

Module :

mélange et mélangeurs



▶ Diaporama : le mélange et les mélangeurs

▶ Itinéraire pédagogique

▶ Résumé de cours

- 1- Mélange de deux signaux sinusoïdaux
 - 2- Mélange d'une porteuse modulée avec une sinusoïde
 - 3- La fonction « changement de fréquence »
 - 4- Le changement de fréquence dans un émetteur
 - 5- Le changement de fréquence dans un récepteur
 - 6- Le problème de la fréquence image
 - 7- Les différents types de mélangeurs
- Annexe 1 : vue d'ensemble d'un émetteur
Annexe 2 : vue d'ensemble d'un récepteur à changement de fréquence

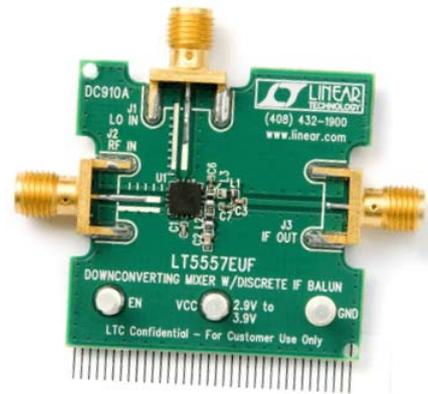
▶ Exercices

▶ Corrigés des exercices

▶ Questionnaire : le mélange

▶ Réponses au questionnaire

Itinéraire pédagogique : le mélange et les mélangeurs



► Diaporama :

diapos	contenu
1-4	principe de base
5-6	changement de fréquence dans un émetteur
7-15	changement de fréquence dans un récepteur
16-17	le filtre de fréquence intermédiaire
18-20	la fréquence image
21-26	exemples de récepteurs
27-29	les différents types de mélangeurs
30-33	le mélangeur à transistors (cellule de Gilbert)
34-41	le mélangeur à diode

► Fondamentaux :

Le changement de fréquence par mélange de deux signaux est une fonction de base des télécommunications **(1)**.

Le mélange :

- consiste à multiplier le signal à traiter par un signal sinusoïdal
- produit deux signaux à deux nouvelles fréquences (somme et différence)
- conserve les modulations (AM, FM, numérique)

Il est largement utilisé dans les émetteurs **(2)** et dans les récepteurs à changement de fréquence **(3-4-5-6-7-8)**.

Pour « faire du mélange », il n'est pas besoin d'utiliser un coûteux multiplieur : un dispositif ayant de la distorsion suffit **(9)** :

- le mélangeur le plus utilisé en hyperfréquences est une simple diode **(10)** : tête TVsat, radar Doppler **(11)**
- aux fréquences plus basses, le mélangeur est construit autour de transistors **(12)**, le montage le plus courant étant la cellule de Gilbert, facilement intégrable **(13)**

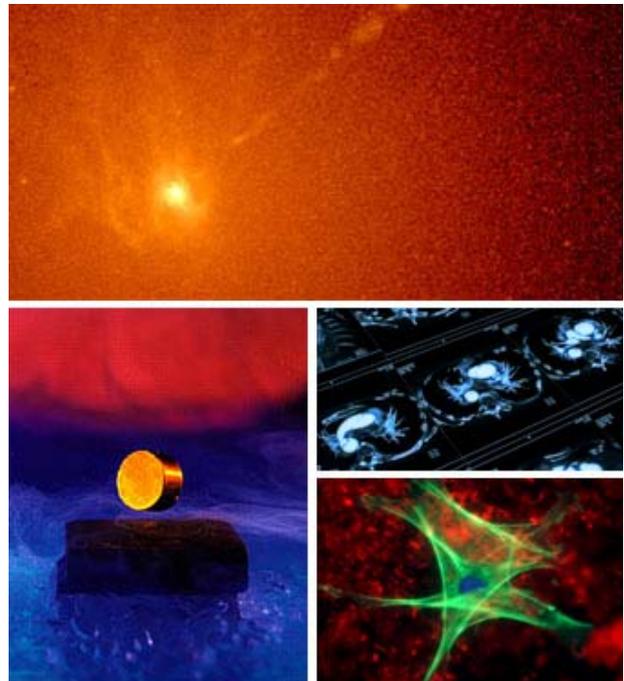
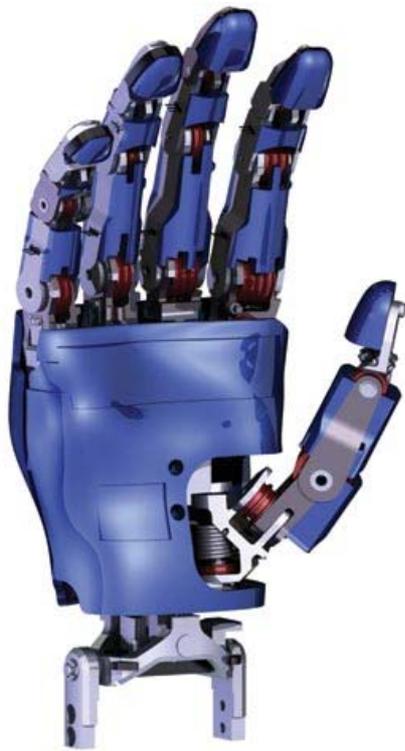
► Exercices :

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1- la fonction : « changement de fréquence » | 8- récepteur TV satellite analogique |
| 2- mélangeurs dans un téléphone GSM | 9- mélange par distorsion quadratique |
| 3- mélange et spectres dans un récepteur | 10- mélangeur à diode |
| 4- récepteur pour la radiodiffusion FM | 11- radar Doppler hyperfréquence |
| 5- récepteur de télécommande | 12- mélangeur à transistor |
| 6- récepteur de télévision analogique | 13- mélangeur à cellule de Gilbert |
| 7- réception des images Meteosat | |

► Questionnaire :

De nombreuses applications simples pour tester vos connaissances dans le domaine.

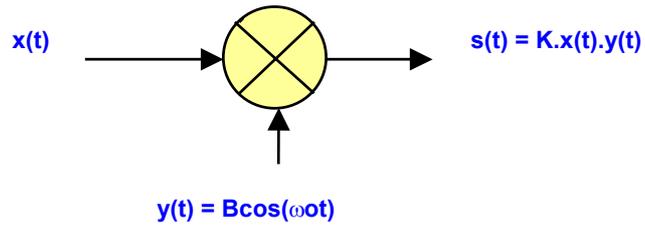
Résumé de cours



jean-philippe muller

1- Mélange de deux signaux sinusoïdaux :

Le mélangeur est un dispositif à deux entrées et une sortie qui multiplie le signal $x(t)$ à traiter par un signal sinusoïdal $y(t)$:

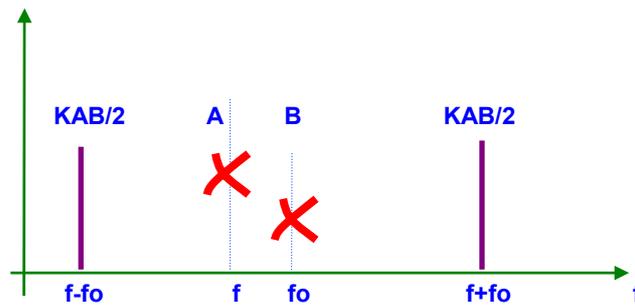


Dans le cas simple où $x(t)$ est sinusoïdal $x(t) = A\cos(\omega t)$ le signal en sortie du mélangeur s'écrit :

$$s(t) = K.x(t).y(t) = K.A\cos(\omega t) . B\cos(\omega_0 t) = \frac{KAB}{2} . \cos(\omega + \omega_0)t + \frac{KAB}{2} . \cos(\omega - \omega_0)t$$

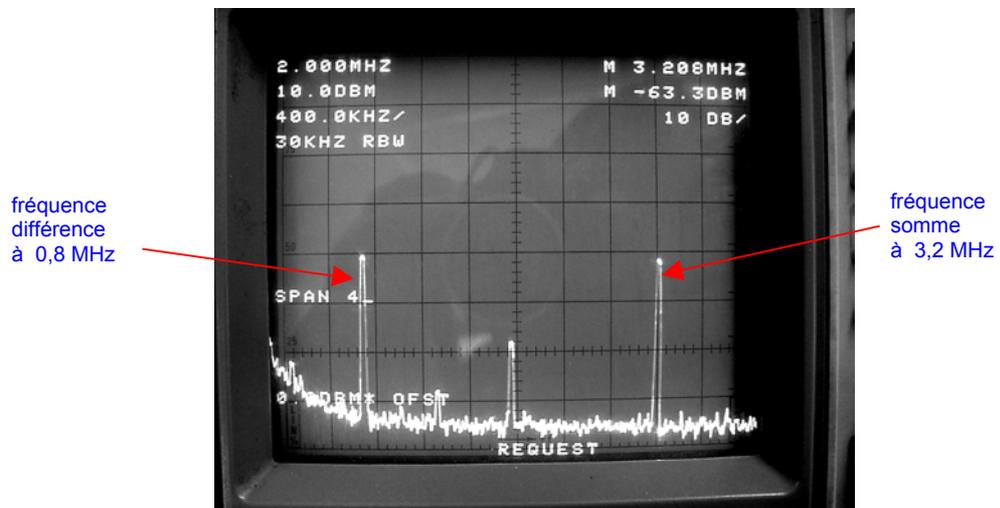
Dans le spectre du signal de sortie $s(t)$, on constate que :

- les fréquences f et f_0 ont disparu
- deux nouvelles fréquences sont apparues : $f+f_0$ et $f-f_0$



On dit qu'en sortie du mélangeur on a les « fréquence somme » et « fréquence différence ».

Exemple : mélange de deux signaux sinusoïdaux à 1,2 MHz et 2 MHz



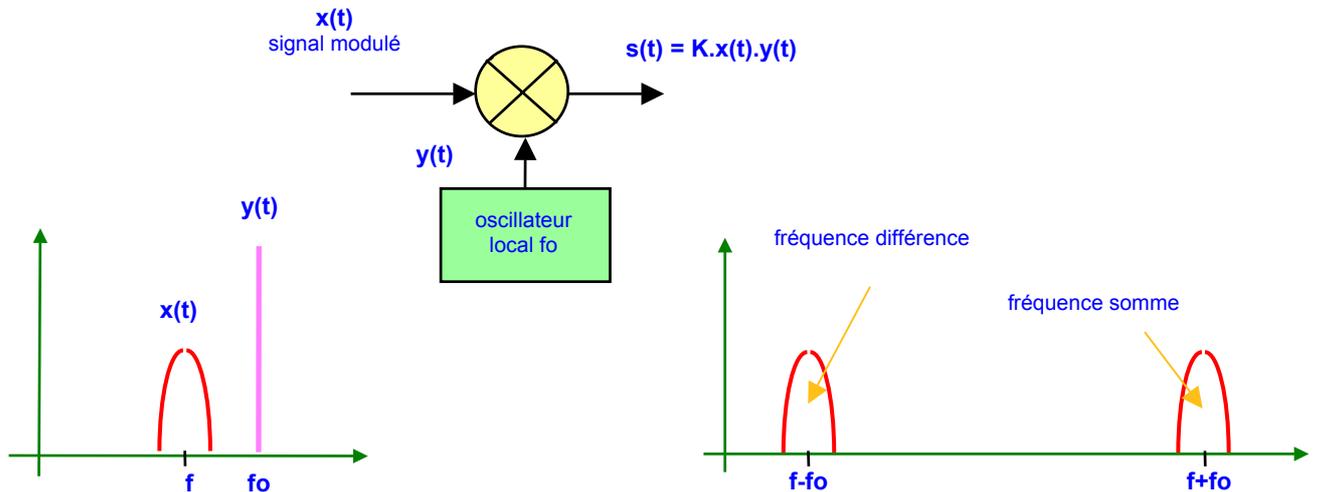
Remarque : il reste dans le spectre de $s(t)$ une petite composante à 2 MHz qui traduit une imperfection du mélangeur.

2- Mélange d'une porteuse modulée avec une sinusoïde :

Dans le cas général, $x(t)$ est une porteuse modulée $x(t) = A \cos(\omega t)$ avec A ou ω variables :

- si A varie avec l'information (parole, musique, informations binaires), il s'agit de AM
- si ω varie avec l'information (parole, musique, informations binaires), il s'agit de FM

Le spectre de $x(t)$ est alors plus large qu'une simple raie, mais en sortie du mélangeur, on retrouve comme précédemment le spectre du signal $x(t)$ centré sur les fréquences $f-f_0$ et $f+f_0$:



Le signal en sortie du mélangeur s'écrit toujours :

$$s(t) = K.x(t).y(t) = K.A \cos(\omega t) . B \cos(\omega_0 t) = \frac{KAB}{2} \cos(\omega + \omega_0)t + \frac{KAB}{2} \cos(\omega - \omega_0)t$$

La modulation du signal $x(t)$ est conservée puisque :

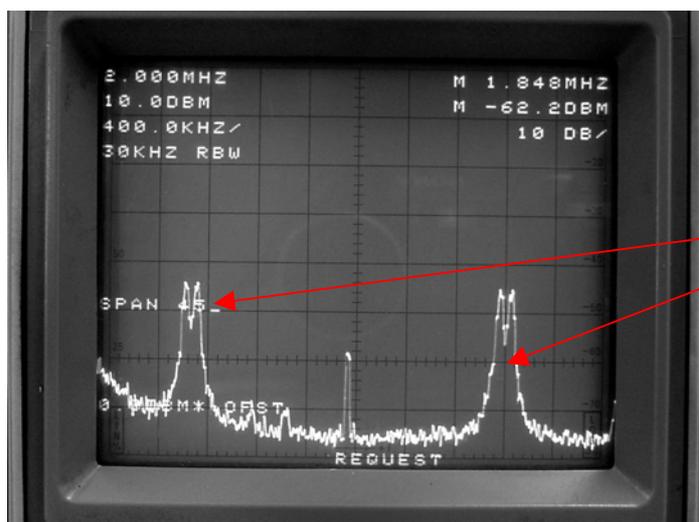
- si $x(t)$ est modulé en AM, l'amplitude variable A se retrouve sur les deux composantes

$$s(t) = K.x(t).y(t) = K.A \cos(\omega t) . B \cos(\omega_0 t) = \frac{KAB}{2} \cos(\omega + \omega_0)t + \frac{KAB}{2} \cos(\omega - \omega_0)t$$

- si $x(t)$ est modulé en FM, la pulsation variable ω se retrouve dans les deux composantes

$$s(t) = K.x(t).y(t) = K.A \cos(\omega t) . B \cos(\omega_0 t) = \frac{KAB}{2} \cos(\omega + \omega_0)t + \frac{KAB}{2} \cos(\omega - \omega_0)t$$

Exemple :

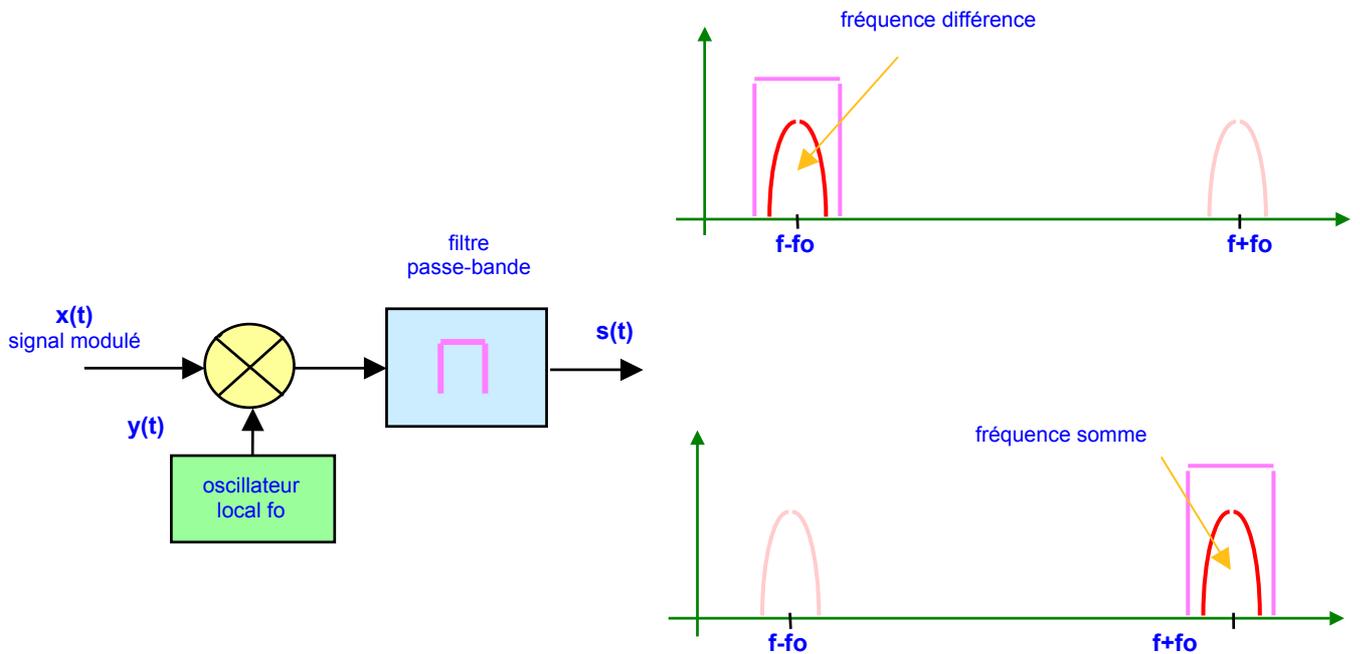


Signaux à la fréquence « somme » et « différence » modulés en FM

3- La fonction « changement de fréquence » :

Si on place un filtre passe-bande en sortie de l'ensemble mélangeur-oscillateur local, on peut :

- conserver la fréquence somme et d'éliminer la fréquence différence
- conserver la fréquence différence et d'éliminer la fréquence somme

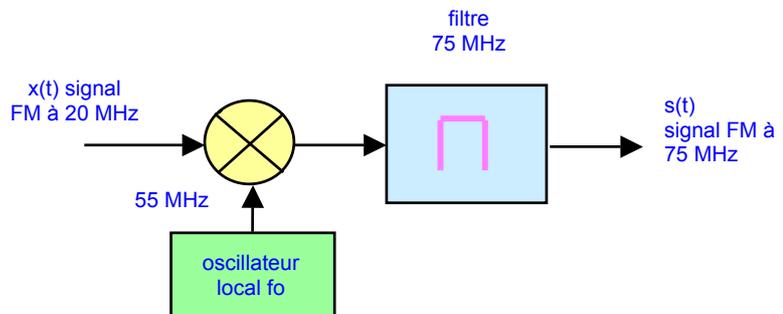


Un ensemble mélangeur+oscillateur local+filtre permet donc de changer la fréquence d'un signal modulé :

- le spectre du signal modulé $x(t)$ est simplement translaté sur l'axe des fréquences
- l'amplitude du déplacement est égale à la valeur de la fréquence de l'oscillateur local f_0

Exemples :

Pour faire passer un signal FM de 20 MHz à 75 MHz, on le multiplie par une sinusoïde à $f = 55$ MHz et on fait suivre le mélangeur par un filtre centré sur 75 MHz.

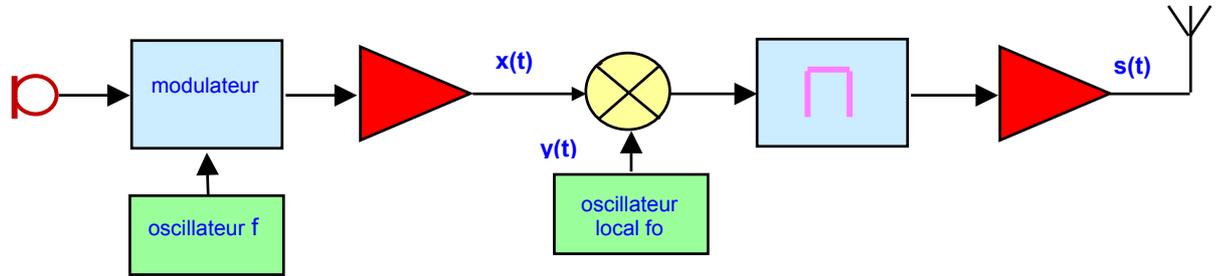


Le filtre est nécessaire pour supprimer la composante à la fréquence différence, soit à 35 MHz.

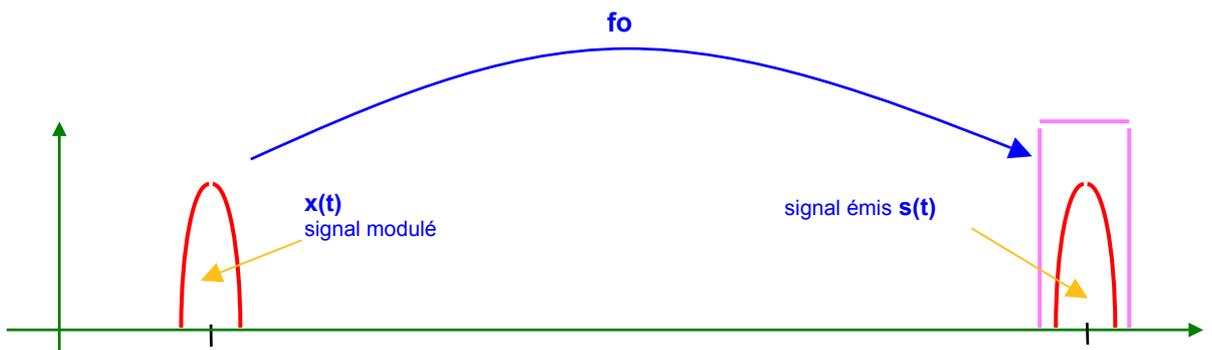
4- Le changement de fréquence dans un émetteur :

Dans un émetteur, le signal $x(t)$ modulé AM ou FM est en général :

- produit à une fréquence assez basse
- transposé à la fréquence d'émission à l'aide d'un changeur de fréquence



La valeur de la fréquence de l'oscillateur local f_0 détermine la fréquence d'émission qui vaut $f + f_0$



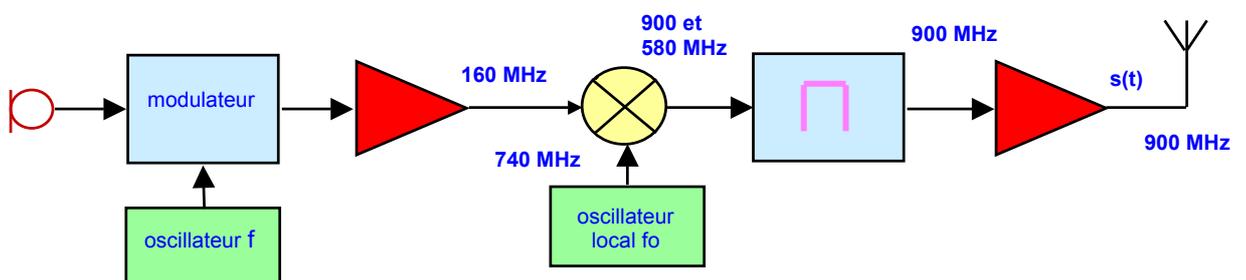
Remarques :

- en utilisant comme oscillateur local un synthétiseur de fréquence, il sera facile de faire varier f_0 et donc de changer de canal.
- cette fonction est appelée « up-converter » par les anglo-saxons

Exemple :

Dans un téléphone GSM, le signal à transmettre vers la station de base est produit à $f = 160$ MHz.

Pour le transposer à la fréquence d'émission de 900 MHz, il va être multiplié par $f_0 = 740$ MHz, puis filtré à 900 MHz pour éliminer la fréquence indésirable de $740 - 160 = 580$ MHz.



5- Le changement de fréquence dans un récepteur :

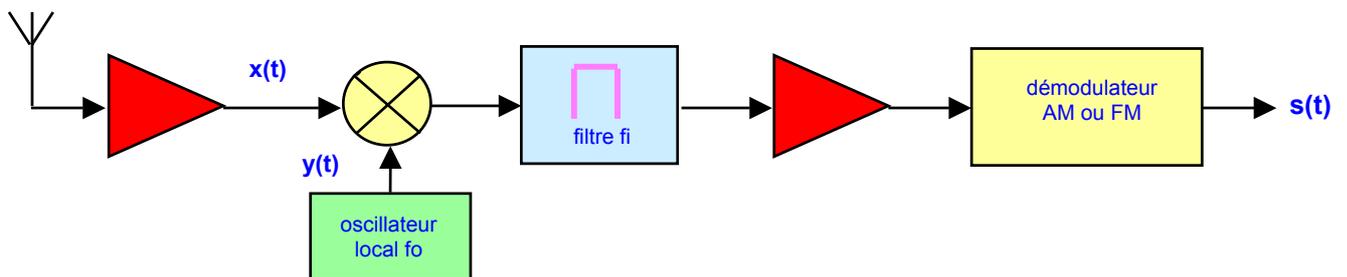
Dans un récepteur, il est souvent difficile de sélectionner l'émetteur qu'on souhaite recevoir par un simple filtre passe-bande.

Ce filtre doit souvent avoir des caractéristiques très difficiles à concilier :

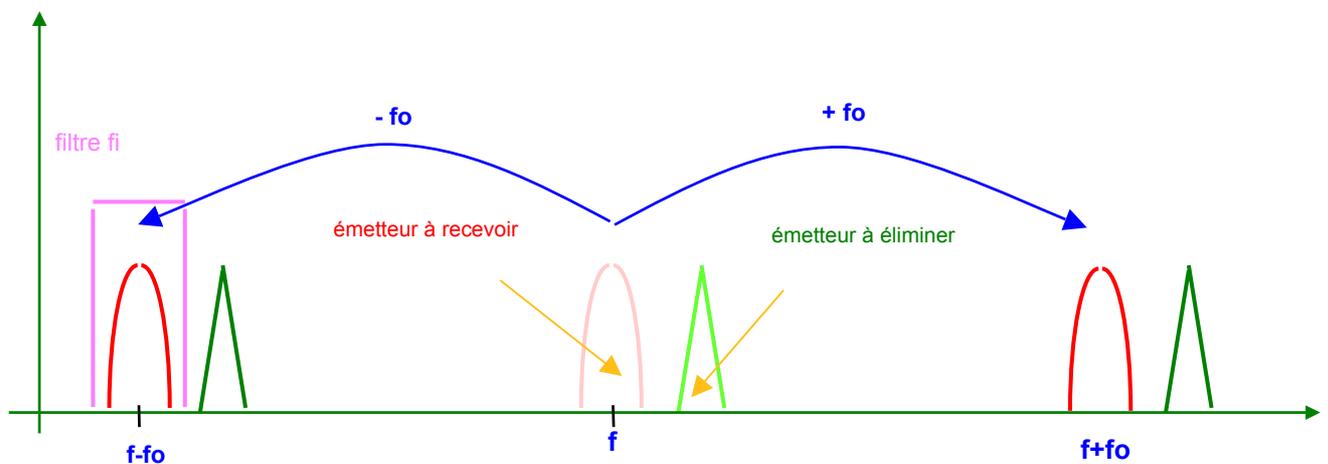
- fréquence centrale variable
- largeur fixe égale à l'encombrement spectral de l'émetteur
- coefficient de qualité impossible à atteindre

Pour contourner cette difficulté, on utilise presque systématiquement le récepteur à changement de fréquence inventé par Edwin H. Armstrong.

Le mélangeur reçoit les signaux provenant de l'antenne et les multiplie tous par un signal sinusoïdal issu de l'oscillateur local f_0 :



Le spectre en sortie du mélangeur est riche, puisque pour chaque émetteur capté à la fréquence f , on a en sortie du mélangeur le même signal, mais aux fréquences $f-f_0$ et $f+f_0$.



Un seul de ces signaux à la fréquence $f-f_0$ tombera dans la bande passante du filtre f_i et sera donc démodulé.

On sélectionne donc l'émetteur désiré en agissant sur f_0 , le filtre de fréquence intermédiaire étant fixe.

Cette technique de sélection d'un émetteur est universelle et utilisée dans la réception radio, TV, téléphone cellulaire etc ...

Exemple :

Pour recevoir ECN-Mulhouse à $f = 98,1$ MHz avec une fréquence intermédiaire $f_i = 10,7$ MHz, il faut transposer ECN à 10,7 MHz.

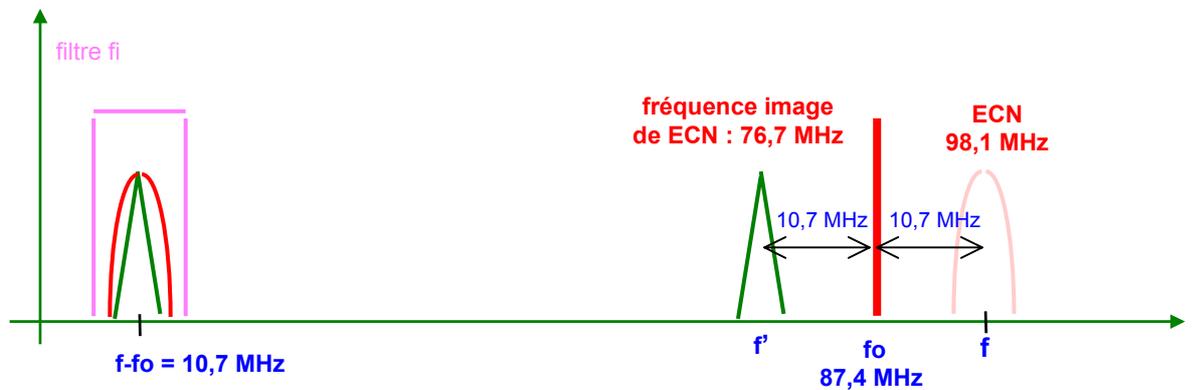
On réglera donc l'oscillateur local à $f_0 = 87,4$ MHz pour que $f-f_0 = 98,1 - 87,4 = 10,7$ MHz.

6- Le problème de la fréquence image :

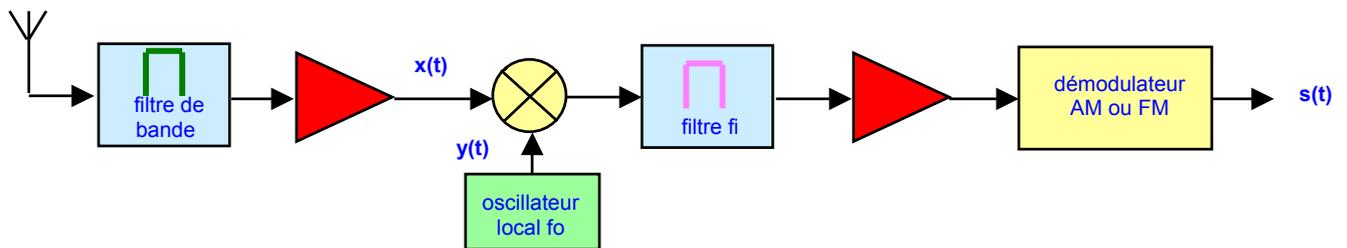
Cette structure presque idéale a un seul défaut :

- pour une valeur donnée de l'oscillateur local f_0 on reçoit en réalité 2 émetteurs f et f'
- la deuxième fréquence f' non désirée est appelée **fréquence image de f**

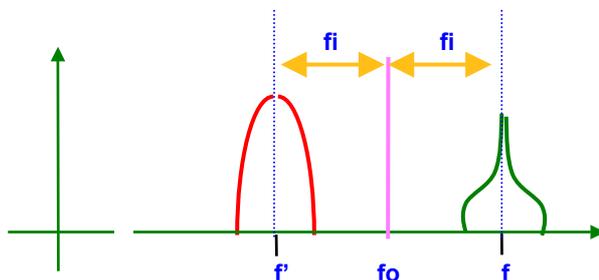
Exemple : pour recevoir ECN, on avait réglé $f_0 = 87,4$ MHz. Mais un signal à $f' = 76,7$ MHz sera aussi transposé à 10,7 MHz par le mélangeur, il sera donc aussi démodulé et entendu si on ne l'élimine pas.



L'émetteur image de ECN n'est pas dans la bande FM, il est donc facile à éliminer avec un filtre de bande (de 88 à 108 MHz) placé à l'entrée du récepteur :



Question : comment trouver la fréquence image f' d'un émetteur f ?



f et f' sont toujours symétriques par rapport à f_0
l'écart entre f_0 et les deux émetteurs est toujours égal à f_i

L'émetteur image doit être filtré dès l'entrée du récepteur, ce qui est plus facile s'il est loin de f . On choisit donc dans la pratique une f_i suffisamment élevée :

- bande FM : $f_i = 10,7$ MHz pour une réception autour de 100 MHz
- bande PO : $f_i = 455$ kHz ----- 1 MHz
- bande TV : $f_i = 38,9$ MHz ----- de 400 à 800 MHz
- bande GSM : $f_i = 70$ à 250 MHz ----- autour de 900 MHz

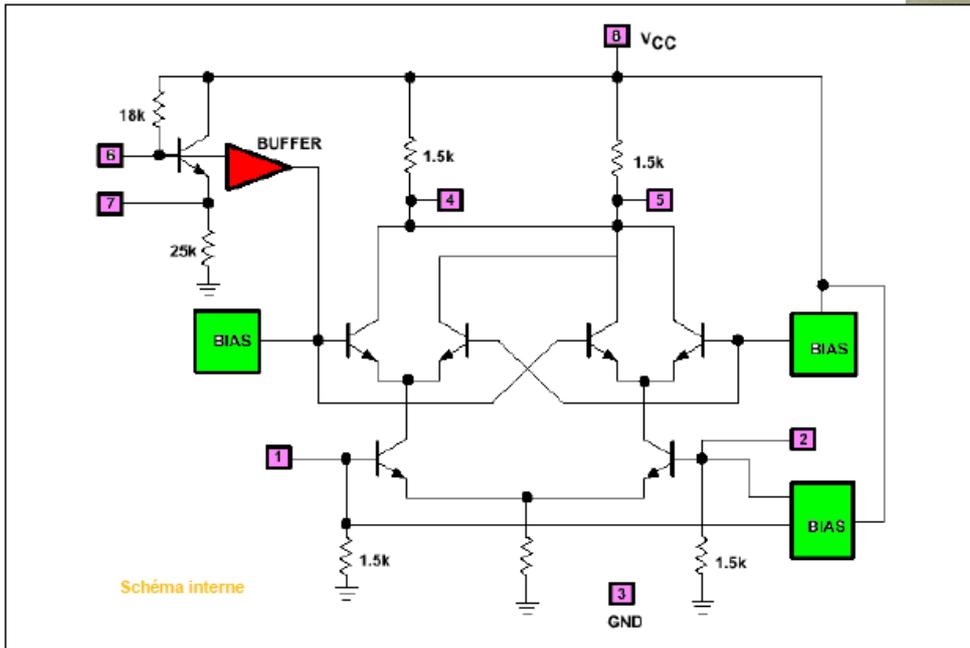
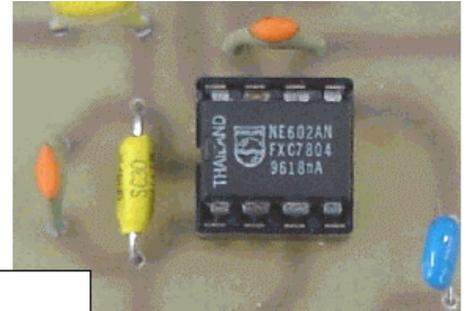
L'amplificateur RF d'entrée sera sélectif et aura pour tâche d'éliminer un éventuel émetteur placé à la fréquence image. Ce filtre d'entrée peut être fixe (filtre de bande en CB, GSM) ou variable et commandé parallèlement avec l'oscillateur local (récepteur FM, TV ...).

7- Les différents types de mélangeurs :

Le mélangeur « universel » est aujourd'hui le mélangeur à transistor ou « cellule de Gilbert » dont il existe de nombreuses réalisations commerciales :

Les caractéristiques de ce circuit sont les suivantes :

- bornes 1 et 2 : entrée RF (gamme 0 à 500 MHz)
- bornes 6 et 7 : entrée oscillateur local
- bornes 4 et 5 : sortie
- borne 8 et 3 : alimentation et masse
- gain de conversion : 14 dB
- facteur de bruit : $N=5\text{dB}$
- niveau d'oscillateur local : entre 200 et 300 mV crête-crête



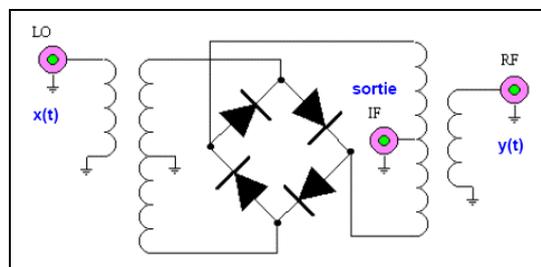
De nombreuses versions de ce circuit ont été commercialisées par différents constructeurs :

- NE602 – NE612
- SA602 – SA612
- SO42P (structure voisine)

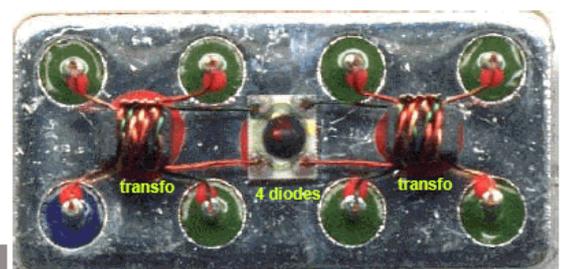
Ce type de mélangeur couvre les besoins du changement de fréquence jusqu'à quelques GHz.

Aux fréquences supérieures, on utilise la non-linéarité de 1,2 ou 4 diodes pour faire du mélange :

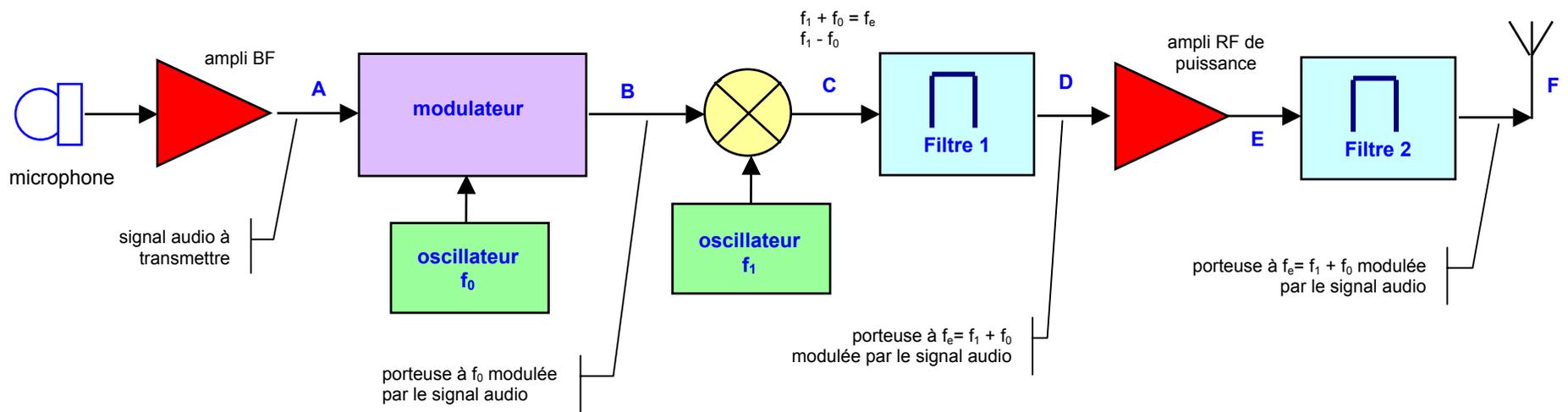
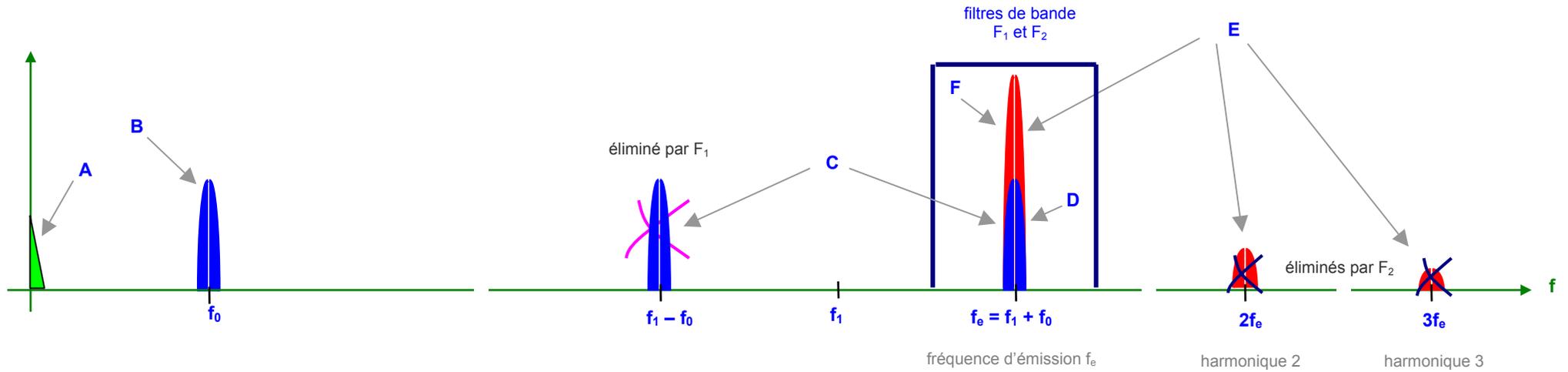
- mélange à une diode dans les radars Doppler
- mélange à 2 diodes dans les têtes de TV satellite
- mélange à 4 diodes dans les mélangeurs Schottky



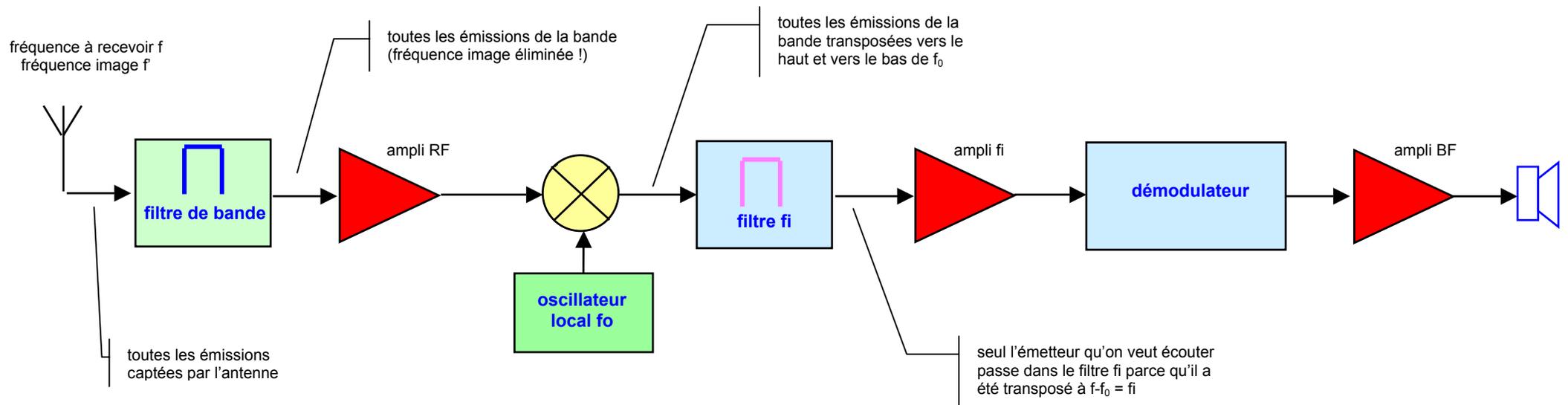
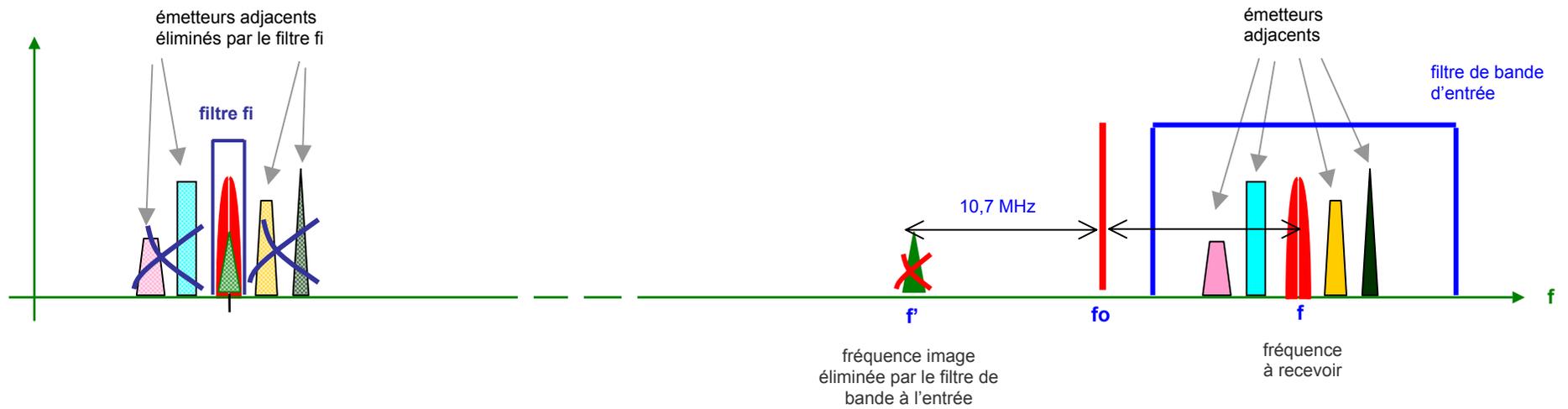
Vue interne



Annexe 1 : vue d'ensemble d'un émetteur



Annexe 2 : vue d'ensemble du récepteur à changement de fréquence



Exercices d'application



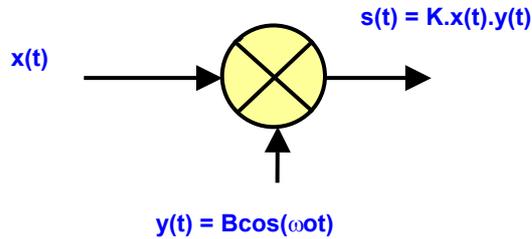
jean-philippe muller

La fonction : « changement de fréquence »



comprendre en quoi consiste le mélange, fonction de base des télécommunications

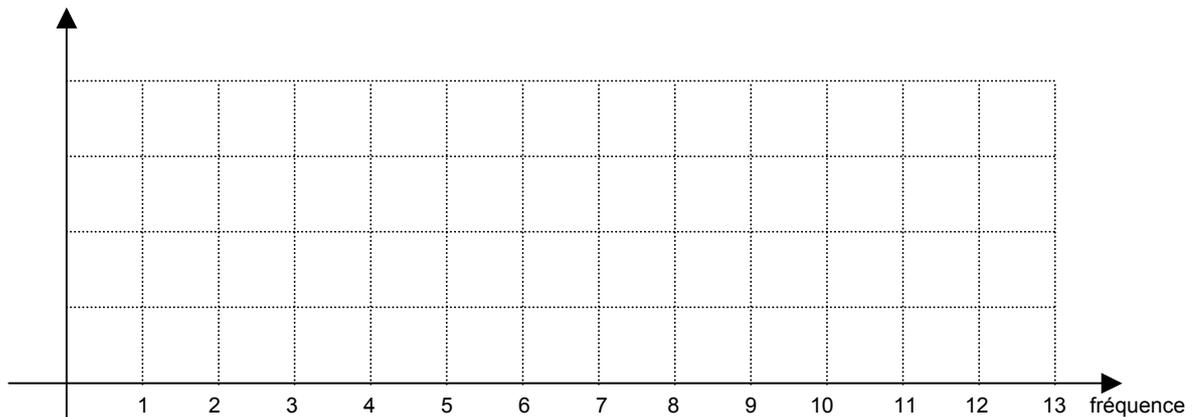
Pour mélanger deux signaux $x(t)$ et $y(t)$, on utilise un multiplieur selon le montage suivant :



Le multiplieur est caractérisé par une constante $K = 4$ et le signal $y(t)$ est un signal sinusoïdal d'amplitude 2V et de fréquence 4 MHz.

1) Le signal $x(t)$ est sinusoïdal : $x(t) = A\cos(\omega t)$ avec $A = 0,2V$ et $f = 5$ MHz. Etablir l'expression mathématique de la tension de sortie $s(t)$.

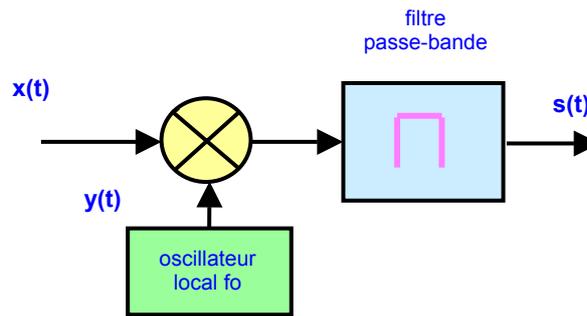
2) Tracer le spectre du signal de sortie $s(t)$.



3) On ne conserve que la raie de fréquence élevée. Quel étage faut-il ajouter au montage ?

Compléter le schéma ci-dessus pour obtenir ce résultat. On dit alors qu'on a changé la fréquence du signal $x(t)$ qui est passée de 5 MHz à MHz.

4) Le signal $y(t)$ provient en général d'un oscillateur sinusoïdal appelé « oscillateur local ». Le mélangeur est utilisé pour **élever la fréquence** du signal $x(t)$:

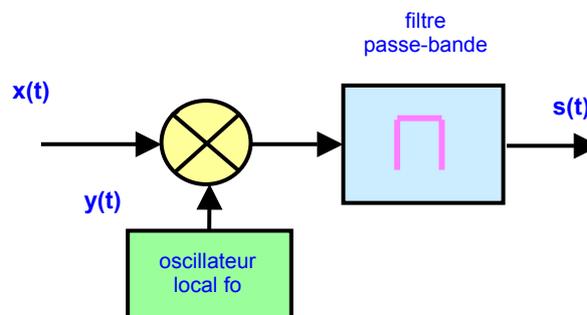


On désire faire passer le signal $x(t)$ d'une fréquence de 5 MHz à une fréquence de 100 MHz. Montrer qu'il y a deux solutions possibles :

- Solution 1 : $f_0 = \dots\dots\dots$ MHz filtre passe-bande centré sur $\dots\dots\dots$ MHz
Le filtre doit éliminer le signal à la fréquence $\dots\dots\dots$ MHz

- Solution 2 : $f_0 = \dots\dots\dots$ MHz filtre passe-bande centré sur $\dots\dots\dots$ MHz
Le filtre doit éliminer le signal à la fréquence $\dots\dots\dots$ MHz

5) Le mélangeur est maintenant utilisé pour **abaisser la fréquence** du signal $x(t)$ de 920 MHz à 160 MHz :



Montrer qu'il y a de nouveau deux solutions possibles :

- Solution 1 : $f_0 = \dots\dots\dots$ MHz filtre passe-bande centré sur $\dots\dots\dots$ MHz
Le filtre doit éliminer le signal à la fréquence $\dots\dots\dots$ MHz

- Solution 2 : $f_0 = \dots\dots\dots$ MHz filtre passe-bande centré sur $\dots\dots\dots$ MHz
Le filtre doit éliminer le signal à la fréquence $\dots\dots\dots$ MHz

Remarque : ce problème a **toujours** deux solutions possibles. Le choix de l'une des solutions se fait par le concepteur du produit (émetteur, récepteur) en fonction de diverses contraintes technologiques.

Les mélangeurs dans un téléphone GSM

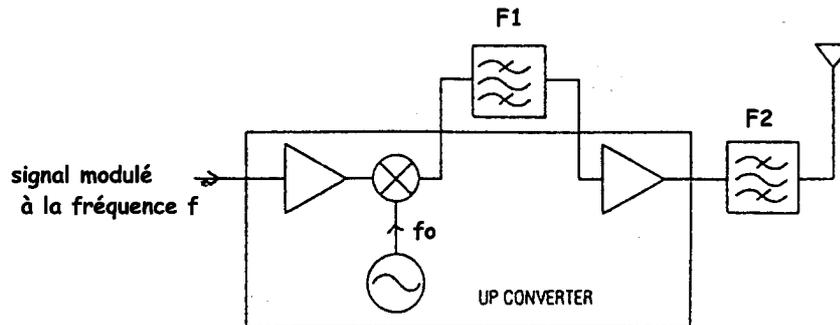


apprendre à définir la structure d'un dispositif de télécommunication

1) Dans un téléphone GSM, l'émission vers la station de base (bande montante) se fait sur l'un des 125 canaux suivants :

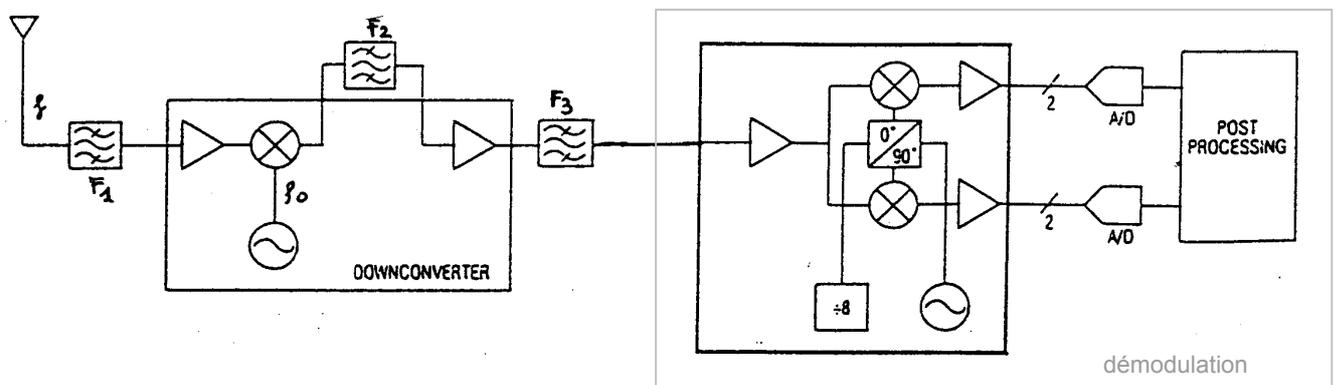
- canal 0 : 890 MHz
- canal 1 : 890,2 MHz ...
- canal 124 : 914,8 MHz
- pas entre deux canaux : 200 kHz

Un signal sinusoïdal à $f = 120$ MHz est modulé par l'information à transmettre. Puis cette porteuse modulée est déplacée dans le canal d'émission alloué par la station de base par le circuit ci-dessous :



Caractériser l'oscillateur local (on choisira la valeur la plus basse possible) et les deux filtres F1 et F2.

2) L'étage de réception d'un téléphone GSM a la structure suivante :



La gamme des fréquences à recevoir (bande descendante) va de 935 MHz à 960 MHz :

- canal 0 : 935 MHz
- canal 1 : 935,2 MHz ...
- canal 124 : 959,8 MHz
- pas entre deux canaux : 200 kHz

La fréquence intermédiaire est à $f_i = F_2 = F_3 = 70$ MHz et l'oscillateur local est placé en-dessous de la fréquence à recevoir.

Caractériser l'oscillateur local et les filtres F1, F2 et F3.

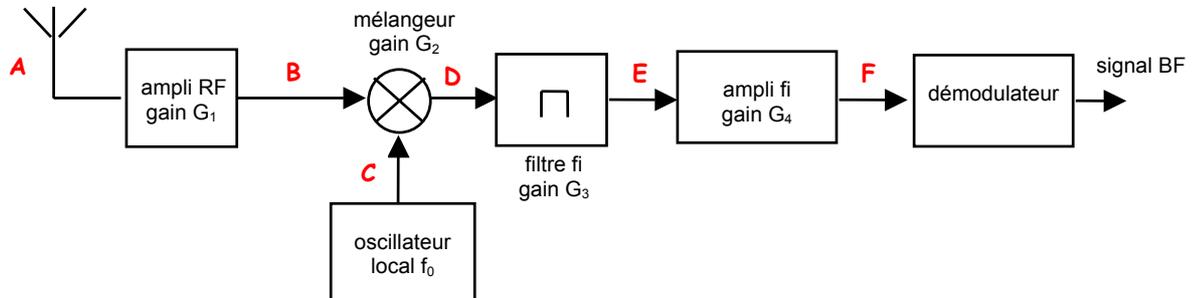
Mélange et spectres dans un récepteur



Comprendre ce qui se passe dans un récepteur à changement de fréquence

On s'intéresse à ce qui se passe dans un récepteur à changement de fréquence destiné à recevoir la bande FM qui s'étend de 88 MHz à 108 MHz.

La structure du récepteur est la suivante :

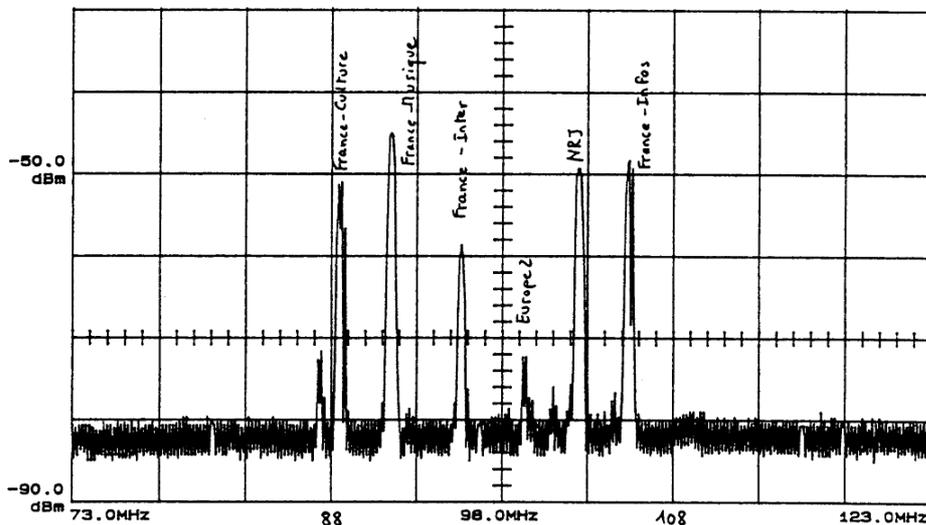


C'est un récepteur à changement de fréquence, avec un oscillateur local à la fréquence f_0 placé en-dessous de la fréquence à recevoir.

Le fonctionnement du récepteur est le suivant :

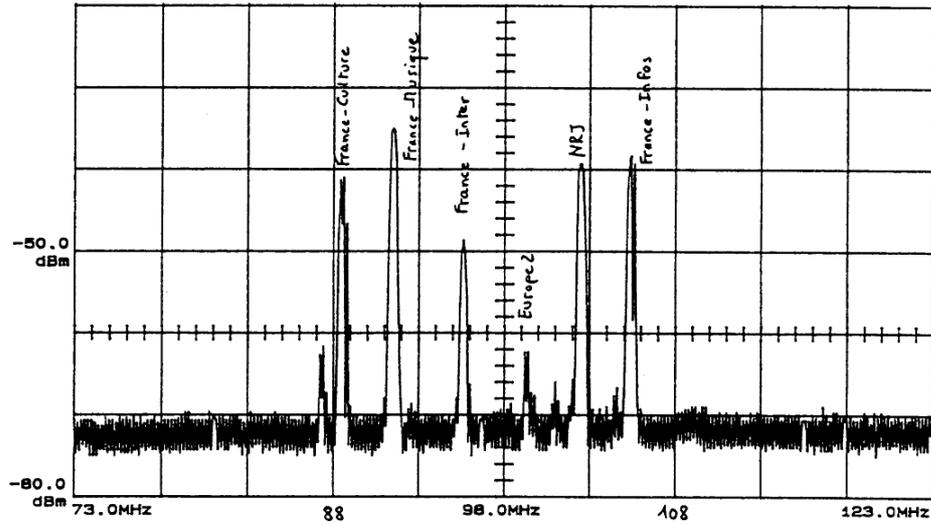
- tous les signaux captés par l'antenne sont amplifiés par l'ampli RF
- puis multipliés par un signal sinusoïdal de fréquence f_0 dans le mélangeur
- le résultat de la multiplication est filtré par le filtre passe-bande de fréquence intermédiaire centré sur $f_i = 10,7$ MHz
- le signal filtré est amplifié, puis démodulé

1) Le spectre relevé en A met en évidence les émetteurs les plus puissants de la bande FM :



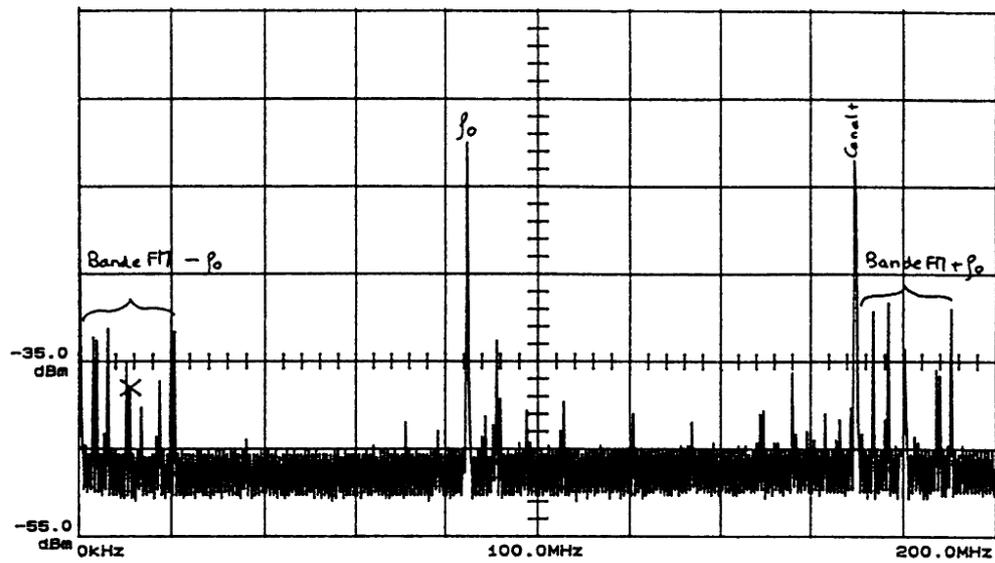
Quel est, en dBm puis en volts, le niveau reçu à l'antenne pour la station France-Inter ?

2) Le spectre relevé après l'amplificateur RF (point B) a l'allure suivante :



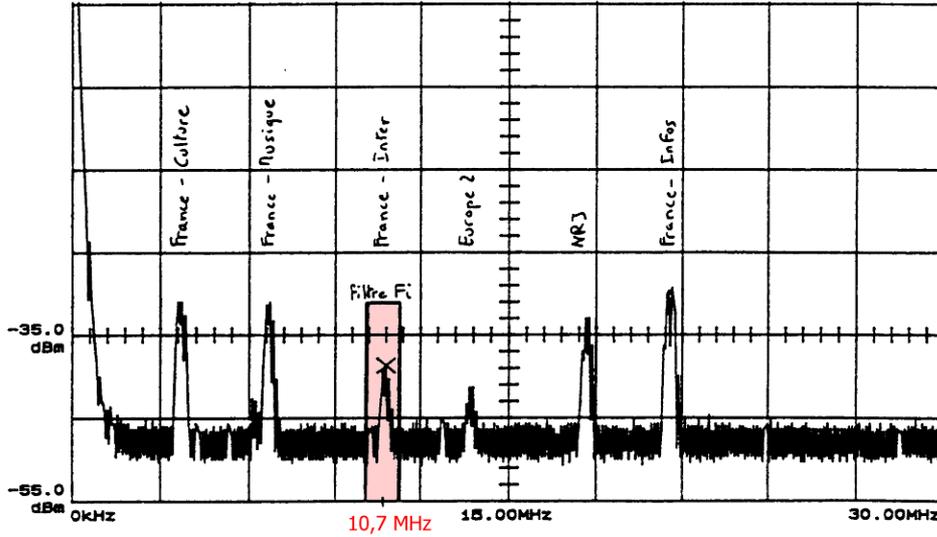
Quel est le gain G_1 de l'amplificateur RF ?

3) Le spectre relevé après le mélangeur (point E) a l'allure suivante :



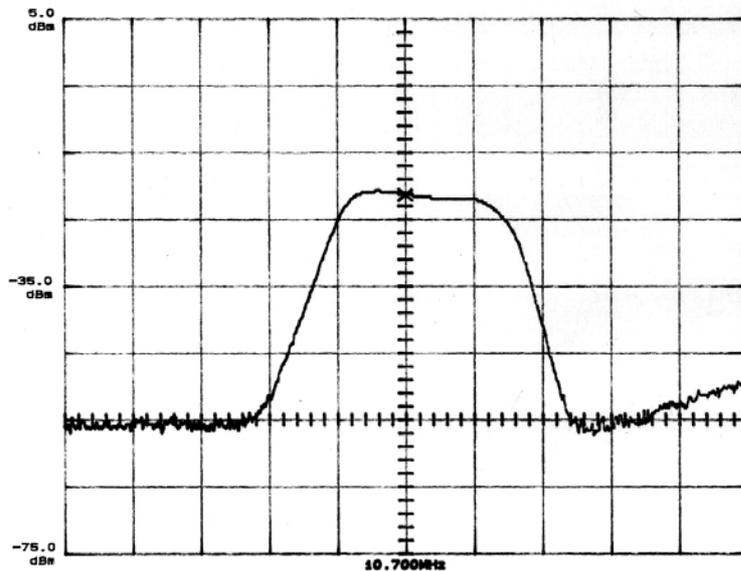
Expliquer la structure du spectre obtenu. Comment évolue ce spectre si on modifie la fréquence de l'oscillateur local ?

4) Le spectre suivant est un zoom sur la partie basse du spectre en E :



En déduire la valeur du gain de conversion G_2 du mélangeur et la fréquence de l'oscillateur local f_0 . Quel serait l'allure du spectre à la sortie du filtre f_i ?

5) On a relevé la tension de sortie du filtre f_i en fonction de la fréquence pour un niveau d'entrée de -15 dBm avec une échelle de 100 kHz/carreau.



En déduire les bandes passantes B_{3dB} et B_{20dB} du filtre et son gain G_3 dans la bande passante. Quel est son coefficient de qualité Q ? Sa largeur est-elle compatible avec l'encombrement spectral d'un émetteur ?

6) Si on veut avoir un niveau de signal de 0 dBm à l'entrée du démodulateur (point F), quel devra être le gain G_4 de l'amplificateur de fréquence intermédiaire ?

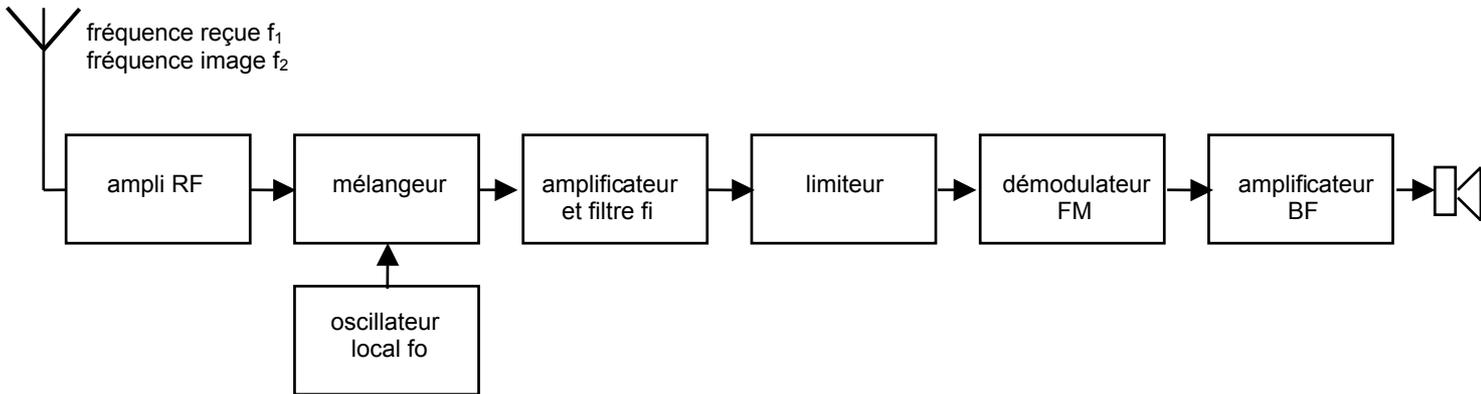
Récepteur pour la radiodiffusion FM



apprendre à définir la structure d'un récepteur

Un récepteur FM est destiné à recevoir les émissions de la bande FM ayant les caractéristiques suivantes :

- fréquence f_1 de la porteuse comprise entre 88 et 108 MHz
- signal BF limité à $F_{\max} = 15$ kHz
- largeur de bande maximale occupée par le spectre du signal modulé $B_0 = 300$ kHz



On décide de placer l'oscillateur local en-dessous de la fréquence à recevoir et le filtre f_i est un filtre céramique standard centré sur $f_i = 10,7$ MHz.

1) On souhaite recevoir France-Inter émettant sur Mulhouse à $f_1 = 95,7$ MHz. Calculer la valeur de l'oscillateur local f_0 et la fréquence image de France-Inter f_2 .

2) Que faut-il prévoir pour éviter la réception d'une éventuelle émission à la fréquence image ? Quelles doivent être les caractéristiques du filtre d'entrée ? du filtre de fréquence intermédiaire ?

3) Pour recevoir la totalité de la bande FM, quelle doit être la plage de fréquences couverte par l'oscillateur local ?

4) Quelle est la bande image de la bande FM ?

5) Quel est le rôle du limiteur ? A quelle fréquence travaille le démodulateur si on reçoit France-inter ? et si on reçoit France-Musique à 91,6 MHz ? Quelle doit être la bande passante de l'amplificateur basse-fréquence ?

Récepteur de télécommande

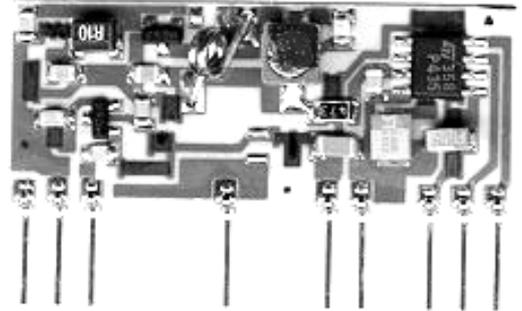


apprendre à définir la structure d'un récepteur

Un récepteur de type « module Aurel » est construit pour recevoir des signaux de télécommande émis sur la fréquence standard de $f = 433,92$ MHz. Le signal à recevoir occupe une bande de $B = 10$ kHz.

Le récepteur à changement de fréquence est constitué des éléments suivants :

- un filtre d'entrée fixe
- un mélangeur de gain de conversion 8 dB
- un oscillateur local f_0 placé sous la fréquence à recevoir
- un filtre de fréquence intermédiaire à $f_i = 455$ kHz
- un démodulateur AM
- un ampli radiofréquence (gain 20 dB) et un ampli f_i



1) Dessiner le schéma fonctionnel du récepteur de l'antenne à la sortie du démodulateur.

2) Définir les caractéristiques des deux filtres (fréquence centrale, largeur), de l'oscillateur local, et calculer la valeur de la fréquence image.

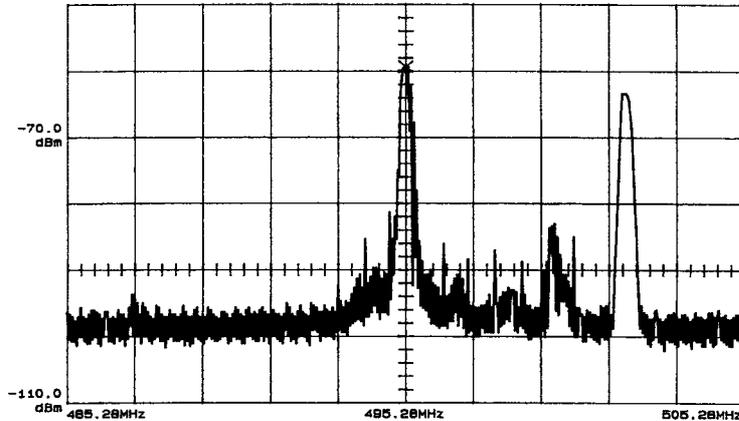
3) Le niveau du signal à l'antenne peut varier entre -30 et -80 dBm et les 2 filtres introduisent une atténuation de 3 dB chacun. Sachant que le démodulateur nécessite un niveau de 10 dBm pour fonctionner correctement, calculer les gains mini et maxi de l'amplificateur f_i .

Récepteur de télévision analogique



apprendre à définir la structure d'un récepteur TV analogique

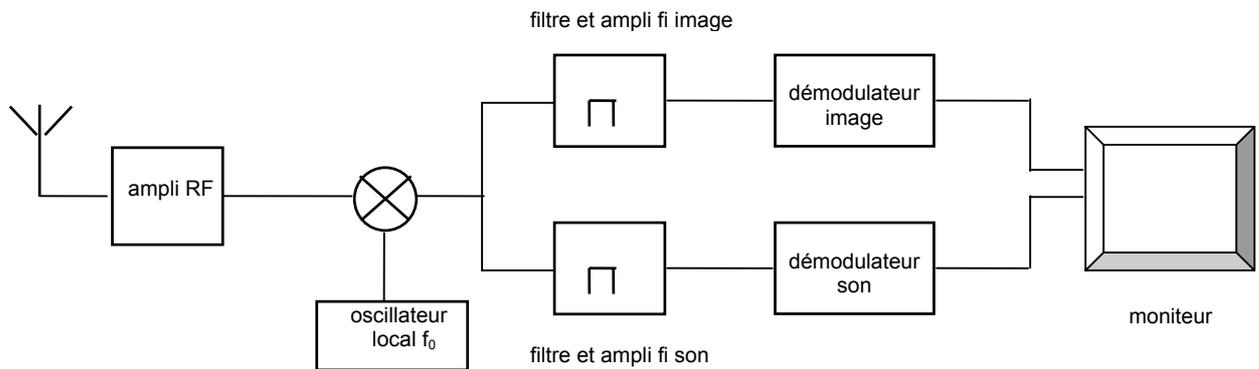
On étudie la structure d'un récepteur de télévision analogique accordé sur l'émetteur **France 3** Mulhouse émettant à la fréquence $f_1 = 495,25$ MHz. Le spectre du signal TV capté par l'antenne a dans ce cas l'allure suivante :



- porteuse image : $f_1 = 495,25$ MHz
- sous-porteuse couleur : $f_1 + 4,3$ MHz
- sous-porteuse son : $f_1 + 6,5$ MHz
- bande image : de $f_1 - 1,25$ à $f_1 + 6$ MHz
- bande son : largeur 40 kHz

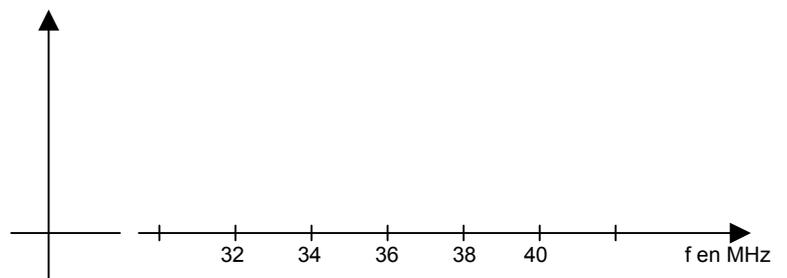
1) Identifier les différentes composantes du spectre du signal arrivant sur l'antenne.

2) Le récepteur TV doit sélectionner l'émission, séparer les informations concernant l'image de celles concernant le son, démoduler ces deux signaux et envoyer les informations obtenues sur les entrées « vidéo » et « son » du moniteur :



L'oscillateur local est réglé à la valeur $f_0 = 534,15$ MHz et les filtres f_i récupèrent la partie basse du mélange. A quelle fréquence se retrouve la porteuse image après mélange ?

3) Définir la position des 3 porteuses (image, couleur, son) en sortie du mélangeur.



4) Caractériser les filtres de fréquence intermédiaire « image » et « son ».

Réception des images Meteosat



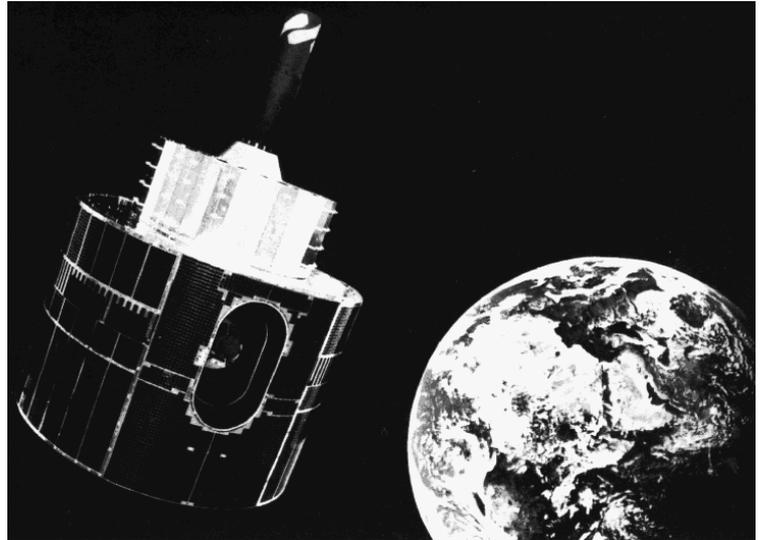
apprendre à définir la structure d'un récepteur

Le satellite Météosat qui nous envoie des images de la Terre avec sa couverture nuageuse est placé sur une orbite géostationnaire à une altitude $d=36000\text{km}$.

Il émet en modulation de fréquence sur une porteuse à $f_1 = 1691\text{ MHz}$ avec une puissance de $P_o=63\text{W}$.

La réception du signal se fait à l'aide d'une antenne parabolique suivi d'un récepteur à triple changement de fréquence.

Les 3 valeurs de fréquences intermédiaires dans ce type de récepteur sont : $f_{i1} = 137\text{ MHz}$, $f_{i2} = 10,7\text{ MHz}$ et $f_{i3} = 455\text{ kHz}$.



1) Le récepteur est équipé d'une parabole de diamètre $D=1,2\text{m}$ et la puissance P_r reçue s'écrit :

$$P_r = \frac{3P_o D^2}{8\pi^2 d^2}$$

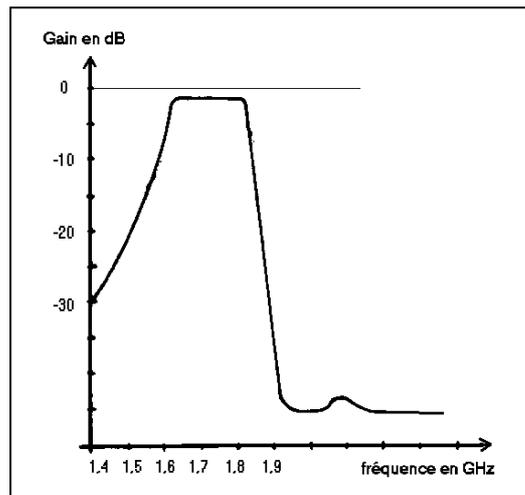
Calculer la valeur numérique de la puissance P_r reçue par cette antenne parabolique.

2) Sachant que la résistance d'entrée du préamplificateur RF est de 50Ω , en déduire le niveau V_e en dBm du signal radiofréquence à l'entrée du récepteur et la valeur en μV de ce signal.

3) Dessiner le schéma fonctionnel du récepteur de l'antenne jusqu'au démodulateur de fréquence, en précisant les fréquences centrales des différents filtres et les fréquences des 3 oscillateurs locaux (on choisira chaque fois la plus faible des 2 valeurs possibles).

4) Le filtre d'entrée du récepteur a le gabarit représenté ci-dessous. Quel est le rôle de ce filtre ? En vous aidant de la courbe de gain du filtre d'entrée ci-dessous, donner une estimation de l'atténuation de la fréquence image de Météosat.

Courbe de gain du filtre d'entrée du récepteur Météosat



5) Calculer le gain total G_i que doit avoir le récepteur pour que le niveau à l'entrée du démodulateur soit de 10 dBm.

6) Le premier mélangeur est un mélangeur Schottky présentant des pertes de conversion de 8dB, les mélangeurs 2 et 3 sont deux mélangeurs à transistors apportant chacun un gain de 14 dB. Les 3 filtres de fréquence intermédiaire introduisent chacun une atténuation de 5dB. L'amplificateur d'entrée RF a un gain de 15dB.

En déduire le gain que doit apporter chacun des amplificateurs de fréquence intermédiaire (on supposera que ces 3 amplificateurs ont un gain identique).

Récepteur de télévision satellite analogique



apprendre à définir la structure d'un récepteur

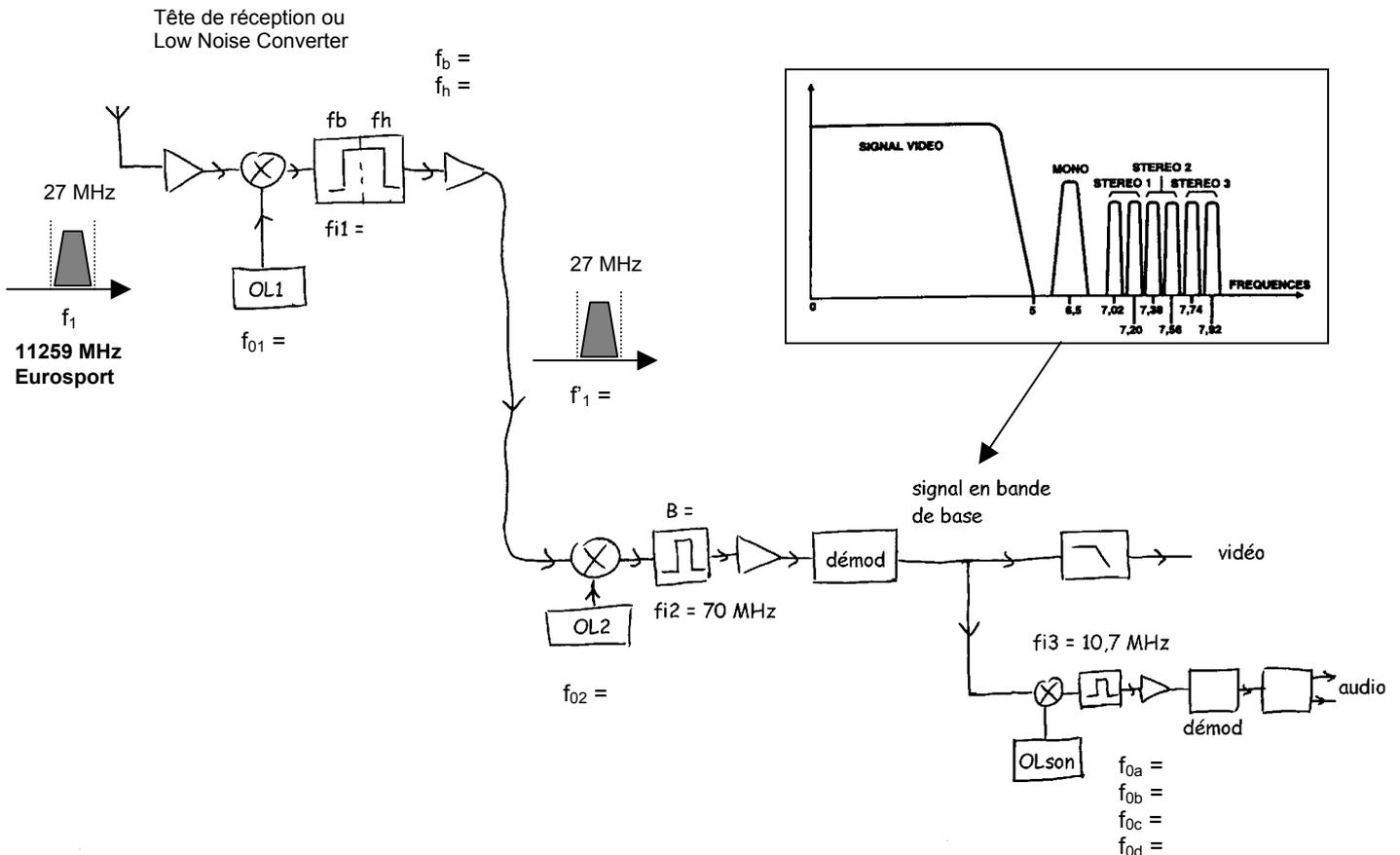
Les émissions TV analogiques par satellite se font autour des 11 GHz, dans une bande divisée en 3 sous-gammes :

- la bande I ou bande FFS, qui va de 10,95 GHz à 11,70 GHz, avec un oscillateur local OL1 à 10 GHz
- la bande II ou bande DBS, qui va de 11,70 GHz à 12,5 GHz, avec OL1 à 10,75 GHz
- la bande III ou bande Télécom, qui va de 12,5 GHz à 12,75 GHz, avec OL1 à 11,475 GHz

Une porteuse émise par un satellite est modulée en FM par la vidéo composite et occupe une largeur de $B = 27$ MHz.

La vidéo composite (ou signal en bande de base) contient le signal d'image, et plusieurs sous-porteuses « son ».

On désire recevoir la chaîne **Eurosport** ($f_1 = 11259$ MHz, satellite Astra) avec un récepteur dont la structure est la suivante :



Le signal composite d'Eurosport contient 4 canaux audio monophoniques utilisés pour des commentaires en 4 langues à 7,02 – 7,20 – 7,38 – 7,56 MHz.

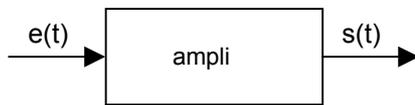
- 1) Pour le LNC, préciser les fréquences de l'oscillateur local f_{01} et du signal transitant sur le câble de descente f'_1 .
- 2) Quelles doivent être les fréquences de coupure basse f_b et haute f_h du filtre en sortie du mélangeur pour ce LNC ?
- 3) Sachant que la valeur de la fréquence intermédiaire du récepteur est $f_{i2} = 70$ MHz, préciser la fréquence f_{02} de l'oscillateur local (on choisira la plus basse des deux fréquences possibles) et la largeur B du filtre f_{i2} .
- 4) La fréquence intermédiaire f_{i3} pour l'audio étant de 10,7 MHz, préciser les 4 valeurs f_{0a} , f_{0b} , f_{0c} et f_{0d} d'oscillateur local « son » permettant de recevoir les 4 langues (oscillateur local placé **au-dessus** de la fréquence à recevoir).

Mélange par distorsion quadratique

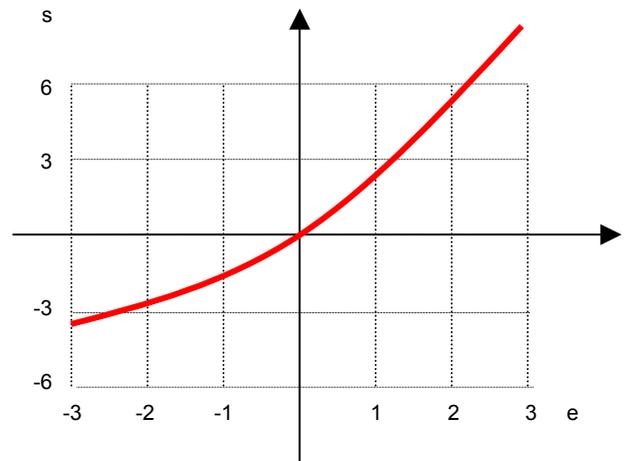


comprendre comment on peut faire de la multiplication avec un dispositif non-linéaire (diode, transistor, ampli...)

Un dispositif non-linéaire présente un défaut appelé « distorsion quadratique » qui se traduit par la relation entrée-sortie et la caractéristique suivante :

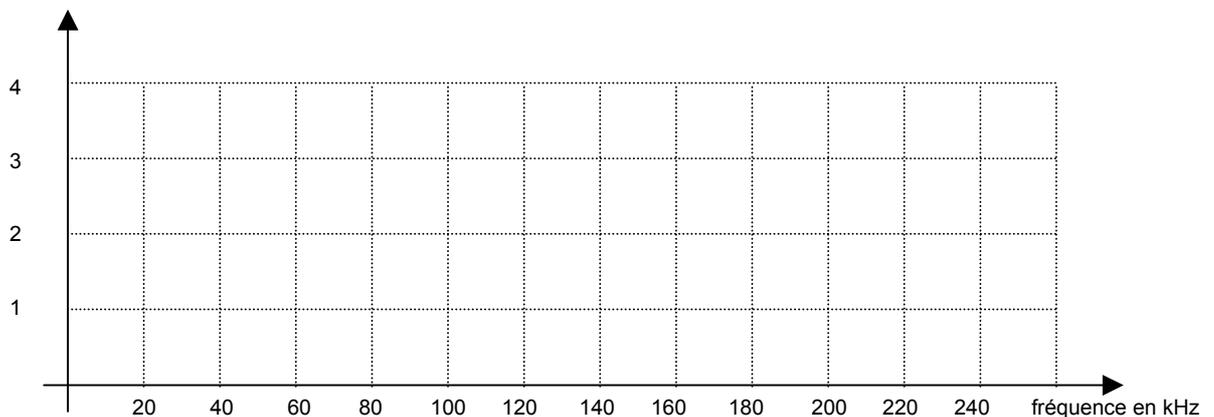


$$s(t) = 2.e(t) + 0,3.e^2(t)$$



1) On applique à l'entrée de cet ampli une somme de 2 signaux : $e(t) = e_1(t) + e_2(t)$. Etablir l'expression de $s(t)$ en fonction de $e_1(t)$ et $e_2(t)$ et mettre en évidence l'apparition d'un terme de multiplication aussi appelée mélange.

2) Les deux signaux injectés sont : $e_1(t) = 2\cos(\omega_1 t)$ et $e_2(t) = 2\cos(\omega_2 t)$ avec $f_1 = 100$ kHz et $f_2 = 110$ kHz. Etablir l'expression de $s(t)$ et tracer son spectre.

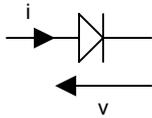


Mélangeur à diode



comprendre comment on peut multiplier deux signaux avec une diode

Pour mélanger deux signaux, on utilise une diode au germanium dont le fonctionnement est régi par l'équation $i=f(v)$ suivante :



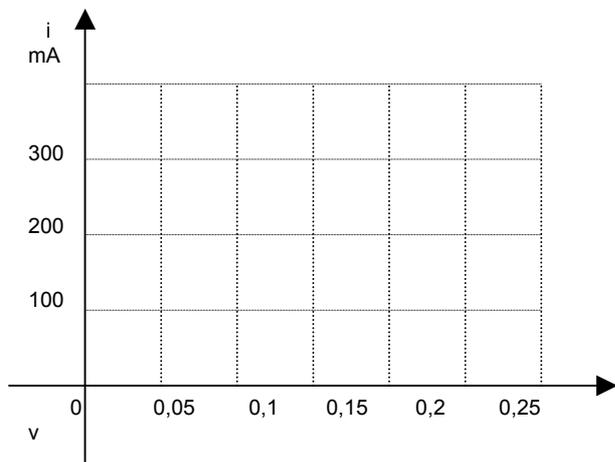
$$i = I_s(e^{\lambda v} - 1)$$

avec $\lambda = q/kT=40$ à température ambiante

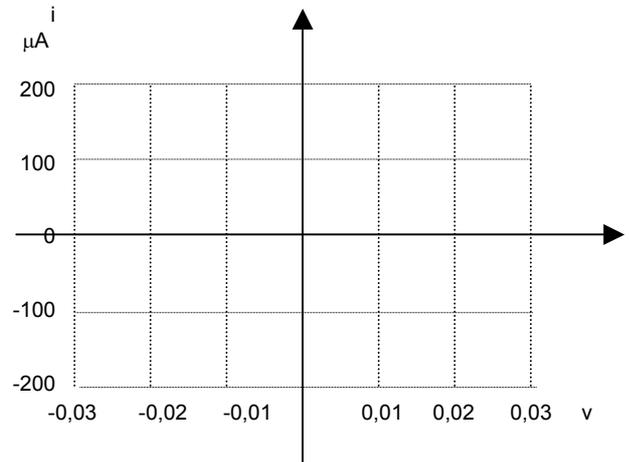
et $I_s = 10^{-4}$ A

1) Avec les valeurs calculées figurant dans le tableau, tracer l'allure générale de la caractéristique de cette diode au germanium. Tracer ensuite l'allure de la caractéristique au voisinage de l'origine.

v (V)	0	0,1	0,15	0,18	0,2	v (V)	-0,03	-0,02	-0,01	0	0,01	0,02	0,03
i (mA)	0	5,3	40	134	300	i (μA)	-70	-55	-33	0	49	122	232



Allure générale de la caractéristique



Allure de la caractéristique pour les faibles valeurs de la tension de polarisation

2) On démontre en mathématiques que si la variable x est petite devant 1, la fonction exponentielle peut s'écrire de façon approchée sous la forme d'un polynôme :

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3!} + \dots \approx 1 + x + \frac{x^2}{2}$$

En utilisant cette approximation, établir l'expression mathématique approchée de la caractéristique $i=g(v)$ de la diode pour des tensions de polarisation faibles et montrer qu'elle s'écrit : $i \approx 0,004.v + 0,08.v^2$

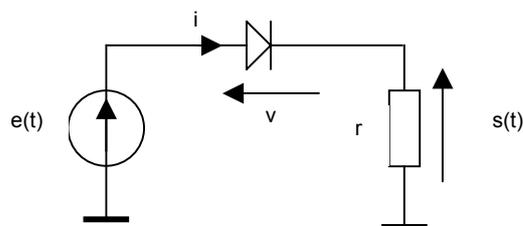
Vérifier cette formule pour $v = 0,01$ V.

3) On place cette diode dans le montage ci-contre :

La tension $e(t) = E \cos(\omega t)$ appliquée est suffisamment faible pour qu'on soit dans les conditions d'approximation de la question 2.

On donne : $r = 10 \Omega$ et on admet que :

$$s(t) \ll E \text{ soit } v(t) \approx e(t)$$



En utilisant l'expression $i=g(v)$ de la caractéristique de la diode, montrer que $s(t)$ s'écrit : $s(t) = 0,04.e(t) + 0,8.e^2(t)$

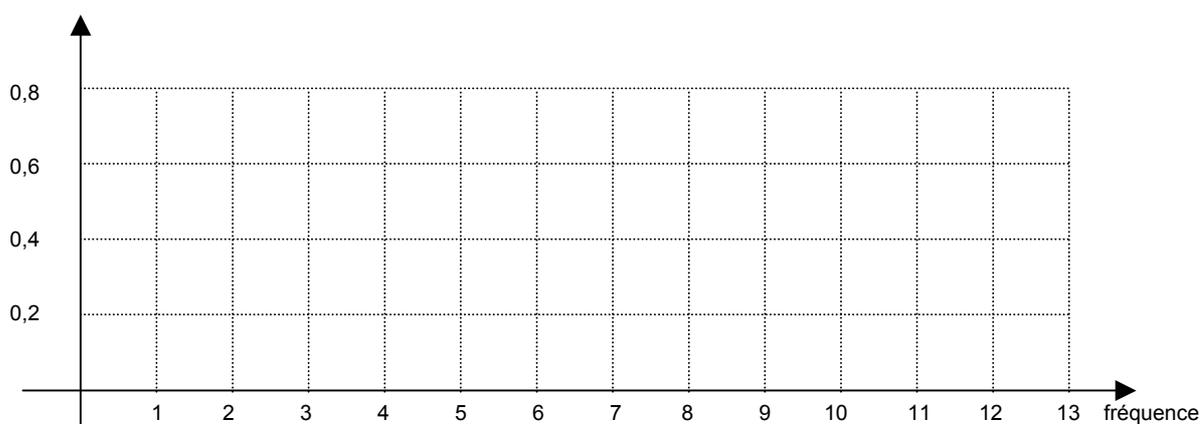
4) On applique une tension $e(t)$ telle que : $e(t) = x(t) + y(t)$ avec $x(t) = X \cdot \cos(\omega t)$ et $y(t) = Y \cdot \cos(\omega_0 t)$

Ecrire l'expression de la tension de sortie $s(t)$ en fonction de $x(t)$ et $y(t)$ et identifier les 7 fréquences qu'elle contient. Montrer qu'une simple diode peut suffire pour réaliser la fonction de mélange.

5) En prenant $f = 5 \text{ MHz}$, $f_0 = 6 \text{ MHz}$ et $X = Y = 20 \text{ mV}$, on montre que $s(t)$ en mV s'écrit :

$$s_{mV}(t) = 0,32 + 0,8 \cdot \cos(\omega t) + 0,8 \cdot \cos(\omega_0 t) + 0,16 \cdot \cos(2\omega t) + 0,16 \cdot \cos(2\omega_0 t) + 0,32 \cdot \cos[(\omega_0 + \omega)t] + 0,32 \cdot \cos[(\omega_0 - \omega)t]$$

Tracer le spectre du signal de sortie $s(t)$ et identifier les raies qui traduisent le mélange.



Radars Doppler hyperfréquence



comprendre le fonctionnement du radar mesurant la vitesse d'un mobile

Pour déterminer à distance sa vitesse, on envoie vers la cible une onde qui s'y réfléchit et revient vers l'émetteur. L'onde réfléchie voit sa fréquence légèrement modifiée en fonction de la vitesse de la cible.

Pour que la cible puisse être détectée, il faut que ses dimensions soient grandes devant la longueur d'onde du signal, ce qui nous donne deux familles de systèmes :

- les sonars travaillant avec des ultrasons (de 20 kHz à 10MHz selon l'application)
- les radars travaillant avec des ondes électromagnétiques dans les hyperfréquences (à 9,9 GHz en France)

1) Dans les deux cas, calculer la longueur d'onde correspondant au signal

	ultrasons	hyperfréquences
fréquence	100 kHz	9,9 GHz
vitesse de propagation c	340 m/s	300000 km/s
longueur d'onde		

2) Pour mesurer sa vitesse, on émet un signal sinusoïdal de fréquence fixe f_0 vers une cible qui est animée d'un mouvement et dont la vitesse suivant l'axe d'émission est notée v .

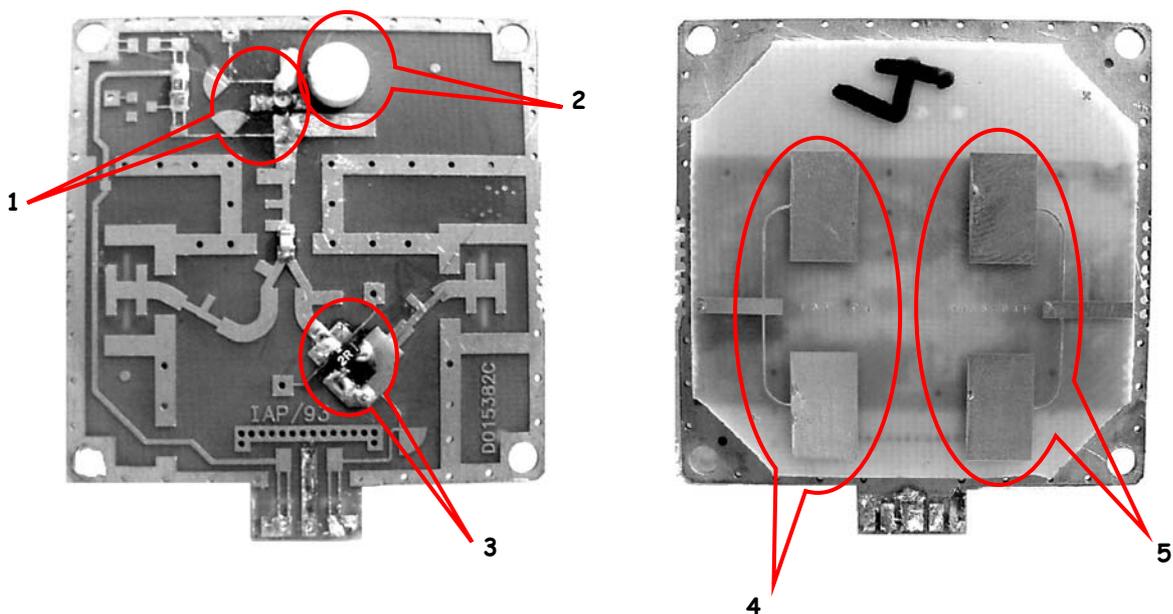
On montre alors que le signal se réfléchit sur la cible en mouvement et subit un changement de fréquence Δf proportionnel à la vitesse v :

$$\Delta f = 2.v.f_0/c \quad \text{effet Doppler}$$

Application numérique : calculer la variation de fréquence pour une cible se déplaçant à 10km/h puis à 150 km/h.

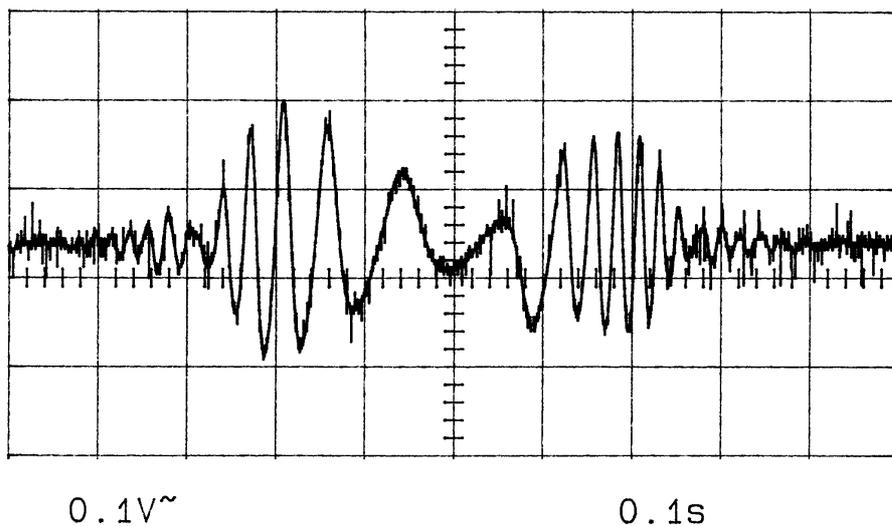
3) Comment peut-on simplement extraire la variation de fréquence Δf du signal reçu ? Dessiner le schéma fonctionnel d'un système fournissant en sortie le signal Doppler.

4) Sur les photographies d'un module radar Doppler, retrouver les fonctions décrites dans la question précédente.



1 : 2 : 3 :
 4 : 5 :

4) L'enregistrement du signal Doppler ci-dessous a été effectué en approchant puis en retirant la main du radar. A quel moment la vitesse est-elle maximale ? Déterminer la valeur de cette vitesse maximale.

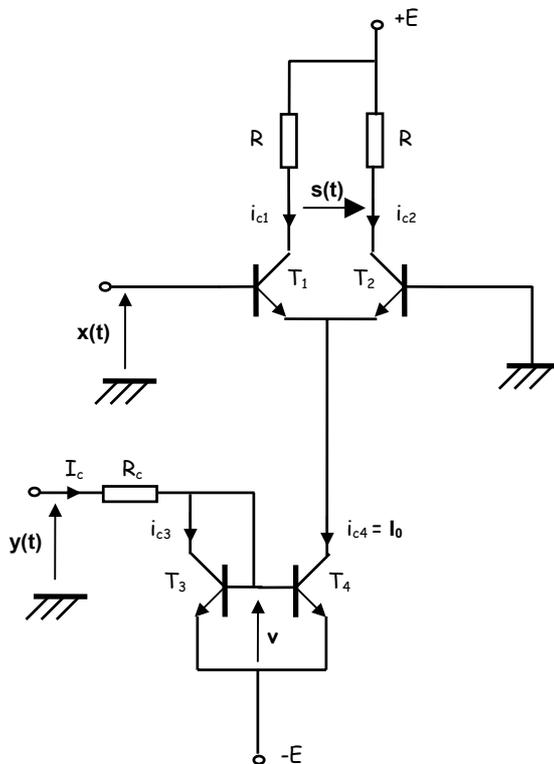


Mélangeur à transistor



comprendre comment on peut multiplier deux signaux avec un amplificateur différentiel

On se propose d'étudier le fonctionnement d'un multiplieur à transistors dont le schéma est le suivant :



- on admet que les 4 transistors sont identiques

- pour un transistor, le courant collecteur i_c est lié à la tension base-émetteur v_{be} par la relation suivante :

$$i_c = I_s \cdot e^{\lambda \cdot v_{be}} \quad \text{avec} \quad \lambda = q/kT = 40$$

- $R_c = 15 \text{ k}\Omega$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $E = 15 \text{ V}$

- on rappelle aussi que si $x \ll 1$, on a :

$$e^x \approx 1 + x$$

Etude de la fonction réalisée par T_3 et T_4 .

1) Exprimer les courants collecteurs des transistors T_3 et T_4 en fonction de la tension base-émetteur v et de la constante I_s et montrer que $i_{c3} = i_{c4} = I_0$.

2) Si on admet que le courant base d'un transistor est négligeable devant son courant collecteur, montrer que $I_c \approx I_0$.

3) En admettant que la tension base-émetteur v ne dépend pas de $y(t)$ et reste égale à $v=0,7\text{V}$, exprimer le courant I_0 en fonction de $y(t)$, R_c et E et montrer qu'il se met sous la forme :

$$I_0 = a \cdot y(t) + b$$

en précisant les valeurs numériques de a et b

Etude de la fonction réalisée par T₁ et T₂.

4) Si on appelle v_1 et v_2 les tensions base-émetteur de T₁ et T₂, établir la relation entre les tensions $x(t)$, v_1 et v_2 .

5) Montrer qu'on peut exprimer simplement le rapport i_{c1}/i_{c2} en fonction de λ et $x(t)$, et en déduire les expressions des courants i_{c1} et i_{c2} en fonction de I_o , λ et $x(t)$.

6) Calculer la tension de sortie $s(t)$ et montrer qu'elle se met sous la forme :
$$s(t) = RI_o \frac{e^{\lambda x} - 1}{e^{\lambda x} + 1}$$

7) Si la tension d'entrée $x(t)$ est suffisamment faible pour avoir $\lambda x(t) \ll 1$, on peut remplacer l'exponentielle par son expression approchée. Montrer qu'on a alors : **$s(t) \approx 0,5.R.\lambda.I_o.x(t)$**

Etude de la fonction complète.

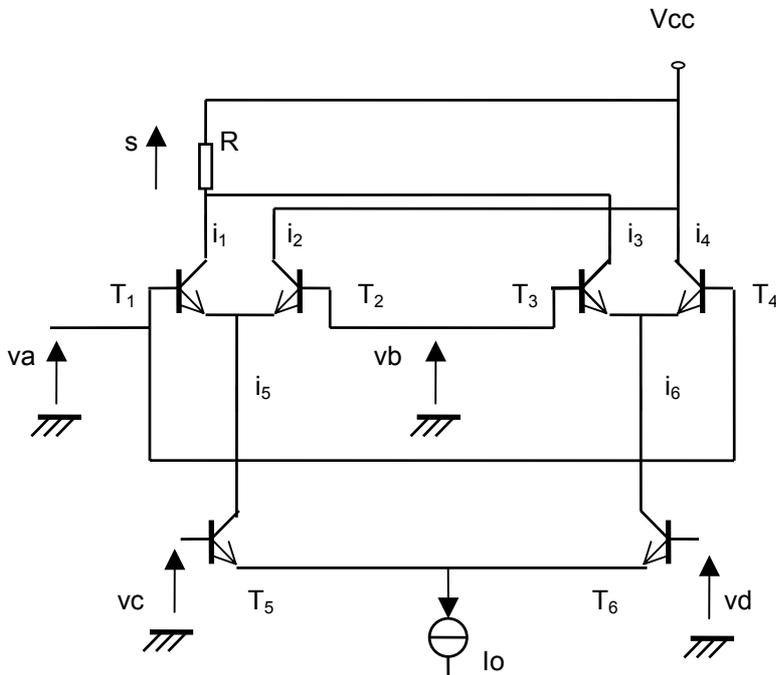
8) En utilisant les résultats des questions 3) et 7), exprimer la tension de sortie $s(t)$ en fonction des entrées $x(t)$ et $y(t)$ et montrer que le dispositif étudié réalise la fonction de mélangeur. Quel est le défaut de ce dispositif ?

Mélangeur à cellule de Gilbert



comprendre la structure du montage mélangeur utilisé dans la plupart des circuits intégrés RF

Le mélangeur à cellule de Gilbert est le montage le plus utilisé actuellement parce que facilement intégrable. Avec les techniques actuelles, on peut réaliser ce type de mélangeur jusqu'à quelques gigahertz.



- tous les transistors sont identiques et leur courant collecteur i_c est lié à la tension base-émetteur v par :

$$i_c = I_s \cdot e^{\lambda v}$$

avec :

$\lambda = q/kT = 40$ à l'ambiante
 q : charge de l'électron
 k : constante de Boltzmann
 T : température absolue
 I_s : courant de saturation

- on pose : $x = v_a - v_b$ et $y = v_d - v_c$

- on suppose $\lambda x \ll 1$ et $\lambda y \ll 1$

- si $\varepsilon \ll 1$ on peut écrire :

$$e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon \quad \text{et} \quad (1 + \varepsilon)^n \approx 1 + n\varepsilon$$

1) En écrivant les lois des mailles et des nœuds pour le circuit constitué par T_5 , T_6 et la source de courant I_o , établir les expressions approchées des courants i_5 et i_6 : $i_5 \approx 0,5 \cdot I_o (1 - \lambda y/2)$ et $i_6 \approx 0,5 \cdot I_o (1 + \lambda y/2)$.

2) En raisonnant de la même façon sur T_1-T_2 et T_3-T_4 , on montre que : $i_1 \approx 0,5 \cdot I_o (1 + \lambda x/2)$ et $i_3 \approx 0,5 \cdot I_o (1 - \lambda x/2)$. Utiliser ces résultats pour établir l'expression de i_1 et i_3 en fonction de I_o , λ , x et y .

3) En déduire l'expression de la tension de sortie $s(t)$ de la cellule et montrer que : $s(t) \approx 0,5 \cdot R \cdot I_o - 0,125 \cdot R \cdot I_o \lambda^2 xy$

► La fonction « changement de fréquence »

1) $s(t) = 4 \cdot x(t) \cdot y(t) = 4 \cdot 0,2 \cdot \cos(\omega t) \cdot 2 \cdot \cos(\omega_0 t) = 0,8 \cdot \cos(\omega + \omega_0)t + 0,8 \cdot \cos(\omega - \omega_0)t$

2) le spectre de $s(t)$ est composé de deux raies d'amplitude 0,8V à 1 MHz et à 9 MHz

3) Si on ne veut garder que le 9 MHz, il faut faire suivre le mélangeur par un filtre passe-bande centré sur 9 MHz
Le signal $x(t)$ est alors passé de 5 MHz à 9 MHz.

4)

- solution 1 : $f_0 = 95$ MHz, filtre centré sur 100 MHz qui élimine le 90 MHz
- solution 2 : $f_0 = 105$ MHz, filtre centré sur 100 MHz qui élimine le 110 MHz

5)

- solution 1 : $f_0 = 760$ MHz, filtre centré sur 160 MHz qui élimine le 1080 MHz
- solution 2 : $f_0 = 1080$ MHz, filtre centré sur 160 MHz qui élimine le 2000 MHz

► Les mélangeurs dans un téléphone GSM :

1)

- $f_0 = 770 + 0,2x_n$ en MHz si on veut émettre dans le canal n
- F1 et F2 sont centrés sur le milieu de la bande d'émission, soit 902,5 MHz, avec une largeur $B = 25$ MHz

2)

- $f_0 = 865 + 0,2x_n$ pour recevoir le canal n
- F1 délimite la bande reçue, il est centré sur 947,5 MHz et a une largeur de 25 MHz
- F2 et F3 sont deux filtres fi identiques, centrés sur 70 MHz et de largeur 200 kHz égale au canal

► Mélange et spectres dans un récepteur :

1) niveau de France-Inter : -58 dBm soit 1,1 mV

2) après l'ampli RF, le niveau est passé à : -48 dBm l'ampli RF a donc un gain $G_1 = 10$ dB

3) toutes les fréquences reçues sont multipliées par f_0 et se retrouvent donc décalées vers le haut (sans intérêt !) et vers le bas de f_0

4) après le mélangeur, France-Inter se retrouve à 10,7 MHz avec un niveau de -39 dBm.
Le signal de France-Inter a donc été multiplié par un signal sinusoïdal de fréquence $f_0 = 95,7 - 10,7 = 85$ MHz.
Le gain de conversion du mélangeur vaut $G_2 = -40 - (-48) = 9$ dB

5) Bandes passantes mesurées $B_{-3dB} \approx 250$ kHz et $B_{-20dB} \approx 350$ kHz Le coefficient de qualité vaut : $Q = f_0/B = 42,8$.

Un émetteur de la bande FM a droit à une canal de 250 kHz de large, le filtre fi est donc bien adapté à l'encombrement spectral d'un émetteur.

6) L'amplificateur de fréquence intermédiaire doit faire montrer le niveau de -39 dBm à 0 dBm, il doit donc avoir un gain de $G_4 = 39$ dB.

► Récepteur pour la radiodiffusion FM :

1) $f_0 = 85$ MHz $f_2 = 74,3$ MHz

2) La fréquence image ne peut être éliminée que par un filtre sélectif placé à l'entrée laissant passer les signaux dont la fréquence est comprise entre 88 et 108 MHz.
Le filtre fi doit avoir une largeur égale à celle du spectre du signal reçu, soit $B = 300$ kHz

3) f_0 doit aller de 77,3 MHz à 97,3 MHz

4) la bande image va de 66,6 à 86,6 MHz

5) Le limiteur écrête le signal FM et supprime en partie les parasites qui affectent l'amplitude.
Le démodulateur travaille toujours à 10,7 MHz, l'ampli BF a une bande passante de 15 kHz.

▶ Récepteur de télécommande :

1) voir cours

2) Le filtre d'entrée est centré sur 433,92 MHz et a une largeur idéale de $B = 10$ kHz (impossible à réaliser car Q trop élevé)
On demande à ce filtre d'avoir une atténuation suffisante à la fréquence image à 433,01 MHz.

Le filtre de fréquence intermédiaire est centré sur 455 kHz et a impérativement une bande $B = 10$ kHz.

3) Le bilan de puissance s'écrit : $E_{dBm} - 3 + 20 + 8 - 3 + G = S_{dBm}$ soit $G = 18$ dB pour une entrée à -30 dBm
et $G = 68$ dB ----- -80 dBm

▶ Récepteur de télévision analogique :

2) Après le mélange, la porteuse image se trouve à 38,9 MHz.

3) Après le mélange, la sous-porteuse couleur se trouve à 34,6 MHz et la sous-porteuse son à 32,4 MHz.

4) pour le filtre fi image : $f_{ia} = 38,9 - 6 = 32,9$ MHz et $f_{ib} = 38,9 + 1,25 = 40,25$ MHz

pour le filtre fi son : $f_{is} = 32,4$ MHz et $B_{son} = 40$ kHz

▶ Récepteur Météosat :

1) $P_r = 2,66 \cdot 10^{-15}$ W 2) $V_e^2 = P_r \cdot R$ soit $V_e = 0,36 \mu V = -115,8$ dBm

3) Le récepteur a une structure classique, avec 3 changements de fréquences successifs : $f_{01} = 1554$ MHz, $f_{02} = 126,3$ MHz
et $f_{03} = 10,245$ MHz

Ceci permet d'éloigner la fréquence image de 2×137 MHz (f_i élevée) tout en utilisant un filtre f_i réalisable 455 kHz, largeur 10 kHz.

4) Le filtre d'entrée doit atténuer la fréquence image qui se trouve à $f_2 = f_0 - f_i = 1417$ MHz
La courbe de réponse du filtre montre une atténuation de l'ordre de 30 dB à cette fréquence.

5) L'entrée est à $-115,7$ dBm, pour 10 dBm à l'entrée du démodulateur il faut un gain total $G = 10 - (-115,7) = 125,7$ dBm

6) Le bilan de puissance s'écrit : $E_{dBm} - 1 + 15 + -8 - 5 + G + 14 - 5 + G + 14 - 5 + G = S_{dBm}$
Soit $3G = 106,7$ dBm et $G = 35,6$ dBm

▶ Récepteur TVSAT analogique :

1) $f_{01} = 10$ GHz $f_1 = 1259$ MHz 2) $f_b = 950$ MHz $f_h = 1700$ MHz $f_{i1} = 1325$ MHz

3) $f_{02} = 1189$ MHz le filtre f_i a une largeur de $B = 27$ MHz

4) $f_{0a} = 17,72$ MHz $f_{0b} = 17,9$ MHz $f_{0c} = 18,08$ MHz $f_{0d} = 18,26$ MHz

▶ Mélange par distorsion quadratique :

1) $s(t) = 2 \cdot e_1(t) + 2 \cdot e_2(t) + 0,3 \cdot e_1^2(t) + 0,3 \cdot e_2^2(t) + 0,6 \cdot e_1(t) \cdot e_2(t)$ le dernier terme correspond à une multiplication

2) après application des formules de trigonométrie pour linéariser les termes en \cos^2 et en $\cos \cdot \cos$, on trouve :

$s(t) = 1,2 + 4\cos(\omega_1 t) + 4\cos(\omega_2 t) + 0,6\cos(2\omega_1 t) + 0,6\cos(2\omega_2 t) + 1,2\cos(\omega_1 + \omega_2)t + 1,2\cos(\omega_1 - \omega_2)t$

- le spectre est formé de 7 raies aux fréquences : 0, 10, 100, 110, 200, 210 et 220 kHz
- les raies aux fréquences 10 et 210 kHz correspondent au mélange

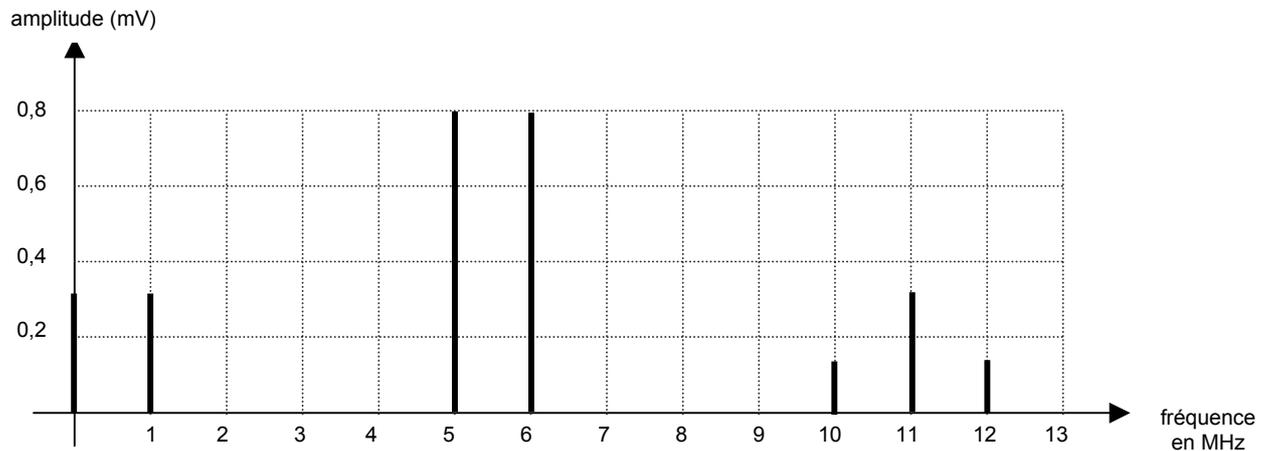
► Mélangeur à diode

2) on remplace $e^{\lambda v}$ par $1 + \lambda v + (\lambda v)^2/2$ et on trouve : $i = I_s \cdot \lambda v + I_s \cdot (\lambda v)^2/2 = 0,004 \cdot v + 0,08 \cdot v^2$

3) $s(t) = r \cdot i(t) = r \cdot (0,004 \cdot v + 0,08 \cdot v^2)$ et, puisque $v(t) \approx e(t)$: $s(t) = r \cdot (0,004 \cdot e(t) + 0,08 \cdot e^2(t))$

4) $s(t) = 0,04 \cdot x(t) + 0,04 \cdot y(t) + 0,8 \cdot x^2(t) + 0,8 \cdot y^2(t) + 1,6 \cdot x(t) \cdot y(t)$
f **f₀** **0,f** **0,f₀** **f-f₀** et **f+f₀**

5) les raies à 1 MHz et 11 MHz (fréquences somme et différence) traduisent le mélange



► Radar Doppler hyperfréquence :

1) ultrasons : $\lambda = c/f = 3,4$ mm

hyperfréquences : $\lambda = c/f = 30,3$ cm

2) $\Delta f = 183$ Hz pour une vitesse de 10 km/h

$\Delta f = 2750$ Hz pour une vitesse de 150 km/h

3) On mélange le signal émis avec le signal reçu et on récupère en sortie du mélangeur la fréquence différence égale à la fréquence Doppler.

4) 1- oscillateur 2- résonateur diélectrique 3- mélangeur à diodes 4- antenne réception 5- antenne émission

5) La vitesse la plus élevée correspond à la fréquence la plus élevée et donc à la période la plus courte.

Sur l'enregistrement, on lit $T_{\min} \approx 0,02$ s soit $f \approx 50$ Hz et $v \approx 2,7$ km/h = 0,75 m/s

► Mélangeur à transistor

1) T_3 et T_4 ont la même tension base-émetteur, ils ont donc le même courant collecteur : $i_{c3} = i_{c4} = I_s \cdot e^{\lambda v} = I_0$

2) $I_c = i_{c3} + i_{b3} \approx i_{c3} = I_0$

3) $I_c = I_0 = [y(t) - 0,7 + E]/R_c = 6,65 \cdot 10^{-5} \cdot y(t) + 9,53 \cdot 10^{-4} = a \cdot y(t) + b$

4) $x(t) = v_1(t) - v_2(t)$

5) $\frac{i_{c1}}{i_{c2}} = e^{\lambda(v_1 - v_2)} = e^{\lambda x}$ or $i_{c1} + i_{c2} = I_0$ d'où : $i_{c1} = I_0 \frac{e^{\lambda x}}{1 + e^{\lambda x}}$ et $i_{c2} = I_0 \frac{1}{1 + e^{\lambda x}}$

6) $s(t) = R(i_{c1} - i_{c2}) = RI_0 \frac{e^{\lambda x} - 1}{e^{\lambda x} + 1}$

7) si $\lambda x \ll 1$, alors : $s(t) \approx RI_0 \frac{1 + \lambda x - 1}{1 + \lambda x + 1} \approx RI_0 \frac{\lambda x}{2}$

8) on remplace I_0 par son expression établie en 3) et on trouve : $s(t) = 1,33 \cdot x(t) \cdot y(t) + 38,13 \cdot x(t)$

Ce montage fonctionne bien en mélangeur grâce au terme $x(t) \cdot y(t)$, même s'il redonne aussi en sortie le signal $x(t)$.

► **Mélangeur à cellule de Gilbert :**

$$1) i_5 = I_s e^{\lambda v_5} \quad i_6 = I_s e^{\lambda v_6} \quad i_5 + i_6 = I_0 \quad v_c - v_5 + v_6 - v_d = 0$$

on calcule le rapport des 2 courants pour éliminer I_s : $\frac{i_5}{i_6} = e^{\lambda(v_5 - v_6)} = e^{-\lambda y}$

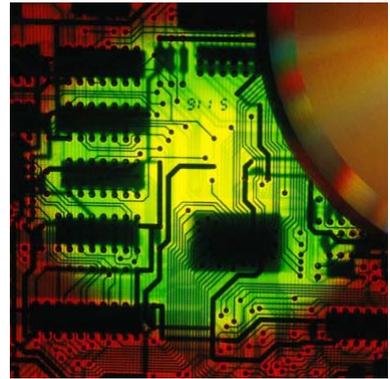
on en déduit :
$$i_6 = \frac{I_0}{1 + e^{-\lambda y}} \approx \frac{I_0}{2 - \lambda y} \approx 0,5 \cdot I_0 \left(1 - \frac{\lambda y}{2}\right)^{-1} \approx 0,5 \cdot I_0 \left(1 + \frac{\lambda y}{2}\right) \quad \text{et} \quad i_5 \approx 0,5 \cdot I_0 \left(1 - \frac{\lambda y}{2}\right)$$

$$2) i_1 \approx 0,25 \cdot I_0 \left(1 + \frac{\lambda x}{2}\right) \left(1 - \frac{\lambda y}{2}\right) \quad \text{et} \quad i_3 \approx 0,25 \cdot I_0 \left(1 - \frac{\lambda x}{2}\right) \left(1 + \frac{\lambda y}{2}\right)$$

$$3) s(t) = R(i_1 + i_3) = 0,25 \cdot R I_0 \left(1 + \frac{\lambda x}{2} - \frac{\lambda y}{2} + \frac{\lambda^2 xy}{4} + 1 - \frac{\lambda x}{2} + \frac{\lambda y}{2} - \frac{\lambda^2 xy}{4}\right) = 0,5 \cdot R I_0 \left(1 - \frac{\lambda^2 xy}{4}\right)$$

la cellule de Gilbert effectue bien la fonction de multiplication, à un décalage continu près

Questionnaire



jean-philippe muller



Questions

1 La modification de la fréquence d'un signal sinusoïdal pur ou modulé :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) peut se faire à l'aide d'un filtre | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) se fait à l'aide d'un multiplieur | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) nécessite toujours un filtre passe-bande centré sur la fréquence de départ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) nécessite toujours un filtre passe-bande centré sur la fréquence d'arrivée | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) est toujours accompagnée d'une atténuation du signal | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) est une fonction très courante dans les équipements de télécommunication | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) cette fonction ne se rencontre que dans les récepteurs | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

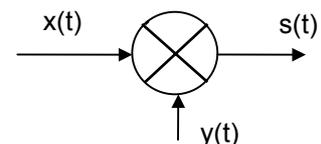
2 Un mélangeur est attaqué par 2 signaux sinusoïdaux à $f_1 = 100$ MHz et $f_2 = 110$ MHz. Si le mélangeur est parfait, la sortie :

- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) a un spectre formé de 2 raies | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) a une fréquence $f = f_1 \cdot f_2 = 11000$ MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) contient du 100 MHz et du 210 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) contient du 210 MHz et du 10 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) est en général sinusoïdale | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) contient toujours plus de 2 raies si le mélangeur n'est pas parfait | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) dans ce cas, elle peut contenir du 100 MHz, ou du 110 MHz, ou du 200 MHz, ou du 220 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

3 Un mélangeur supposé parfait a un gain de conversion entre $x(t)$ et $s(t)$ de 6 dB. On lui applique deux signaux sinusoïdaux dont les expressions sont :

$$x(t) = 2\cos(\omega_1 t) \quad \text{et} \quad y(t) = 3\cos(\omega_2 t)$$

avec $f_1 = 10$ MHz et $f_2 = 12$ MHz

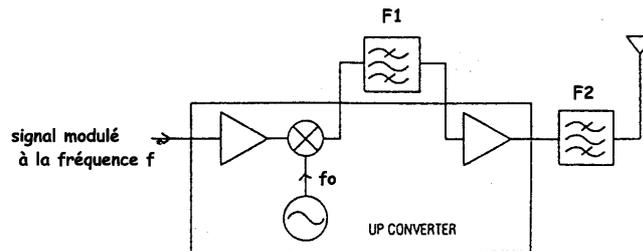


- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) le signal en sortie du mélangeur est parfaitement sinusoïdal | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) en sortie du mélangeur, on a du 2 MHz et du 22 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) l'amplification introduite par le mélangeur entre $x(t)$ et $s(t)$ est de $A=3$ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) le niveau du signal à 2 MHz est de 4 V crête | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) en général, on supprime la composante non souhaitée par un filtre réjecteur | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) si on veut changer le 10 MHz en 22 MHz, il faut faire suivre le multiplieur par un filtre passe-bande centré sur 22 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) si le signal $x(t)$ est modulé, le même montage permet aussi de le déplacer à 22 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

4 Pour transposer un signal modulé de 140 MHz à 890 MHz, il faut :

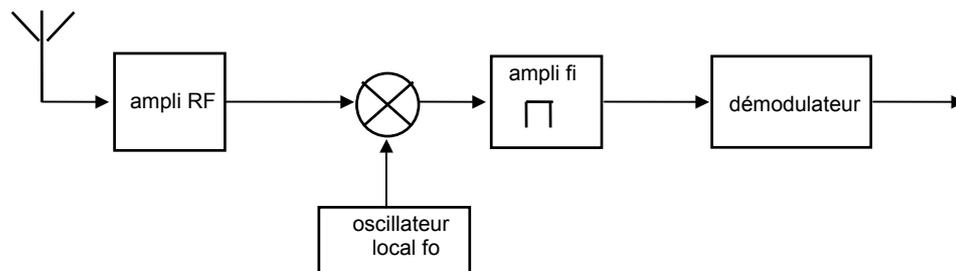
- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) lui ajouter une sinusoïde à 750 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le faire passer dans un filtre centré sur 750 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) le multiplier par un signal sinusoïdal à 750 MHz puis le filtrer | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) le déformer pour générer des harmoniques | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

5 Dans un GSM la porteuse à 120 MHz est modulée par l'information à transmettre. Pour déplacer la porteuse dans un des 125 canaux ($F_{\min} = 890$ MHz, pas 200 kHz) on utilise le circuit ci-dessous :



- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) pour changer de canal, il faut faire varier le niveau de l'oscillateur local | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) pour transposer le signal à 890 MHz, on règle l'oscillateur local à $f_o = 770$ MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) pour cette opération, on peut aussi régler l'oscillateur local à 1030 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) le filtre F1 fixe est centré sur 890 MHz et a une largeur de 200 kHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) le filtre F2 sert à filtrer les éventuels harmoniques générés par l'ampli de sortie | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

6 Un récepteur à changement de fréquence est prévu pour recevoir la bande allant de 14 à 18 MHz, avec un oscillateur local placé en-dessous de la fréquence à recevoir et une f_i à 455 kHz.



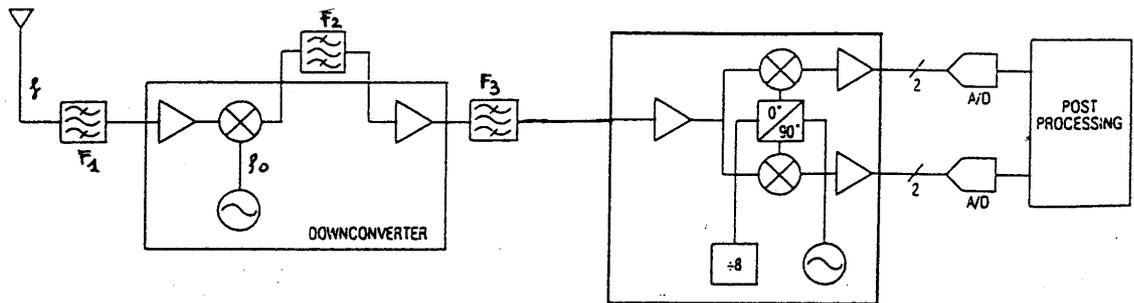
- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) l'oscillateur local va de 14,455 à 18,455 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) pour $f_o = 15,2$ MHz, on capte la fréquence 15,655 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) pour $f_o = 15,2$ MHz, on peut aussi capter la fréquence 14,745 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) la fréquence 14,745 MHz est la fréquence image de 15,655 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) pour éviter la réception de la fréquence image, on utilise un filtre f_i très sélectif | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) le filtre f_i est le plus souvent un filtre céramique | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) autrefois, on utilisait des circuits LC pour réaliser les filtres f_i | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| h) le gabarit du filtre f_i est important pour la sélectivité du récepteur | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| i) la suppression de la fréquence image est plus facile si la f_i a une valeur faible | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

7 En réception, la fréquence image :

- a) est créée dans le récepteur et ne contient pas d'information
- b) est la fréquence de la station adjacente à la station reçue
- c) est normalement filtrée par l'amplificateur RF d'entrée
- d) est égale au double de la fréquence intermédiaire

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8 L'étage de réception d'un téléphone GSM a la structure suivante :



La gamme des fréquences à recevoir va de $f_{\min} = 935$ MHz à $f_{\max} = 959,8$ MHz par pas de 200 kHz et la fréquence intermédiaire est fixée à $f_i = 70$ MHz. Une émission occupe une bande de 200 kHz.

- a) l'oscillateur local doit couvrir la gamme allant de 865 à 889,8 MHz
- b) le filtre F_1 est accordé l'émetteur à recevoir
- c) le changement de canal se fait en changeant la valeur de l'oscillateur local
- d) le filtre F_2 fixe a une largeur de 200 kHz et est centré sur 70 MHz
- e) pour recevoir le 935MHz, on fixe $f_o=865$ MHz et a fréquence image vaut 1075MHz
- f) le filtre F_1 sert à éliminer la fréquence image
- g) le filtre F_1 ne sert qu'à éliminer la fréquence image

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9 Les différents types de mélangeurs :

- a) la cellule de Gilbert est le type de mélangeur le plus utilisé car facile à intégrer
- b) la cellule de Gilbert a l'inconvénient de ne pas avoir de gain de conversion
- c) la cellule de Gilbert peut être montée en oscillateur, ce qui permet de réaliser à la fois la fonction de multiplication et celle d'oscillateur local
- d) les mélangeurs à cellule de Gilbert montent actuellement sans problème à 2 GHz
- e) aux fréquences supérieures à quelques GHz, le mélangeur le plus utilisé est la diode
- f) une diode, un transistor ou un AOp peuvent être utilisés pour faire du mélange
- g) tous les composants ayant une caractéristique présentant une partie arrondie peuvent être utilisés pour faire du mélange
- h) un amplificateur audio peut faire du mélange
- i) une enceinte acoustique peut faire du mélange
- j) le mélange fait par un mélangeur en HF est exactement la même chose que ce que fait une table de mixage pour le son en BF

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Réponses

N°	Réponses justes	Commentaires
1	b, d, f	
2	a, d, f, g	g) en sortie d'un mélangeur réel, on trouve souvent, en plus des fréquences somme et différence, les 2 fréquences injectées ainsi que le double de ces fréquences
3	b, d, f, g	a) en sortie d'un multiplieur, on a au moins 2 fréquences. Le signal ne peut donc pas être sinusoïdal.
4	c	d) le changement de fréquence par génération d'harmoniques est effectivement utilisé, mais ne permet que de passer à la fréquence double, triple ...
5	b, e	c) les valeurs de f_0 possible sont 770 MHz et 1010 MHz d) le filtre F_1 fixe doit laisser passer tous les canaux et donc aller de 890 MHz à $890 + 125.0,2 = 915$ MHz
6	b, c, d, f, g, h	e) la suppression de la fréquence image ne peut se faire que par le filtre d'entrée i) l'intervalle entre la station reçue et sa fréquence image vaut $2.f_i$. De ce fait, plus la f_i est élevée, plus la fréquence de l'émetteur image sera loin de la station à recevoir, et donc facile à filtrer
7	c	b) les stations adjacentes sont toujours éliminées par le filtre f_i
8	a, b, c, d, f	e) pour $f_0 = 865$ MHz, on reçoit le 935 MHz et sa fréquence image 795 MHz g) F_1 sert aussi à éliminer les signaux forts hors bande (TV par exemple) qui risqueraient de saturer l'ampli RF et perturber le fonctionnement du récepteur
9	a, c, d, e, g, h, i	f) l'AOP est linéaire ou saturé et n'a pas de zone où la caractéristique est courbe : il ne peut donc pas servir à faire du mélange h) i) dans ce cas, les signaux de fréquence somme et différence s'appellent distorsion d'intermodulation j) le mélangeur multiplie 2 signaux, la table de mixage additionne les signaux, ce qui n'est pas du tout la même chose !