

## Chapitre 5 : Architecture des récepteurs analogiques

### 1. Principe de fonctionnement d'un émetteur radio fréquence

L'émetteur module le signal utile qui porte l'information et amplifie la puissance de signal modulé avant de l'envoyer au canal de transmission. La porteuse est générée par un oscillateur à fréquence très stable.

Il faut limiter la bande passante de signal utile avant de le moduler. Pour cela on utilise un filtre passe bas.

Par exemple : Dans le cas d'un signal audio, on limite le signal sur une bande de 300 Hz – 3400 Hz pour une modulation BLU, et une bande de 20 Hz – 15 kHz pour une FM de qualité.

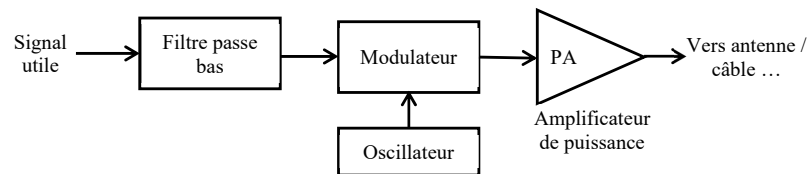


Figure 1 : Schéma de principe d'un émetteur radio fréquence.

Le canal de transmission est généralement partagé en plusieurs sous-canaux suivant des normes. Chaque sous-canal est caractérisé par sa fréquence centrale et sa largeur de bande.

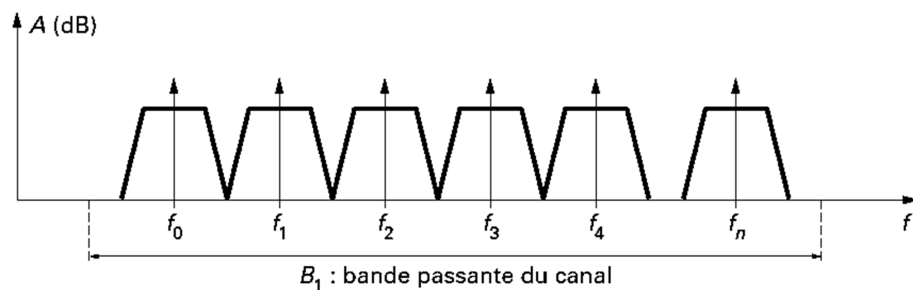


Figure 2 : Multiplexage fréquentiel de n porteuses.

Donc, plusieurs émetteurs peuvent partager un même canal de transmission, chacun utilise une fréquence d'émission définie. Cette disposition est appelée : multiplexage fréquentiel.

### 2. Signal minimum détectable par un récepteur

On considère un récepteur avec un gain total G, une bande passante B, une température équivalente  $T_e$  et un facteur de bruit F.

$N_e$  et  $N_s$  sont la puissance de bruit à l'entrée et à la sortie du récepteur respectivement.

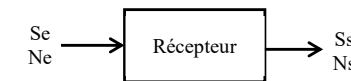


Figure 3 : Signaux à l'entrée et à la sortie d'un récepteur.

La puissance de bruit à la sortie de récepteur à la température  $T_0$  est donnée par :

$$N_s = N_p + GN_e = GkT_e B + GkT_0 B = Gk(T_e + T_0)B = GkFT_0 B$$

Ce qui correspond à l'entrée de récepteur à une puissance équivalente :

$$\text{Plancher de Bruit} = kFT_0 B$$

En décibels :

$$\text{Plancher de bruit (dBm)} = 10 \log(kT_0) + F_{dB} + 10 \log(B) + 30$$

Finalement :

$$\text{Plancher de bruit (dBm)} = -174 + F_{dB} + 10 \log(B)$$

Cette quantité constitue le plancher de bruit (Noise floor) de ce récepteur, c'est un bruit interne produit par le récepteur lui-même. Un signal  $S_e$  inférieur à cette valeur sera perdu dans le bruit et non détecté par le récepteur, car même si on l'amplifie on va amplifier le bruit avec le signal.

En général, on considère qu'un signal est détectable à l'entrée d'un récepteur si sa puissance est supérieure de 3dB à la puissance du plancher de bruit.

Donc le Signal minimum détectable par un récepteur noté MDS (Minimum Detectable Signal) s'écrit :

$$\text{MDS (dBm)} = -171 + F_{dB} + 10 \log(B)$$

Le MDS ne représente que le signal minimum vu par un récepteur, mais la qualité de signal capté dans ce cas n'est pas bonne.

La figure (4) montre la densité spectrale de puissance du signal à l'entrée d'un récepteur.

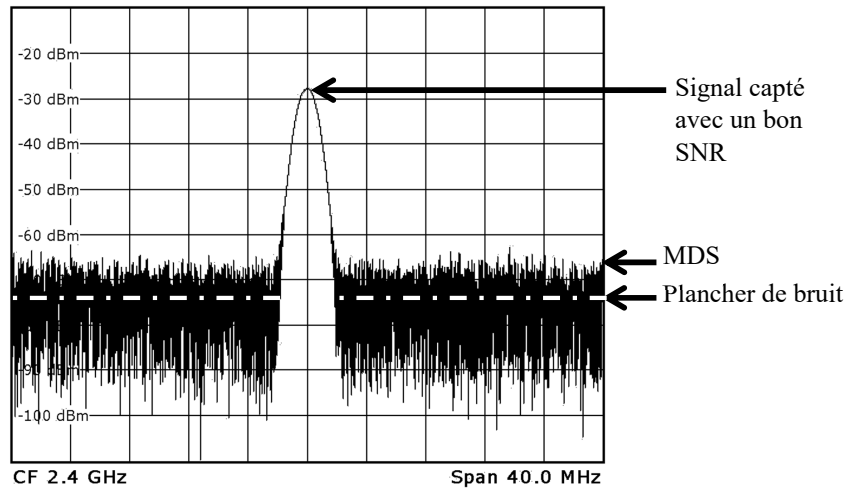


Figure 4 : Spectre d'un signal reçu par un récepteur.

Le signal se compose d'un signal utile et d'un bruit blanc gaussien qui s'étale sur la toute la bande. Le plancher de bruit est la valeur moyenne de sa puissance. Le MDS se trouve à 3dB au-dessus du plancher de bruit. Un récepteur qui génère moins de bruit détecte des plus faibles signaux.

La puissance du signal utile capté est plus élevée que le plancher de bruit de ce récepteur, ce qui donne un bon rapport de signal sur bruit.

**Exemple :** Soit un récepteur avec un facteur de bruit de 10dB.

On trouve :  $MDS = -101 \text{ dBm}$  pour  $B = 1 \text{ MHz}$  et  $MDS = -71 \text{ dBm}$  pour  $B = 1 \text{ GHz}$ .

### 3. Performances d'un récepteur

En général, le récepteur est beaucoup plus compliqué que l'émetteur. Il doit recevoir un signal parmi plusieurs, avant de le démoduler pour restituer le signal original. Le signal est reçu avec une puissance très faible et en présence de bruit.

Parmi les critères qui permettent d'évaluer un récepteur, on cite : sensibilité, sélectivité, stabilité.

#### 3.1. Sensibilité

La sensibilité d'un récepteur est définie comme étant la tension efficace à appliquer à son entrée pour obtenir à la sortie du démodulateur un SNR défini. Ce SNR est normalisé selon la modulation et l'application.

Il est possible de calculer la sensibilité en puissance par :

$$S(\text{dBm}) = -174 + F_{dB} + 10\text{Log}(B) + \text{SNR}(\text{dB})$$

La sensibilité d'un récepteur définit sa capacité à recevoir des signaux faibles. Elle dépend essentiellement de son plancher de bruit, donc du facteur de bruit de premier étage et de sa bande passante.

**Exemple :** On veut un SNR supérieur à 10dB à la sortie d'un récepteur ayant une impédance d'entrée de  $50\Omega$ . Pour cela il faut une tension efficace de  $5\mu\text{V}$  à son entrée.

On dit que la sensibilité de ce récepteur est de  $5\mu\text{V}$ , ce qui correspond à une puissance de  $-93\text{dBm}$ .

#### 3.2. Sélectivité

La sélectivité décrit l'aptitude du récepteur à recevoir le canal désiré et en même temps rejeter les canaux adjacents. Elle dépend essentiellement des filtres passes bandes qui constituent le récepteur.

La bande passante totale du récepteur doit être assez large pour laisser passer le canal désiré, mais en même temps bloquer les canaux voisins.

#### 3.3. Stabilité

La stabilité est la conservation d'un comportement identique malgré la variation de paramètres extérieurs : tension d'alimentation, température, vieillissement... Le point essentiel est la dérive de l'accord, donc de la fréquence reçue.

La stabilité peut être exprimée en  $[\text{Hz}/\text{V}]$  pour la stabilité en fonction de l'alimentation ou en  $[\text{Hz}/\text{C}^\circ]$  pour la stabilité en température.

Pour assurer la stabilité en fréquence, les récepteurs peuvent utiliser des techniques de compensation, de stabilisation en température, de commande automatique de fréquence (CAF), des oscillateurs à quartz.

#### 4. Récepteur à démodulation directe

Ce récepteur démodule directement le signal capté à son entrée après une amplification.

Le schéma de ce récepteur est donné par la figure suivante :

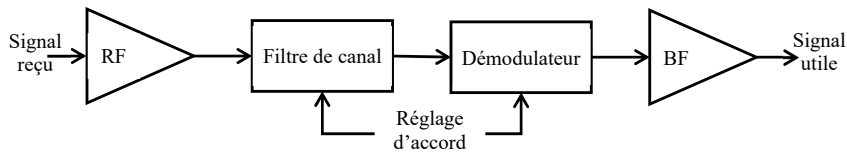


Figure 5 : Récepteur à modulation directe.

**Amplificateur d'entrée (RF) :** C'est un amplificateur à faible bruit (LNA : low noise amplifier), très sensible qui assure une première amplification et améliore le rapport signal sur bruit.

**Filtre de canal :** Il permet de sélectionner le canal désiré et d'éliminer les signaux indésirables. Il limite aussi la bande passante de bruit. Il doit être sélectif.

**Démodulateur :** C'est un démodulateur AM / FM / PM qui extrait le signal modulant du signal modulé.

**L'amplificateur du signal utile (BF) :** Il amplifie la tension de signal démodulé.

Dans cette structure, la sensibilité est déterminée par l'amplificateur RF, la sélectivité est déterminée par le filtre de canal et la stabilité par l'oscillateur du démodulateur.

L'avantage de cette structure, c'est qu'elle est simple à réaliser.

L'inconvénient c'est qu'il est difficile ou impossible que les blocs conservent les mêmes performances (sensibilité, sélectivité et stabilité) pour toutes fréquences utilisées. Par exemple, il est impossible de réaliser un filtre de canal sélectif et accordable en même temps.

### 5. Récepteur à changement de fréquence (hétérodyne)

#### 5.1. Le changeur de fréquence

Soit le système de la figure (6) composé par un oscillateur local, un mélangeur et un filtre.

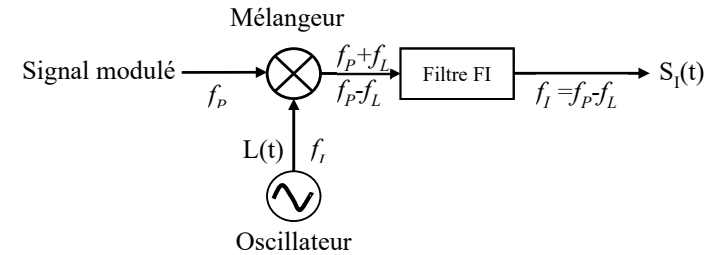


Figure 6 : Schéma bloc d'un changeur de fréquence.

Un signal modulé est placé à l'entrée de mélangeur :  $p(t) = A_p \cos(\omega_p t)$

La deuxième entrée de mélangeur reçoit :  $L(t) = A_L \cos(\omega_L t)$ .

A la sortie, on récupère le produit de ces deux signaux :

$$s_m(t) = s(t) \cdot L(t)$$

$$s_m(t) = A_p \cos(\omega_p t) \cdot A_L \cos(\omega_L t)$$

$$s_m(t) = \frac{A_p A_L}{2} \cos(\omega_p + \omega_L)t + \frac{A_p A_L}{2} \cos(\omega_p - \omega_L)t$$

Le filtre FI est un filtre passe-bande centré sur la fréquence  $f_p - f_L$  :

$$s_i(t) = A_i \cos(\omega_p - \omega_L)t$$

On pose la fréquence intermédiaire :  $f_i = f_p - f_L$

D'où le signal :  $s_i(t) = A_i \cos(\omega_i t)$ .

On a donc réalisé un changement de fréquence porteuse du signal modulé, sans changer l'allure du spectre. Ce système est appelé changeur de fréquence.

#### 5.2. Principe d'un récepteur hétérodyne

Le mot « hétérodyne » est composé du grec « hétéro » qui veut dire différent et « dyne » qui veut dire puissance, car on utilise un mélange de fréquences.

Un récepteur hétérodyne est un récepteur à changement de fréquence, il convertit la fréquence  $f_p$  de signal modulé en une fréquence intermédiaire  $f_i$  plus basse, fixe et indépendante de la fréquence du signal d'entrée.

Le réglage de la fréquence de l'oscillateur local  $f_L$ , permet de sélectionner n'importe quelle fréquence de réception  $f_p = f_L + f_i$ .

Par exemple, la fréquence intermédiaire est de 455 kHz pour la radio AM, 10,7 MHz pour la radio FM et 38,9 MHz pour la télévision en Europe.

**Exemple :** Soit un signal modulé à une fréquence de 45MHz. La fréquence intermédiaire est de 455KHz.

La fréquence de l'oscillateur local :  $f_L = f_p - f_i = 45\text{MHz} - 455\text{KHz} = 44.545\text{MHz}$ .

À la sortie de mélangeur, on obtient les deux fréquences 455KHz et 89.545MHz. La deuxième fréquence est supprimée par le filtre.

### 5.3. La fréquence image

Il existe deux fréquences différentes qui permettent d'avoir  $f_i$  à partir de  $f_L$  :

$$\begin{cases} f_i = f_p - f_L \text{ Avec : } f_p > f_L \\ f_i = f_L - f_p' \text{ Avec : } f_p' < f_L \end{cases}$$

Par exemple : pour passer de  $f_p = 100\text{MHz}$  vers  $f_i = 10\text{MHz}$ , il faut que  $f_L = 90\text{MHz}$ . Mais, même la fréquence :  $f_p' = 8\text{MHz}$  peut passer à travers le changeur de fréquence car :  $f_i = |80\text{MHz} - 90\text{MHz}| = 10\text{MHz}$ .

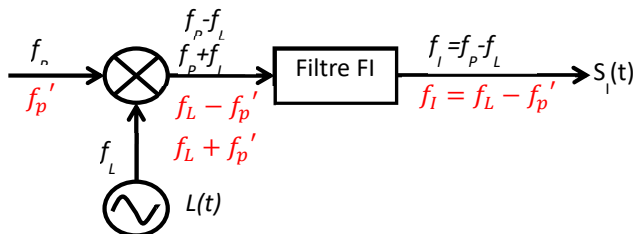


Figure 7 : Deux fréquences différentes permettent d'avoir  $f_i$

Une des deux fréquences  $f_p$  et  $f_p'$  est indésirable, on l'appelle fréquence image. Donc pour une fréquence  $f_L$ , on reçoit en même temps la fréquence désirée et la fréquence image qui constitue une interférence.

Les deux fréquences  $f_p$  et  $f_p'$  sont symétriques par rapport à la fréquence locale  $f_L$ , et séparées l'une par rapport à l'autre par  $2 f_i$ .

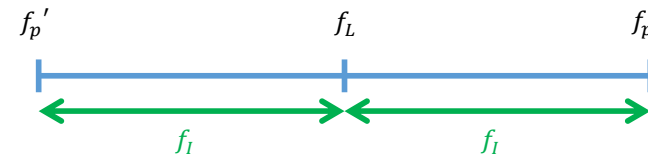


Figure 8 : fréquence image par rapport à la fréquence voulue.

Pour empêcher la fréquence image d'atteindre le changeur de fréquence, on utilise un filtre passe-bande avant le mélangeur.

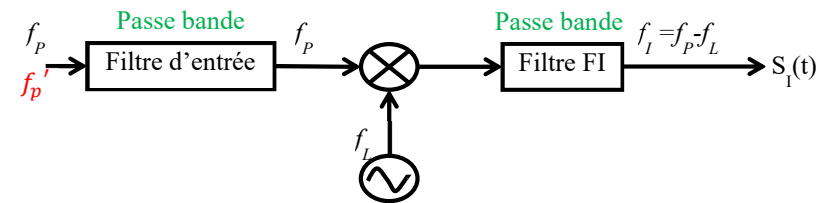


Figure 9 : Elimination de la fréquence image.

### 5.4. Avantages de changement de fréquence

Comme la fréquence intermédiaire est fixe, il est possible de réaliser un filtre de canal très sélectif à la fréquence unique  $f_i$ , ce qui permet au récepteur de disposer d'une meilleure sélectivité.

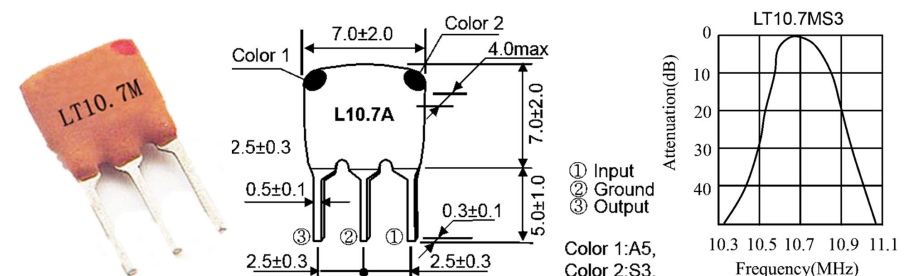


Figure 10 : Un filtre céramique pour la fréquence 10.7MHz. Photo réelle ; Schéma du composant ; réponse fréquentielle du filtre.

Parmi les avantages de changement de fréquence, c'est de travailler en basses fréquences où il est plus facile de réaliser des circuits performants (Filtres sélectifs, amplificateurs). Ou bien d'utiliser les filtres céramiques ou piézoélectriques.

En plus, il est plus simple de démoduler un signal de fréquence moyenne qu'un signal à fréquence très grande.

### 5.5. Schéma bloc d'un récepteur superhétérodyne

Le schéma bloc global d'un récepteur superhétérodyne est donné par la figure (11) pour les récepteurs AM et par la figure (12) pour les récepteurs FM ou PM. Il est composé par l'étage RF, le l'étage FI et le démodulateur suivi par un amplificateur BF.

#### Le bloc RF :

Le filtre RF d'entrée élimine les signaux indésirables et assure la réjection de la fréquence image. Ça bande de fréquence peut être ajustable pour recevoir les différentes bandes.

L'amplificateur RF à faible bruit (LNA) amplifie le signal et améliore le rapport de signal sur bruit. C'est cet amplificateur détermine la sensibilité de récepteur. Il peut être constitué par plusieurs étages.

#### Le bloc FI :

Le mélangeur multiplie la fréquence RF par la fréquence de l'oscillateur local, il produit deux composantes. La stabilité du récepteur dépend de la stabilité en fréquence de l'oscillateur local. Pour cela on utilise un oscillateur stabilisé par PLL ou bien un synthétiseur de fréquences.

Le filtre FI est très sélectif avec une bande de fréquence fixe, il sélectionne la fréquence FI et permet aussi de limiter la bande passante de bruit, donc sa puissance. C'est ce filtre qui détermine la sélectivité de récepteur.

L'amplificateur FI souvent constitué de plusieurs étages, ramène le signal au niveau nécessaire pour la démodulation.

#### Le démodulateur :

Le démodulateur AM/FM/PM permet de récupérer le signal modulant.

#### L'amplificateur BF :

C'est un amplificateur basse fréquence, son rôle est d'amplifier le signal démodulé.

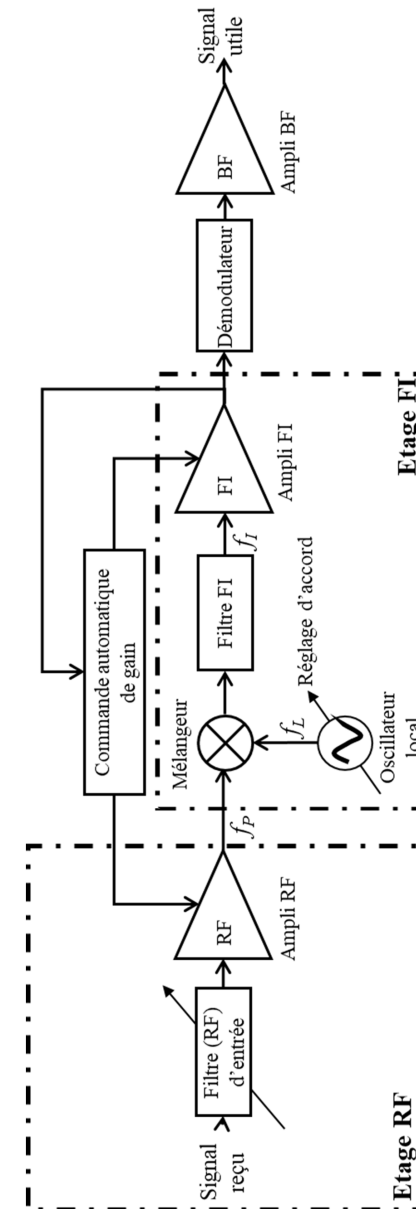


Figure 11 : Schéma bloc d'un récepteur AM hétérodyne.

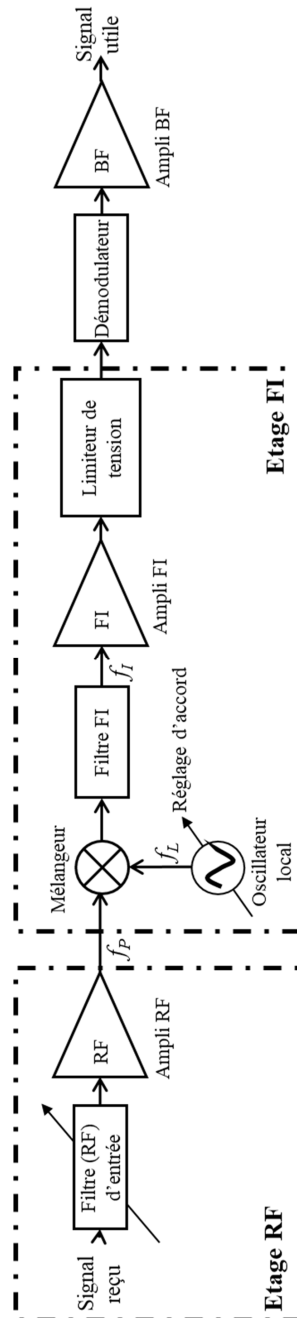


Figure 12 : Schéma bloc d'un récepteur FM/PM hétérodyne.

**Contrôle automatique de gain en AM :**

La puissance reçue par le récepteur dépend de la distance qui le sépare de l'émetteur, de la puissance d'émission ..., le signal reçu peut être de faible amplitude, comme il peut être d'amplitude élevée, ce qui va saturer les amplificateurs et causer des distorsions de signal. Pour cela, le gain des amplificateurs ne peut pas être fixe.

Pour un récepteur AM, un étage de commande automatique de gain est nécessaire, il permet d'ajuster le gain de l'amplificateur FI pour fournir un signal avec une puissance moyenne constante.

**Limiteur de tension pour les récepteurs FM/PM :**

Pour un récepteur FM ou PM, un étage limiteur d'amplitude empêche le signal de dépasser une certaine valeur de tension.

**6. Récepteur à multiples changements de fréquence**

On choisit une fréquence intermédiaire basse pour gagner en sélectivité et en simplicité. Mais pour une basse fréquence intermédiaire, la fréquence image est très proche de la fréquence de signal désiré. Ce qui pose un problème avec sa réjection.

Donc il faut choisir une fréquence intermédiaire grande pour éloigner la fréquence image de la fréquence à recevoir, mais il faut aussi qu'elle soit petite pour d'obtenir une bonne sélectivité.

La solution c'est d'utiliser un système avec double changements de fréquence.

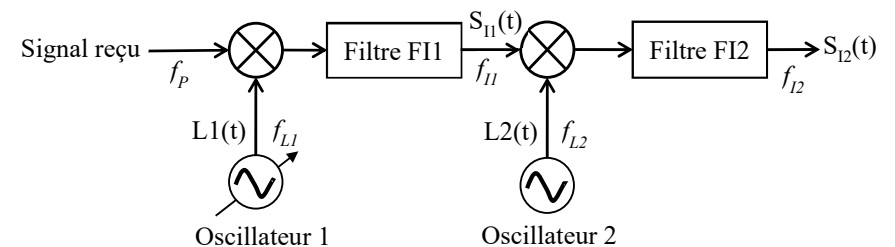


Figure 13 : Schéma bloc d'un étage FI à double conversion.

Un premier changement utilise une fréquence  $f_{I1}$  élevée ce qui permet de rejeter facilement la fréquence image. La fréquence de signal à la sortie de l'étage FI1 s'écrit :

$$f_{I1} = f_P - f_L$$

Le deuxième changement utilise une fréquence  $f_{i2}$  plus basse qui facilite la suite du traitement. La fréquence de signal à la sortie de l'étage FI2 s'écrit :

$$f_{i2} = f_{i1} - f_{L2}$$

La fréquence du premier oscillateur local est ajustable pour pouvoir accorder le récepteur sur une fréquence  $f_p$ . Puisque  $f_{i1}$  est fixe, le second oscillateur local a une fréquence fixe.

Selon les besoins, il est possible d'utiliser plusieurs changements de fréquence.

### 7. Récepteur à conversion directe (Homodyne)

Un récepteur à conversion directe contient un étage de conversion qui convertit la fréquence porteuse directement à la bande de base au lieu de la convertir en une fréquence intermédiaire plus petite.

La fréquence fournie par l'oscillateur local est égale à la fréquence porteuse  $f_p$  du signal reçu et la fréquence intermédiaire est nulle.

#### 7.1. Récepteur AM à conversion directe

La figure 11 montre le schéma bloc d'un récepteur AM à conversion directe.

Le récepteur reçoit un signal :  $S_{AM}(t) = (A_p + b(t))\cos(\omega_p t + \varphi)$

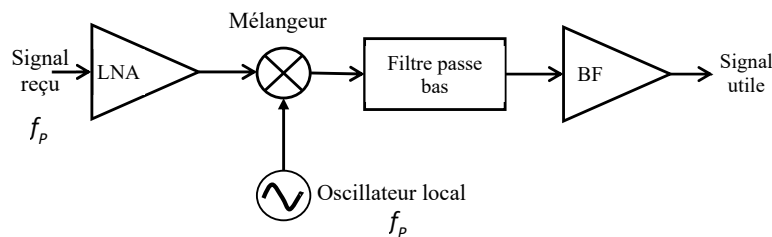


Figure 14 : Récepteur à conversion directe pour la AM.

A la sortie du mélangeur, on obtient :

$$s_m(t) = (A_p + b(t))\cos(\omega_p t + \varphi)\cos(\omega_p t + \varphi)$$

$$s_m(t) = \frac{1}{2}(A_p + b(t))\cos(2\omega_p t + 2\varphi) + \frac{A_p}{2} + \frac{b(t)}{2}$$

Le filtre passe-bas supprime la composante avec la fréquence  $2f_p$  et on obtient directement le signal modulant :

$$s(t) = b(t)$$

Dans ce cas, le récepteur n'a pas besoin d'un démodulateur, car l'étage de conversion effectue la démodulation.

L'avantage de ce récepteur c'est qu'il est plus simple qu'un récepteur hétérodyne même plus simple qu'un récepteur à démodulation directe, car il utilise un filtre passe-bas simple et ne nécessite pas un filtre FI ou un filtre passe-bande ajustable. Ce récepteur n'a pas besoin d'un démodulateur séparé, car l'étage de conversion effectue lui-même la démodulation. Mais, ce récepteur ne peut pas être utilisé pour la réception FM ou PM, car il ne peut pas lire la phase.

#### 7.2. Récepteur FM/PM à conversion directe

Dans le cas de la réception d'un signal FM/PM le récepteur à conversion directe est plus compliqué. Son schéma bloc est donné par la figure 12.

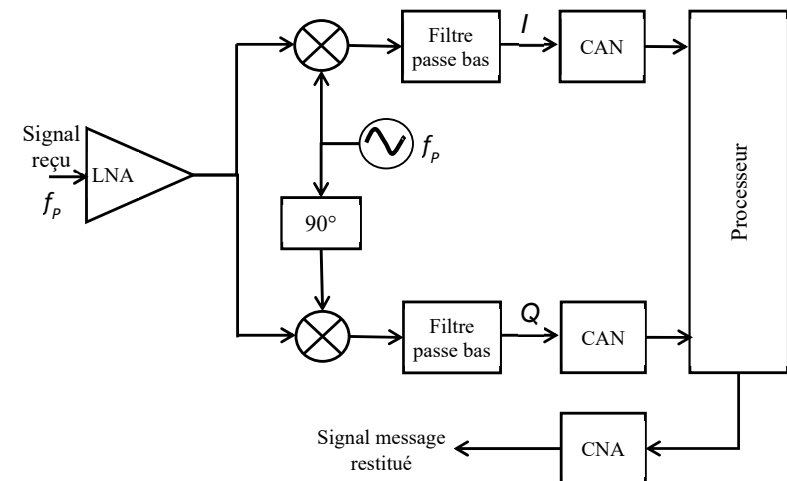


Figure 15 : Récepteur à conversion directe pour la FM/PM.

Le signal (FM/PM) reçu ayant une fréquence  $f_p$  alimente deux mélangeurs, le premier mélangeur le multiplie par un signal avec la même fréquence et en phase, tandis que le deuxième mélangeur le multiplie par un signal avec la même fréquence mais en quadrature de phase.

Le récepteur reçoit un signal :  $S_p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \varphi(t) + \varphi_0)$

Le signal modulant est contenu dans la phase  $\varphi(t)$  tout dépend du type de la modulation FM ou PM.

On considère que le signal de l'oscillateur local s'écrit :  $L(t) = \cos(\omega_p t + \varphi_0)$

A la sortie du premier mélangeur, on obtient :

$$s(t) = A_p \cos(\omega_p t + \varphi(t) + \varphi_0) \cos(\omega_p t + \varphi_0) =$$

$$s(t) = \frac{A_p}{2} \cos(2\omega_p t + \varphi(t) + 2\varphi_0) + \frac{A_p}{2} \cos(\varphi(t))$$

A la sortie du filtre passe-bas, on récupère la composante I en phase « In phase » :

$$I = \frac{A_p}{2} \cos(\varphi(t))$$

A la sortie du deuxième mélangeur, on obtient :

$$s(t) = A_p \cos(\omega_p t + \varphi(t) + \varphi_0) \sin(\omega_p t + \varphi_0)$$

$$s(t) = \frac{A_p}{2} \sin(2\omega_p t + \varphi(t) + 2\varphi_0) - \frac{A_p}{2} \sin(\varphi(t))$$

A la sortie du filtre passe-bas, on récupère la composante Q en quadrature de phase « Quadrature » :

$$Q = \frac{A_p}{2} \sin(\varphi(t))$$

Deux convertisseurs analogiques numériques (CAN) convertit les composantes I et Q en binaire. Un processeur utilise un algorithme pour traiter ces données binaires (I et Q) et calcule le signal modulant, il fournit ce signal en binaire. Un convertisseur numérique analogique (CNA) le convertit en signal analogique pour restituer l'information.

C'est l'architecture utilisée actuellement dans les téléphones mobiles et les routeurs.

#### Bibliographie :

1. Louis E. Frenzel Jr; Principles of Electronic Communication Systems, Fourth Edition; McGraw-Hill Education, 2016.
2. John G. Proakis, Masoud Salehi ; Communication systems engineering, 2nd Ed. ; Prentice-Hall, Inc. 2002.
3. Leon W. Couch II; Digital and analog communication systems, Eighth Edition; Pearson Education, Inc, 2013.
4. François de Dieuleveult, Olivier Romain ; Electronique appliquée aux hautes fréquences, Principes et applications, 2e édition ; Dunod, 2008.
5. Devendra K. Misra; Radio-frequency and microwave communication circuits, Analysis and Design, 2e édition ; John Wiley & Sons, Inc, 2004.