI se distinguent par leurs fréquences :

- Fréquence $F_{OL} - F_0$: signal utile. La modulation de fréquence de la porteuse F_0 se retrouve intégralement dans cette composante car F_{OL} est une constante (pour un accord donné). La transposition n'a pas altéré l'information utile (le signal modulant).
La fréquence F_{OL} est choisie de telle façon que $F_{OL} - F_0 = F_{FI} = 10,7\text{MHz}$
- Fréquence $F_{OL} + F_0$ (soit $110,7 + 100 = 210,7\text{MHz}$ dans l'exemple) : composante indésirable, facilement éliminée par le filtre F4

Conclusion : L'association des fonctions F3 et F8 **transpose** la bande de fréquence utilisée par l'émetteur E_0 sur la fréquence centrale du filtre F4.

La sélectivité du **filtre F4** permet d'éliminer les émetteurs indésirables E_1 et E_2 . Les fonctions F5 et F6 fonctionnent alors dans des conditions optimales (pas de mélange de signaux modulés).

Note : pour sélectionner l'émetteur E_2 (fréquence F_2 supérieure à F_0), il faut **augmenter** la fréquence de l'OL (F_2 est une constante) de manière à transposer sa fréquence porteuse sur la fréquence centrale du filtre FI.

Fonction F5 : Amplification FI

Le signal capté par l'antenne est très faible. Un bon récepteur FM doit permettre une écoute confortable, sans bruit ni distorsion excessifs, pour un niveau à l'antenne de $10\mu\text{V}_{\text{eff}}$ sur 50Ω (soit -87dBm).

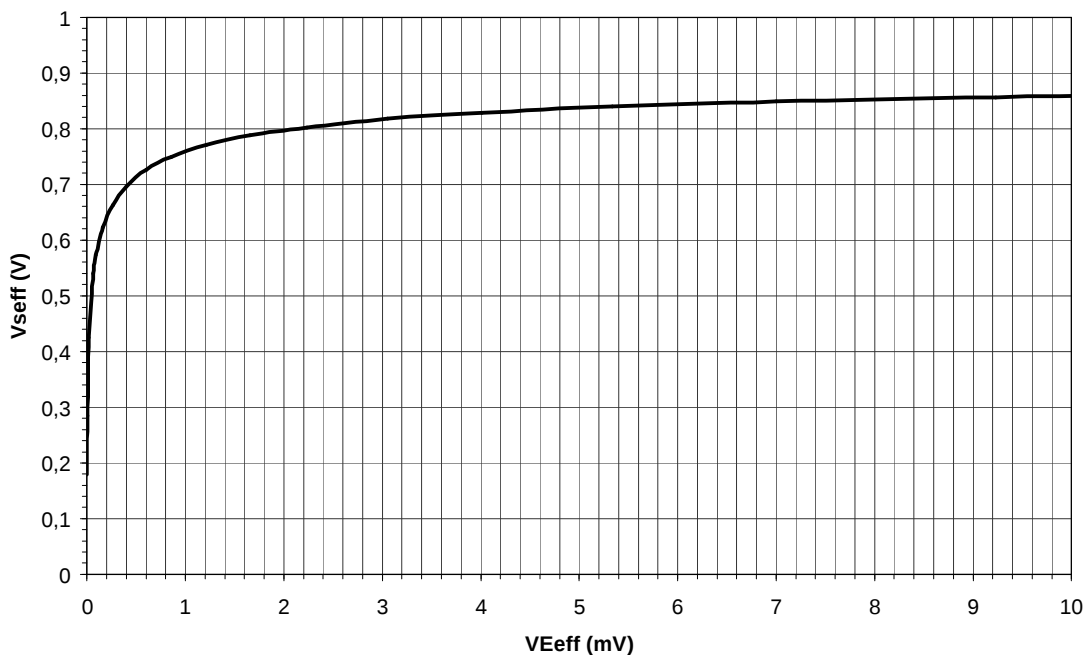
La fonction F6 (démodulation) nécessite généralement un niveau d'entrée de l'ordre de 1V_{eff} . Ainsi entre F2 et F6, la composante utile doit être amplifiée de $1\text{V}/10\mu\text{V} = 100000$, soit **100dB** environ !

Les fonctions F3 et F4 sont généralement atténuatrices (car réalisées uniquement avec des composants passifs). Par contre la fonction F2 offre souvent un gain qui permet à l'ensemble F2-F3-F4 d'amplifier le signal utile de 10 à 20dB environ.

La fonction F5 a donc la charge d'apporter le gain nécessaire, soit **$G_{5\text{MAX}} = 80$ à 90dB environ.**

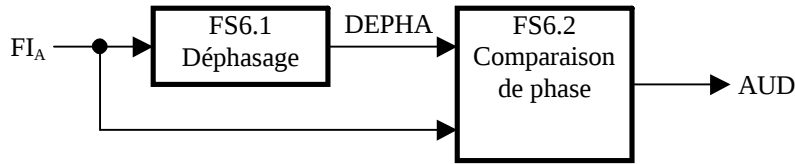
De plus, l'étage de sortie de l'amplificateur doit posséder des caractéristiques d'écrtage du signal parfaitement connues. Cela assure un fonctionnement optimal du démodulateur qui suit (F6) en cas de réception de signaux forts.

Ces 2 caractéristiques peuvent être résumées par la **courbe de linéarité de l'amplificateur FI**. Exemple :



Fonction F6 : démodulation

On utilise le procédé de démodulation à "quadrature de phase" car il offre le meilleur rapport qualité/prix.



Le signal FIA est fourni par l'amplificateur FI (F5). Dans le cas réel, c'est un signal modulé en fréquence autour de FFI et écrêté par l'étage de sortie de F5. Toutefois, pour l'analyse de la fonction F6, on supposera ce signal sinusoïdal et non modulé :

$$FIA = E_{FI} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad \text{avec } E_{FI} = \text{constante}$$

Fonction F6.1

La fonction secondaire FS6.1 déphase ce signal en fonction de la fréquence :

$$DEPHA = T_{61} \cdot E_{FI} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad \text{avec } \varphi = K_D \cdot \partial f + \varphi_0 \quad \text{et } \partial f = f - F_{FI}$$

∂f est la déviation de fréquence "instantanée" par rapport à F_{FI} .

Les paramètres T_{61} et K_D sont des constantes de la fonction FS6.1. T_{61} est généralement proche de 1 et K_D est adapté à l'excursion de fréquence à démoduler.

$\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$: cela justifie la dénomination "en quadrature de phase"

Ainsi, pour l'excursion nominale $\partial f = \Delta F$, la phase de DEPHA par rapport à FIA varie de $\Delta\phi = K_D \cdot \Delta F$

Compte-tenu des performances de FS6.2, on choisit K_D pour obtenir $\Delta\phi \cong \frac{\pi}{4} \text{ rd}$ environ

Fonction F6.2

Cette fonction est caractérisée par la relation suivante :

$$AUD = K_\phi \cdot \varphi$$

Soit $AUD = K_\phi \cdot (K_D \cdot \partial f + \varphi_0)$

$$AUD = K_F \cdot \partial f + AUD_0 \quad \text{avec } K_F = K_\phi \cdot K_D \quad \text{et } AUD_0 = K_\phi \cdot \varphi_0$$

La solution structurelle la plus employée est la **cellule de Gilbert**.

Fonction F7 : amplification AF

Cette fonction ne nécessite pas de description complémentaire.

Fonction F8 : production d'un signal sinusoïdal

Cette fonction ne nécessite pas de description complémentaire.

