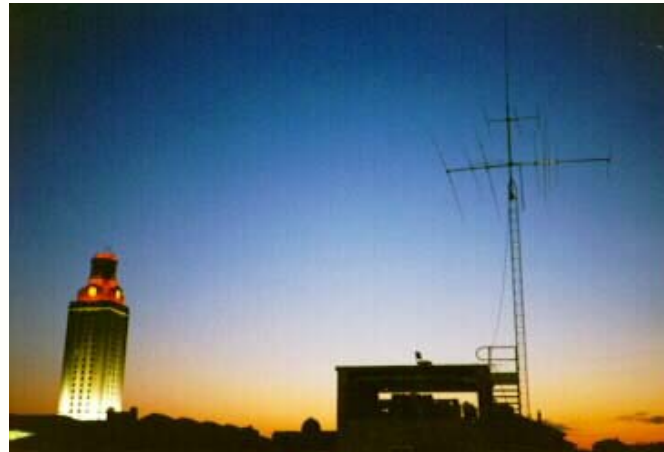




Le mélange et les mélangeurs





Le mélange

- 1- La fonction de "mélange"
- 2- Le mélange de deux sinusoïdes
- 3- Multiplication d'un signal modulé par une sinusoïde
- 4- Spectre en sortie du mélangeur
- 5- La fonction "changement de fréquence"
- 6- Le changement de fréquence dans les émetteurs
- 7- La réception d'un signal radio
- 8- Le récepteur à amplification directe
- 9- Exemple de récepteur à amplification directe
- 10- Le récepteur à changement de fréquence
- 11- Les premiers récepteurs superhétérodynes
- 12- Structure d'un récepteur FM
- 13- Exemple de récepteur FM (1)
- 14- Exemple de récepteur FM (2)
- 15- Le filtre de fréquence intermédiaire
- 16- La technologie des filtres fi
- 17- Le problème de la fréquence image
- 18- Changement de fréquence dans le récepteur FM
- 19- La fréquence image dans le récepteur FM
- 20-24 Application : étage de réception d'un GSM (1)
- 25- Récepteur pour la bande "aviation"

Les mélangeurs

- 27- Le principe du mélange par non-linéarité
- 28- Les dispositifs mélangeurs
- 29- Influence du niveau d'injection
- 30- Principe du mélangeur à cellule de Gilbert
- 31- Exemple de cellule de Gilbert : le NE602/612
- 32- Exemple d'utilisation du NE602
- 33- La cellule de Gilbert en auto-oscillation
- 34- Principe du mélangeur à diode
- 35- Exemple d'utilisation d'une diode mélangeuse
- 36- La diode mélangeuse dans le radar Doppler
- 37- Exemple de réalisation d'un mélangeur à 2 diodes
- 38- Exemple d'utilisation de 2 diodes mélangeuses
- 39- Structure du mélangeur Schottky
- 40- Exemple de mélangeur Schottky
- 41- Exemple d'utilisation de mélangeur Schottky

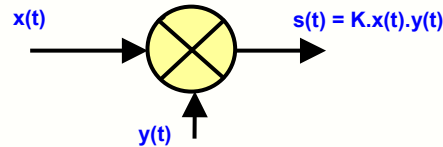




1- La fonction de « mélange »

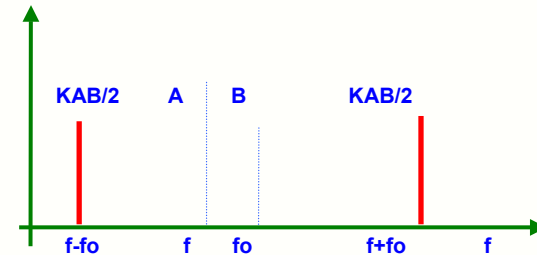
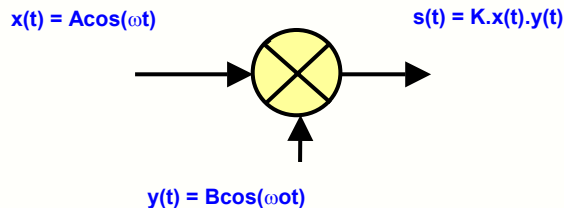


Le mélangeur est un dispositif à deux entrées et une sortie qui effectue sur les signaux appliqués sur les entrées une opération non-linéaire de multiplication :



- dans un système linéaire (ampli, filtre ...), on retrouve en sortie des fréquences identiques à celles injectées à l'entrée
- un dispositif non-linéaire fait apparaître en sortie des fréquences nouvelles
- ces nouvelles fréquences sont liées mathématiquement aux fréquences d'entrée

Le cas le plus simple concerne le mélange de deux signaux sinusoïdaux.



Le signal en sortie du mélangeur s'écrit :

$$s(t) = K \cdot x(t) \cdot y(t) = K \cdot A \cos(\omega t) \cdot B \cos(\omega_0 t) = \frac{1}{2} K \cdot A \cdot B \cos(\omega + \omega_0)t + \frac{1}{2} K \cdot A \cdot B \cos(\omega - \omega_0)t$$

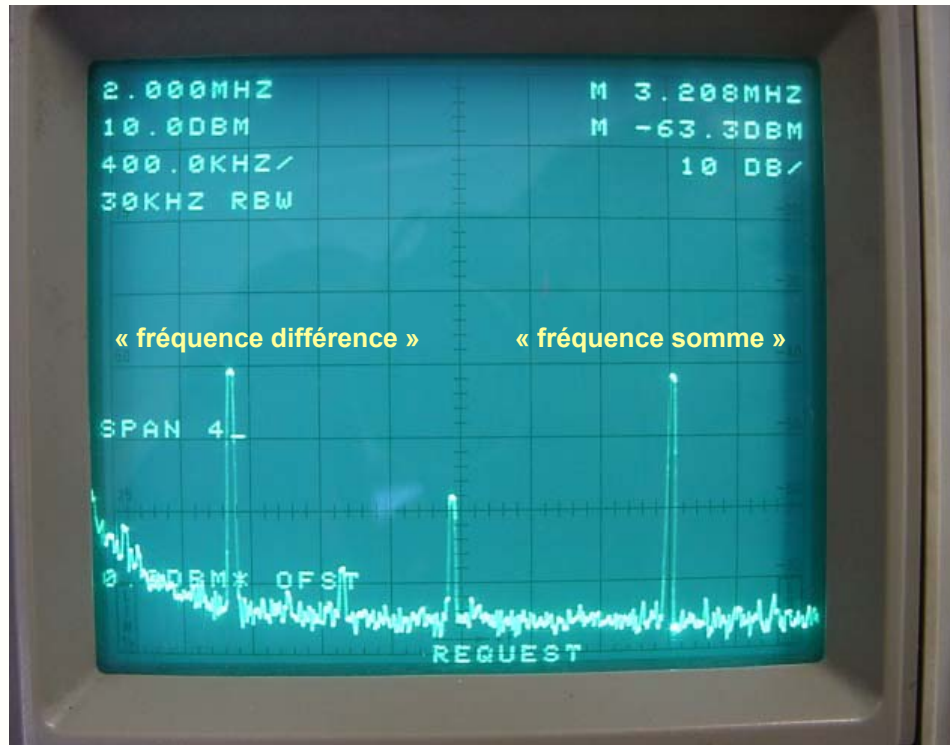
Il est composé de deux signaux sinusoïdaux aux fréquences somme et différence.



2- Le mélange de deux sinusoïdes



La visualisation du spectre en sortie d'un mélangeur montre le mélange de deux sinusoïdes de fréquence $f_0 = 2 \text{ MHz}$ et $f = 1,2 \text{ MHz}$:



- comme le prévoit la théorie, on trouve deux raies centrées sur les fréquences $f - f_0 = 0,8 \text{ MHz}$ et $f + f_0 = 3,2 \text{ MHz}$
- on note aussi la présence d'un résidu du signal à 2 MHz (défaut du mélangeur)

[Vidéo](#) : évolution du spectre avec f variable (de 1,2 MHz à 0)



3- Multiplication d'un signal modulé par une sinusoïde



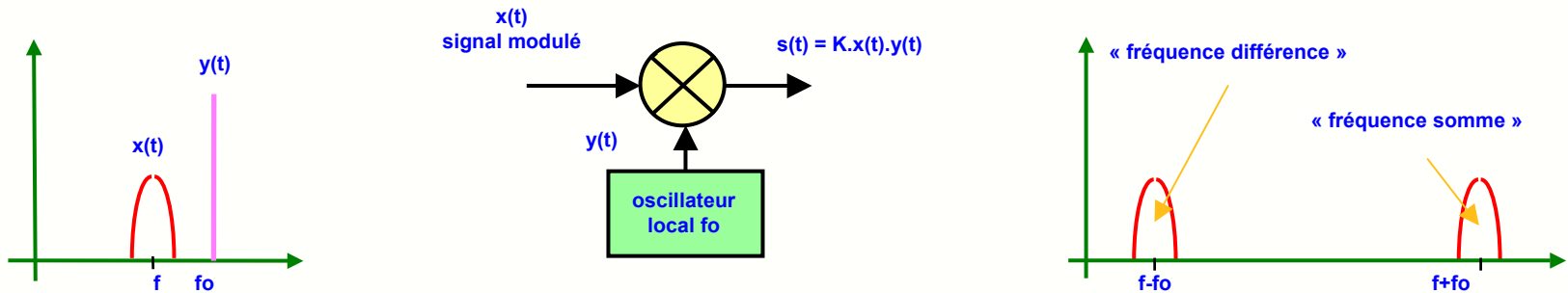
Dans l'utilisation normale du mélangeur :

- le signal $x(t)$ est un signal de fréquence f modulé en amplitude ou en fréquence
- le signal $y(t)$ est un signal de fréquence f_0 provenant d'un oscillateur appelé oscillateur local

$$x(t) = A \cos(\omega t)$$

avec

- A variable pour un signal AM
- ω variable pour un signal FM



Le signal en sortie du mélangeur s'écrit :

$$s(t) = K \cdot x(t) \cdot y(t) = K \cdot A \cos(\omega t) \cdot B \cos(\omega_0 t) = \frac{1}{2} K A B \cos((\omega + \omega_0)t) + \frac{1}{2} K A B \cos((\omega - \omega_0)t)$$

- les 2 signaux en sortie du mélangeur sont modulés en amplitude ou en fréquence comme $x(t)$
- en sortie du mélangeur, on retrouve donc le spectre du signal $x(t)$ dédoublé et centré sur les fréquences $f-f_0$ et $f+f_0$
- le changement de fréquence conserve les modulations



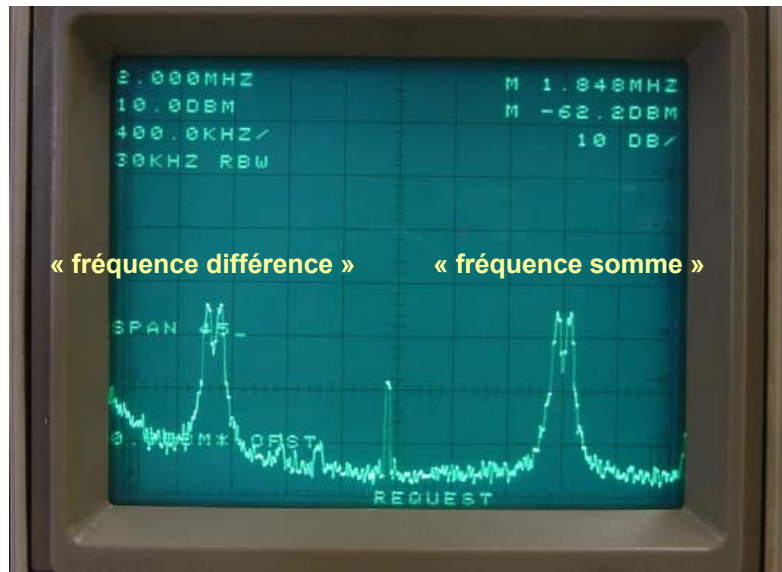
4- Spectre en sortie du mélangeur



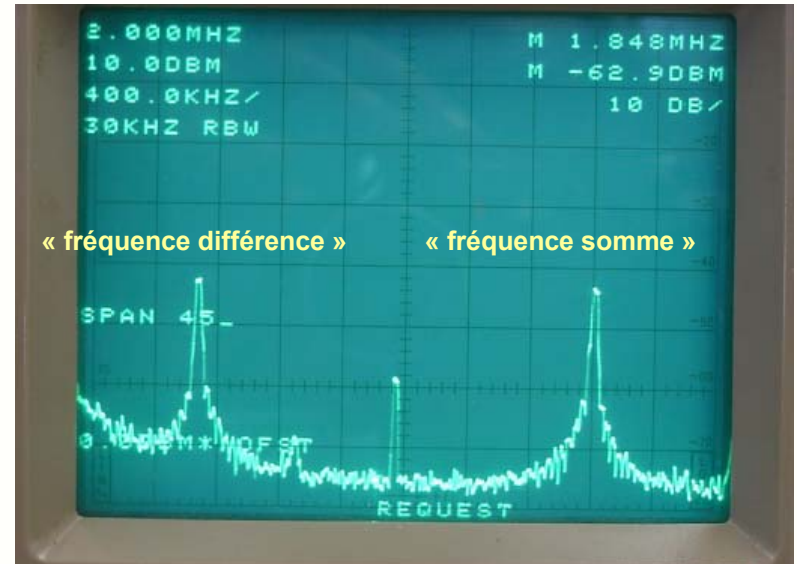
Mélange d'un signal sinusoïdal de fréquence $f_0 = 2$ MHz avec un **signal modulé en amplitude** de fréquence $f = 1,2$ MHz :

- présence des fréquences somme et différence à 3,2 et 0,8 MHz
- le changement de fréquence conserve la modulation AM

⇒ le changement de fréquence conserve la modulation AM



Vidéo : évolution du spectre avec f_0 variable (de 2 à 1,2 MHz)



Mélange d'un signal sinusoïdal de fréquence $f_0 = 2$ MHz avec un **signal modulé en fréquence** de fréquence $f = 1,2$ MHz :

- présence des fréquences somme et différence à 3,2 et 0,8 MHz
- le changement de fréquence conserve la modulation FM

⇒ le changement de fréquence conserve la modulation FM

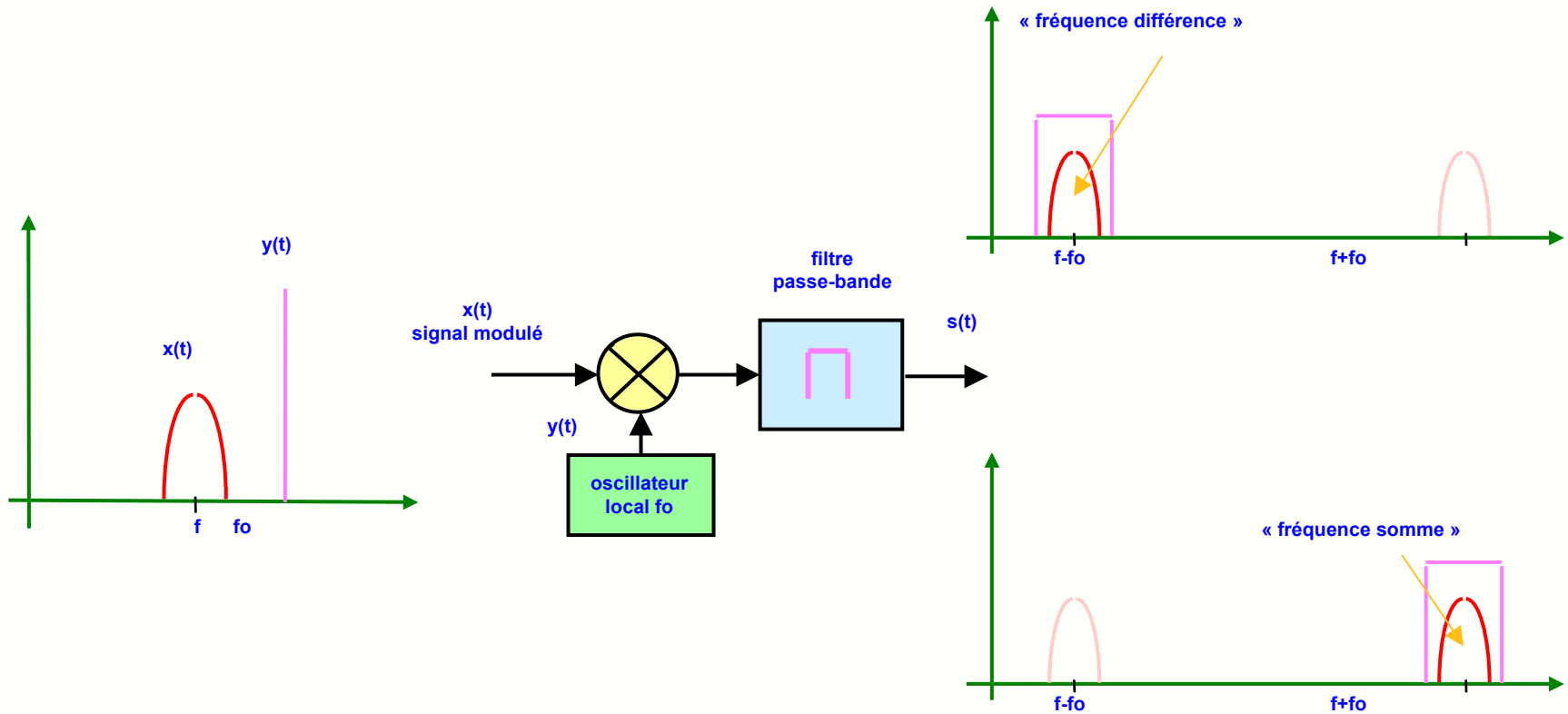
Vidéo : évolution du spectre avec f_0 variable

5- La fonction « changement de fréquence »



Un filtre **passé-bande** placé en sortie de l'ensemble mélangeur-oscillateur local permet, selon l'application :

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



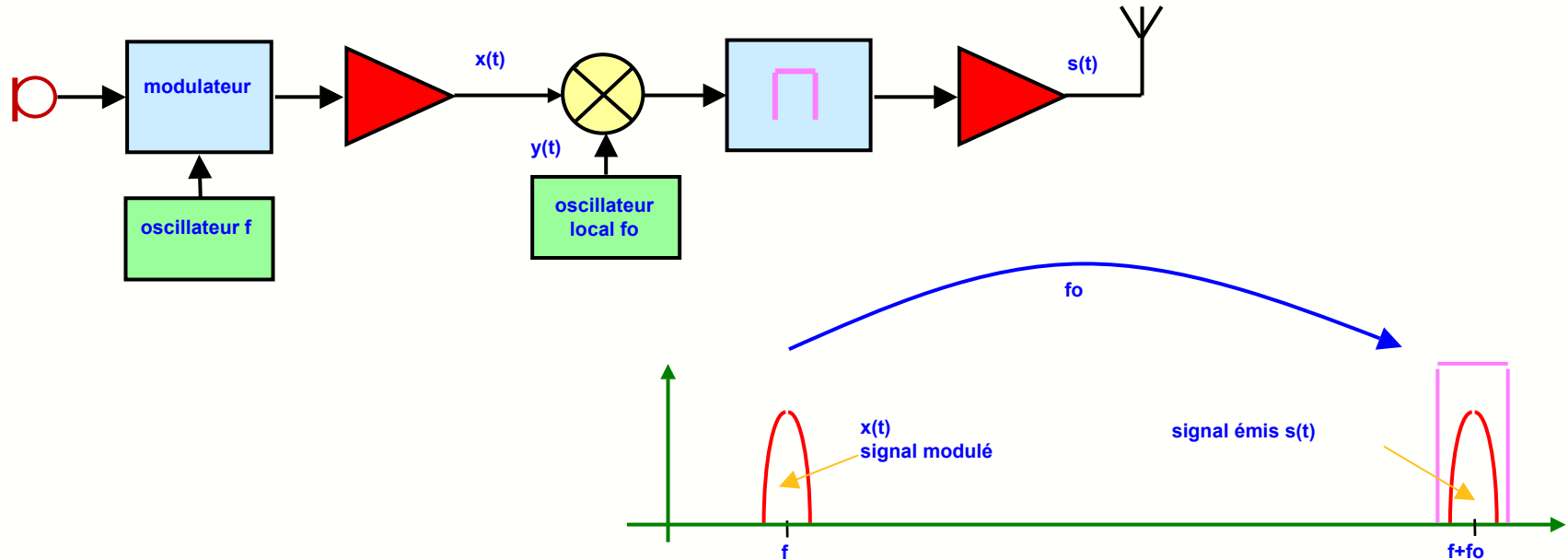
- l'ensemble mélangeur-oscillateur local-filtre permet donc de **changer la fréquence** d'un signal modulé
- le spectre du signal modulé est simplement **translaté** sur l'axe des fréquences vers le haut ou vers le bas
- l'amplitude du déplacement est égale à la valeur de la fréquence de l'oscillateur local f_0



6- Le changement de fréquence dans un émetteur



Dans un **émetteur**, on trouve souvent un changeur de fréquence pour déplacer le signal modulé à la fréquence d'émission :



- la porteuse est en général modulée en amplitude ou en fréquence par le signal à transmettre à une fréquence f assez basse
- le signal modulé $x(t)$ est ensuite **transposé** à la fréquence d'émission à l'aide d'un étage changeur de fréquence
- la valeur de la fréquence de l'oscillateur local f_0 détermine la **fréquence d'émission** qui vaut $f + f_0$
- 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

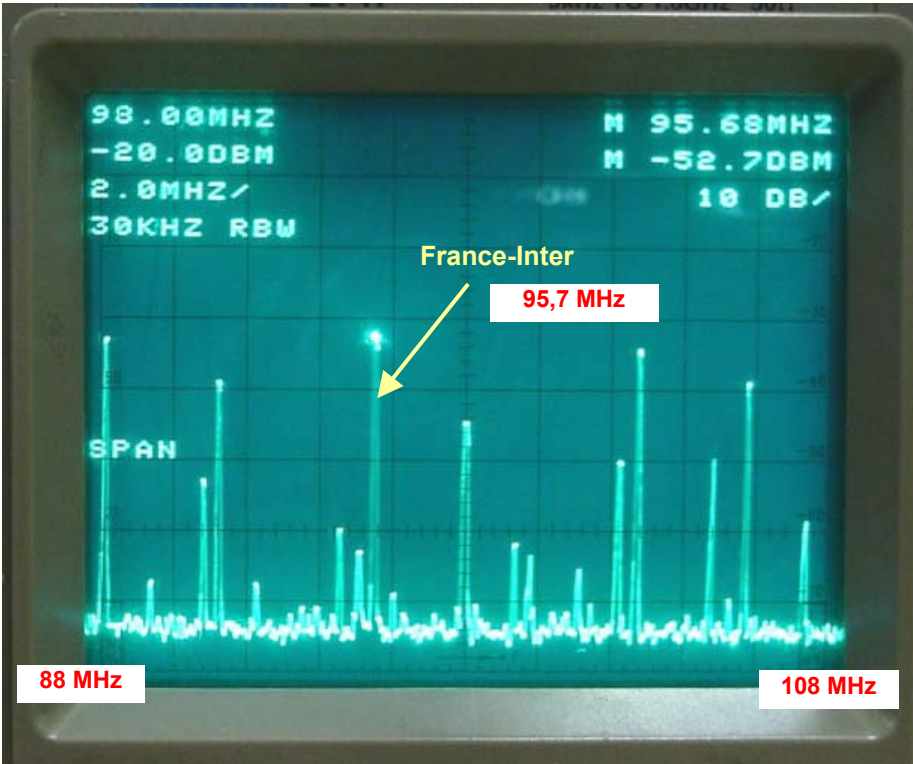


7- La réception d'un signal radio



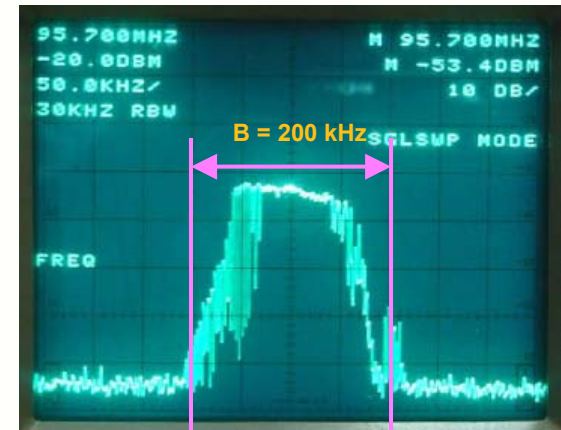
Pour recevoir un signal radio AM, FM, TV, GSM ...il faut :

- isoler la porteuse modulée que l'on souhaite recevoir et éliminer toutes les autres émissions de la bande
- amplifier le signal reçu qui est en général très faible
- démoduler la porteuse modulée pour récupérer l'information basse-fréquence



La bande FM est occupée par de nombreux émetteurs comme le montre ce spectre enregistré à Mulhouse

Spectre d'une émission de la bande FM



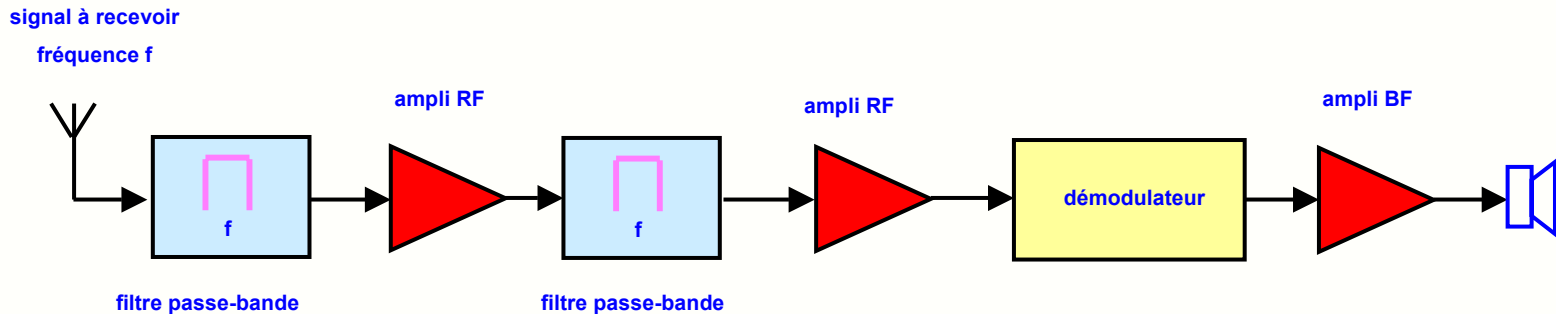
- une observation plus précise d'une émission montre que ces signaux occupent une bande de largeur $B = 250 \text{ kHz}$ environ
- le filtre destiné à sélectionner l'émission souhaitée devra donc avoir la même largeur $B = 250 \text{ kHz}$



8- Le récepteur à amplification directe



La structure la plus simple pour la réception radio est le récepteur à amplification directe :



Pour sélectionner une émission :

- il faut régler la fréquence centrale f des filtres passe-bande sur la fréquence du signal à recevoir
- la bande passante B de ces filtres doit être égale à la largeur spectrale d'une émission
- la coupure de ces filtres doit être raide et l'atténuation hors-bande importante

Remarques :

- si on change un peu la fréquence d'accord d'un filtre LC, son coefficient de qualité Q reste constant et sa bande passante $B = f/Q$ varie : il est donc difficile de maintenir B constante
- l'amplification RF élevée à la fréquence f s'accompagne forcément de risques d'oscillation
- le coefficient de qualité Q de ces filtres très grand est difficile à atteindre en pratique

Exemple pour la bande FM :

- f variable de 88 à 108 MHz
- $B = 250$ kHz
- $Q = f/B = 400$!

Ces difficultés de réalisation pratique font que la structure de récepteur à amplification directe est rarement utilisée, sauf pour la réception d'une fréquence unique.

9- Exemple de récepteur à amplification directe



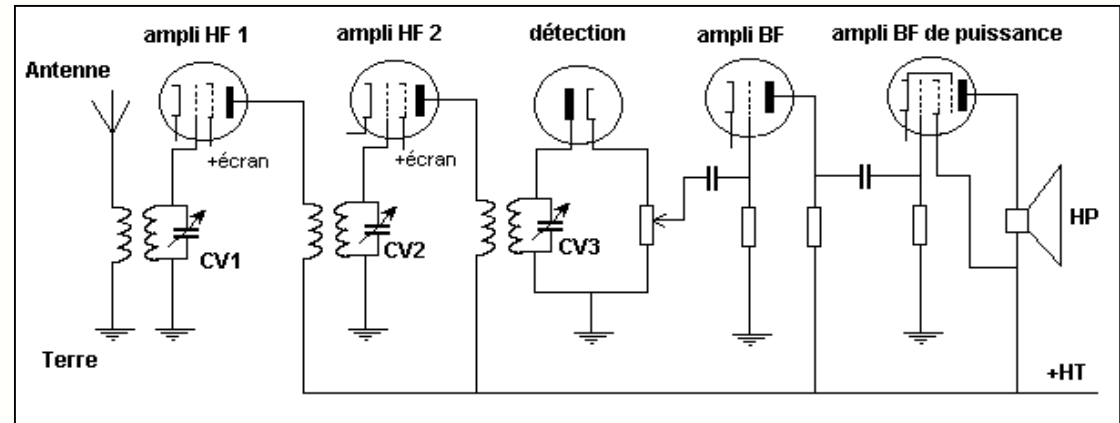
Poste PHILIPS (1932)

La commercialisation des récepteurs "grand public" utilisant le principe de l'amplification directe a été assez brève (de 1928 à 1934).

Ce type de récepteur a été rapidement supplanté par le "superhétérodyne" ou récepteur à changement de fréquence.

Le récepteur AM à amplification directe à lampes comprend :

- un **ampli RF** à 2 étages
- 3 **filtres** passe-bande
- un **détecteur crête**
- un **amplificateur basse fréquence** à 2 étages



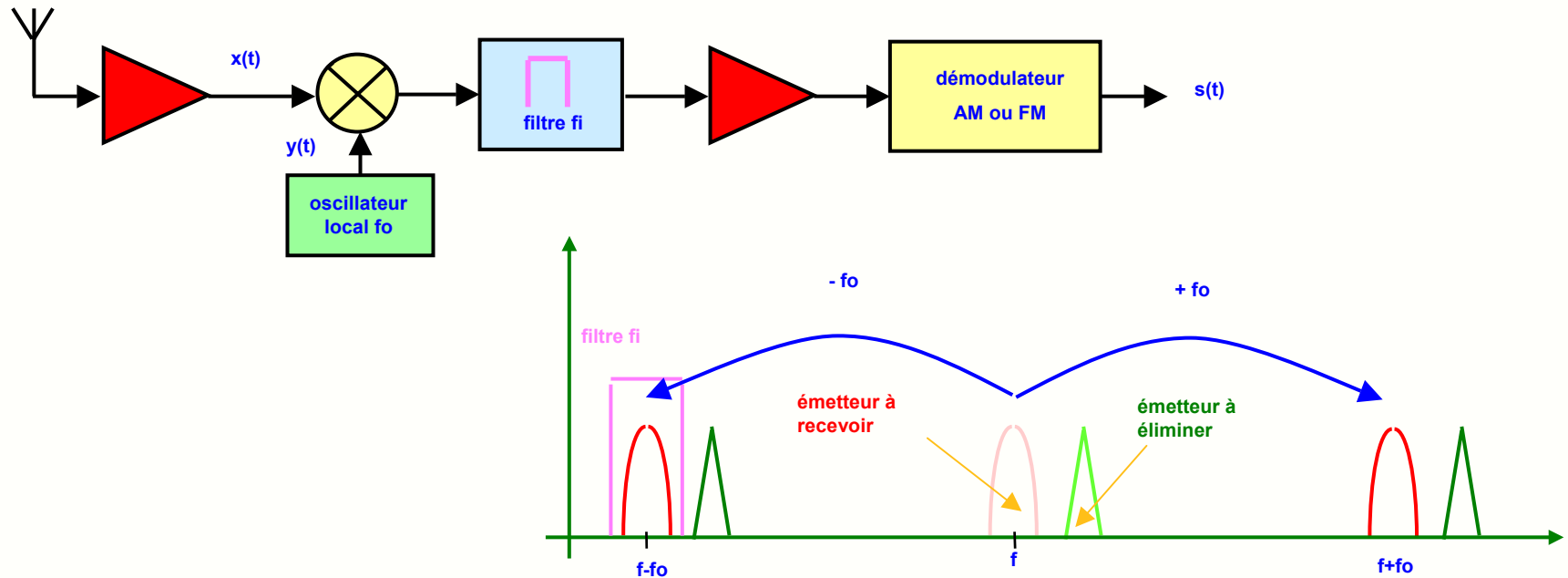
- les condensateurs d'accord sont couplés sur le même axe
- le nombre de circuits accordés variait de deux (le plus souvent) à quatre sur les récepteurs de grande qualité
- le défaut de cette structure est **l'impossibilité à maintenir la largeur des filtres sélectifs constante** sur toute la bande



10- Le récepteur à changement de fréquence



La structure à changement de fréquence est la solution adoptée dans la grande majorité des récepteurs actuels :



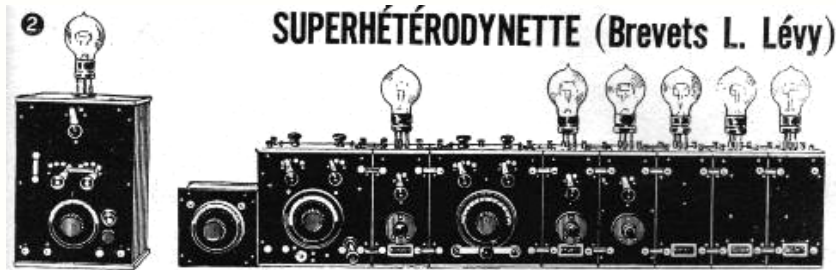
- le mélangeur reçoit les signaux provenant de l'antenne et les **multiplie** par le signal sinusoïdal $y(t)$ de l'oscillateur local
- à chaque émetteur capté à la fréquence f correspond en sortie du mélangeur le même signal aux fréquences $f - f_0$ et $f + f_0$
- en sortie du mélangeur le spectre est assez riche puisque chaque émetteur a été **dédoublé**
- un seul de ces signaux à la fréquence $f - f_0 = f_i$ tombera dans la bande passante du filtre f_i et sera donc démodulé
- la fréquence f_i du filtre est fixe, et on sélectionne l'émetteur désiré en réglant la valeur de f_0
- sauf pour la réception de fréquences très basses (GO par exemple), la fréquence f_i est inférieure à f

11- Les premiers récepteurs superhétérodynes



Les premiers récepteurs à changement de fréquence ont été mis à la portée du grand public en 1920 sous l'appellation "superhétérodyne", mot qui n'est plus guère utilisé de nos jours.

Le principe de ce type de récepteurs avait été mis au point en 1918 dans différents pays, et en particulier par l'américain [Edwin H. Armstrong](#) et le français [L. Lévy](#).



Sélectivité
et
Sensibilité
incomparables

Cet appareil est le seul permettant de recevoir, dans toute la France, les postes anglais sur cadre de un mètre, en haut-parleur, en éliminant totalement toutes les émissions locales et toute perturbation parasite quelconque. Sur antenne, sa portée est illimitée.

Seuls inventeurs et constructeurs du
SUPERHÉTÉRODYNETTE

HORS CONCOURS - MEMBRE DU JURY
A L'EXPOSITION-CONCOURS DE T. S. F. 1924

Dans ces récepteurs, le problème de la recherche d'une station et celui de la sélectivité se trouvent séparés :

- le premier étage "mélangeur" permet de choisir la station désirée
- le second étage "amplificateur moyenne fréquence" assure l'amplification et la sélectivité

Les premiers récepteurs superhétérodyne étaient sensibles et avaient une bonne sélectivité. Mais ils nécessitaient beaucoup de réglages et le son était affecté de sifflements et de distorsions.



Récepteur DUCRETET RM7 - 1926 –

Cet appareil ne compte pas moins de 13 boutons en façade et des bobines à changer à l'intérieur pour les diverses gammes d'ondes.



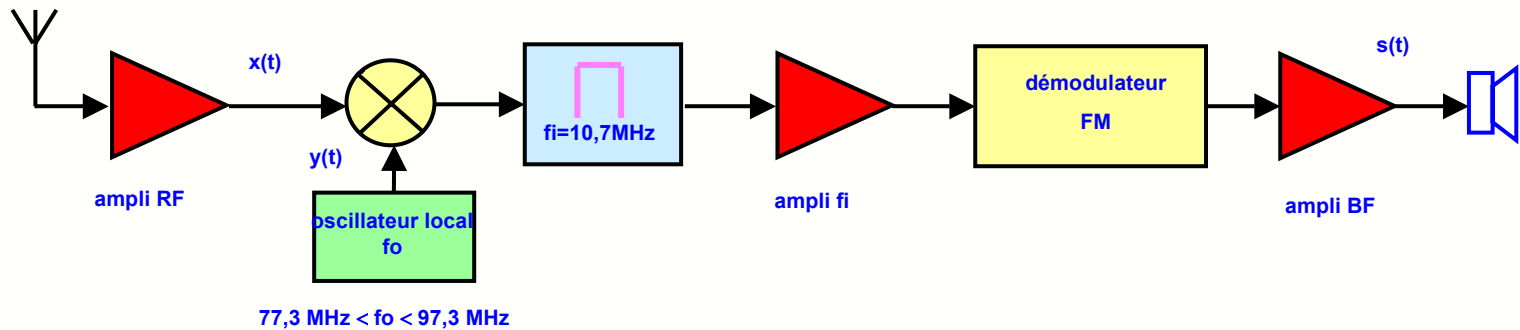
12- Structure d'un récepteur FM



Un récepteur radio à changement de fréquence pour la radiodiffusion FM a les caractéristiques suivantes :

- il est construit pour recevoir la bande de fréquences allant de 88 à 108 MHz
- dans la bande FM, chaque émetteur occupe une bande de fréquence de largeur $B = 250$ kHz environ
- la valeur standard du filtre f_i est de $f_i = 10,7$ MHz et sa largeur est de 300 kHz
- la plage couverte par l'oscillateur local va de $f_o = 77,3$ à $97,3$ MHz

signal à recevoir
 $88 \text{ MHz} < f < 108 \text{ MHz}$



Si on veut capter l'émetteur de France-Inter Mulhouse à $f = 95,7$ MHz :

- l'oscillateur local sera réglé à $f_o = 85$ MHz
- en sortie du mélangeur, l'émission de France-Inter se retrouvera à $f + f_o = 180,7$ MHz et à $f - f_o = 10,7$ MHz
- le signal à 10,7 MHz traversera le filtre f_i , et sera amplifié puis démodulé

Pour recevoir une émission à la fréquence f , il faut régler l'oscillateur local à la fréquence f_o telle que :

$$f - f_o = f_i \text{ ou } f_o - f = f_i$$

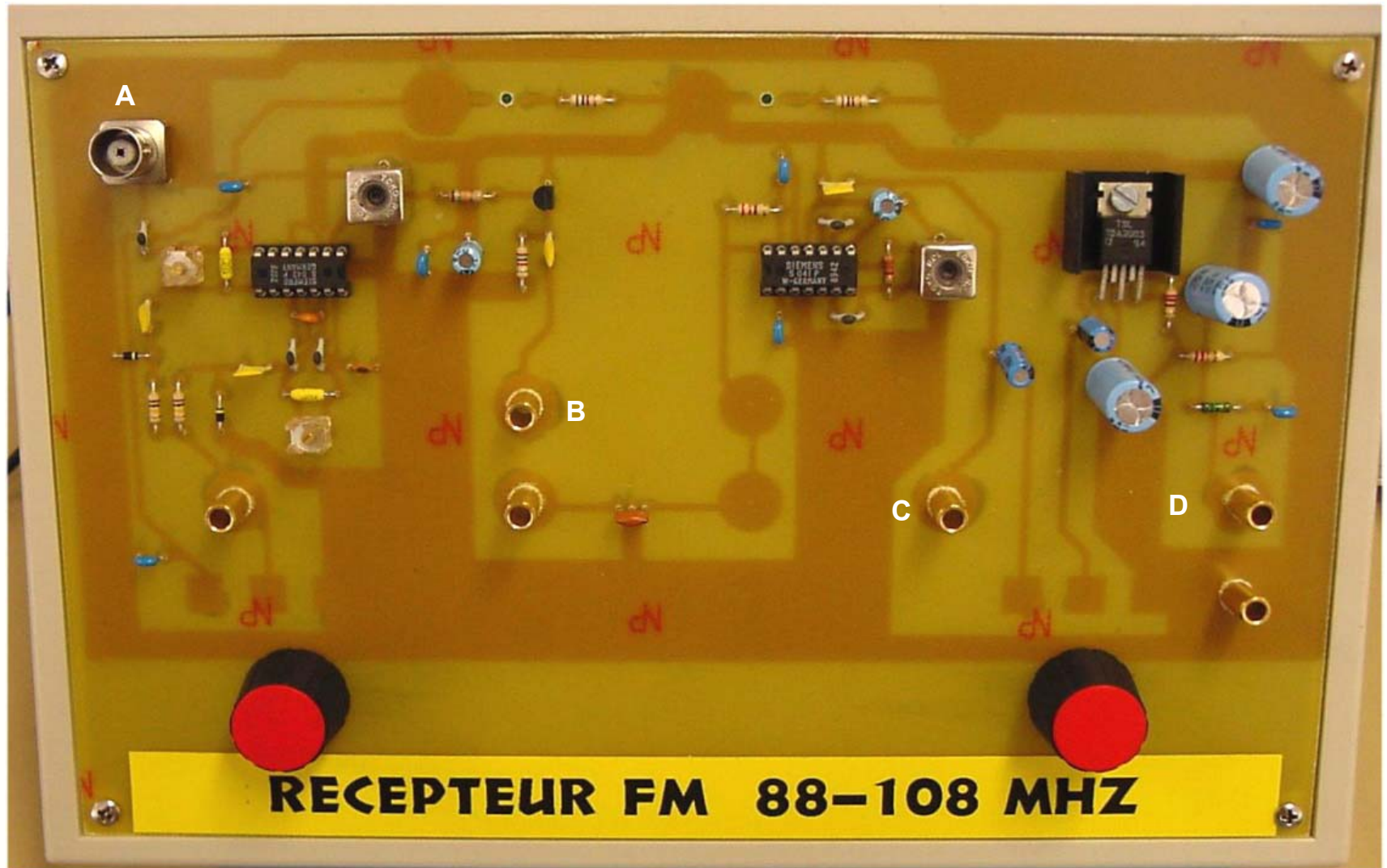
soit

$$f - f_o = \pm f_i$$

Remarque : on peut toujours choisir de placer l'oscillateur local au-dessus ou en-dessous de la fréquence à recevoir



13- Exemple de récepteur FM didactique

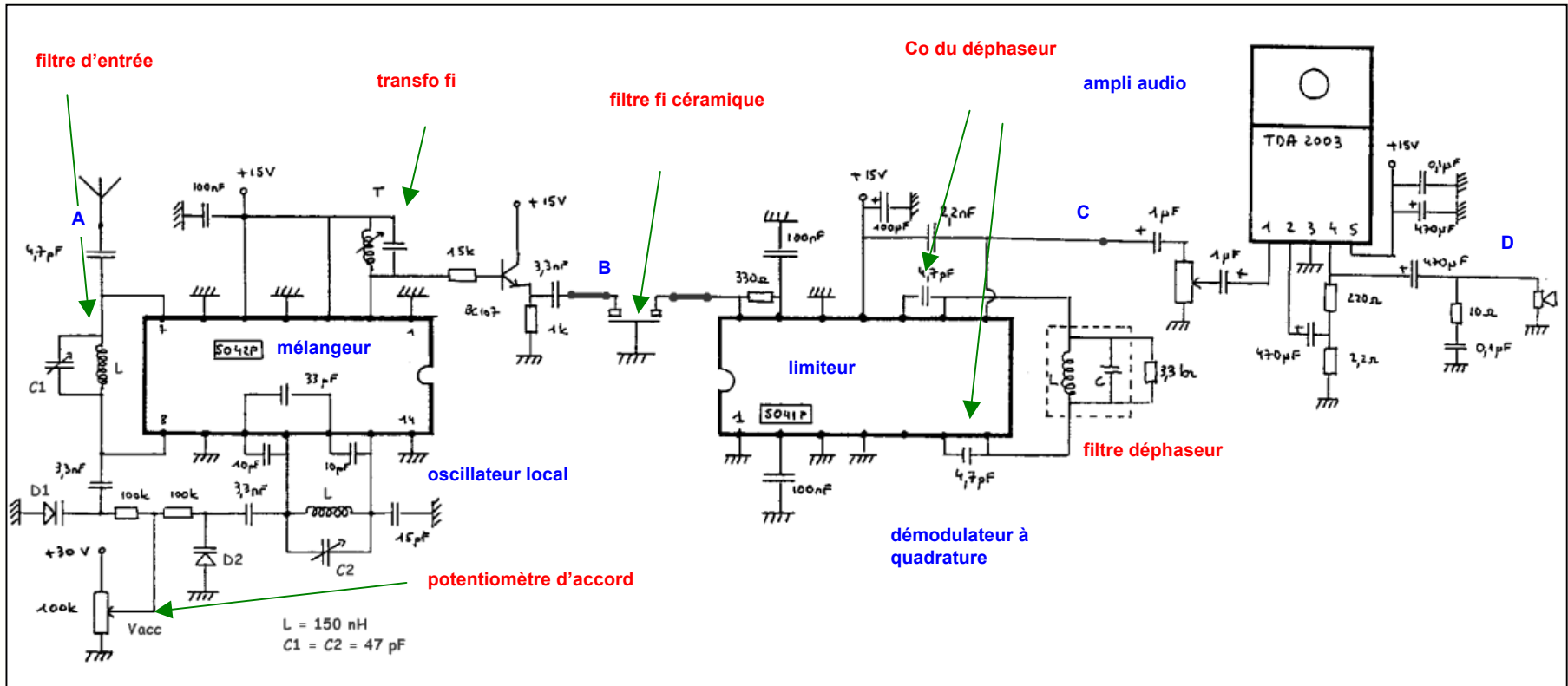
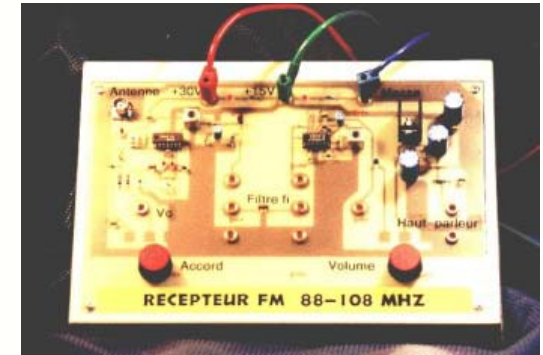




14- Schéma du récepteur FM didactique

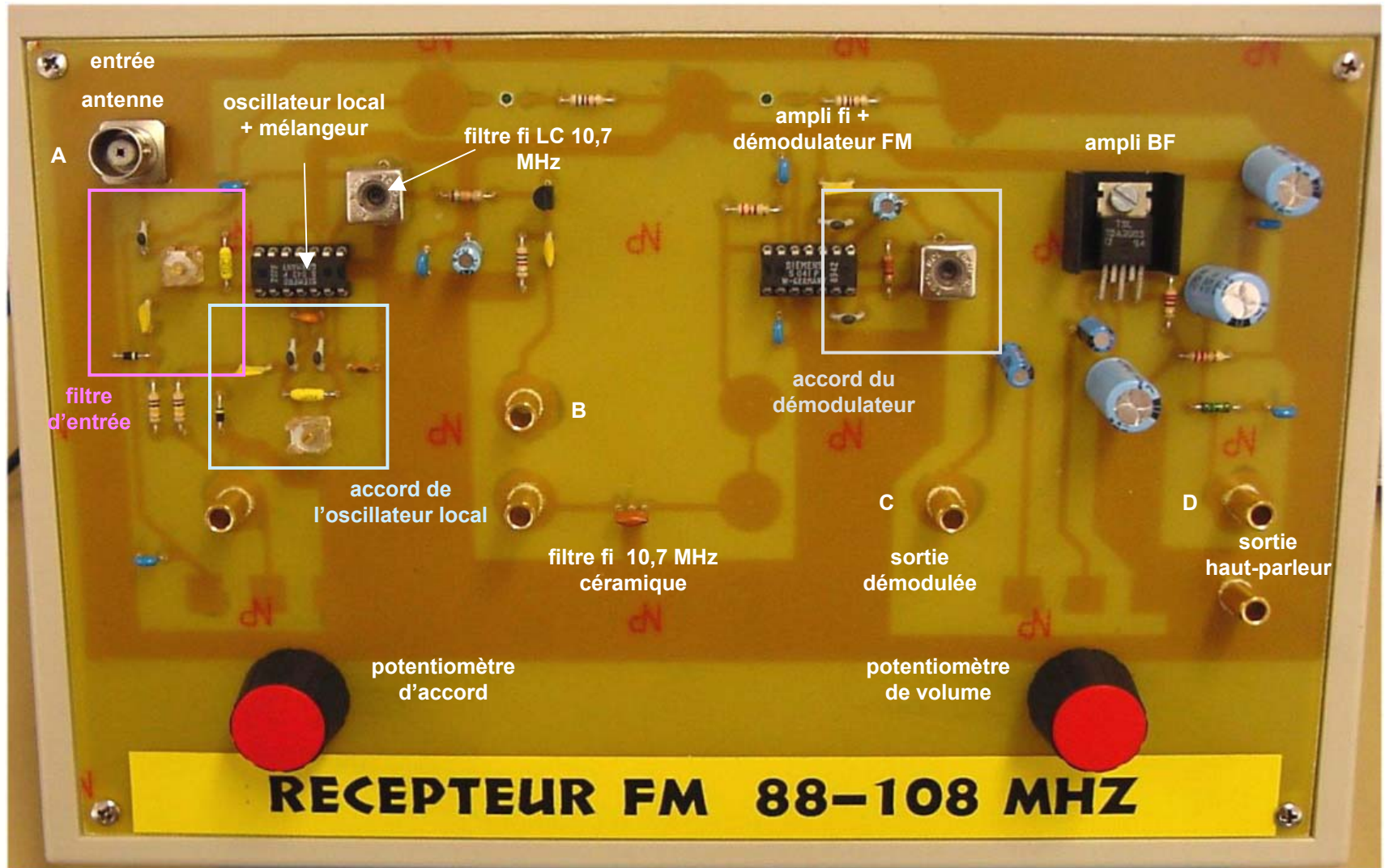


- le signal f_1 reçu par l'antenne est sélectionné par un premier circuit accordé par L, C1 et la varicap D1 commandée par la tension V_{acc}
- ce signal est ensuite mélangé par le SO42P au signal de l'oscillateur local accordé sur f_0 grâce à L, C2 et D2 par la même tension V_{acc}
- en sortie du mélangeur apparaissent les fréquences $f_1 + f_0$ et $f_1 - f_0$
- si f_0 est bien choisie, le signal différence tombe à $f_i = 10,7$ MHz et est filtré par le transformateur T accordé sur 10,7 MHz, puis par le filtre céramique
- l'ampli f_i du SO41P fonctionne en limiteur, et le démodulateur à quadrature restitue le signal BF qui sera amplifié par le TDA2003 et envoyé sur le haut-parleur





15- Implantation du récepteur FM



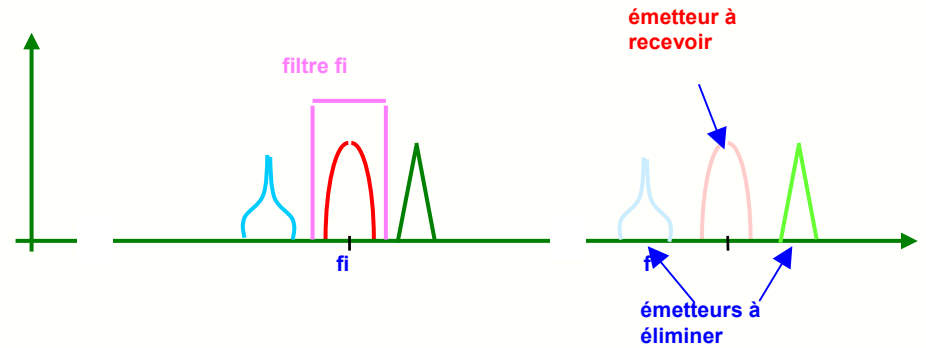


16- Le filtre de fréquence intermédiaire

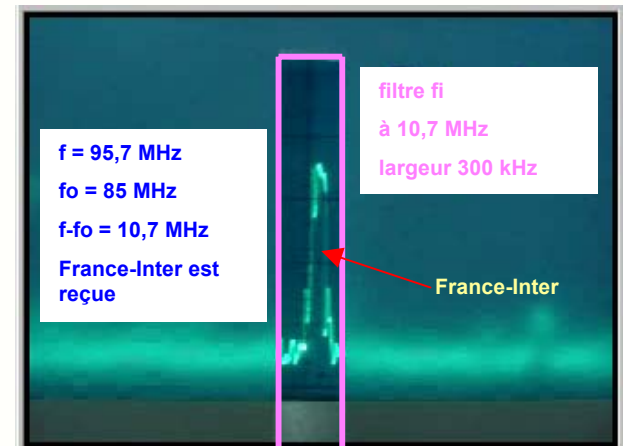
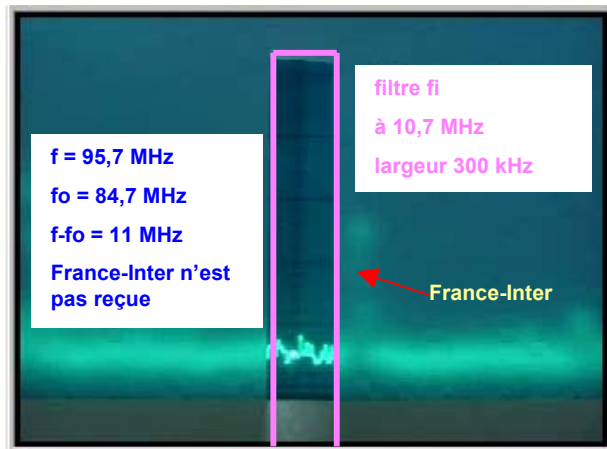


Le filtre f_i qui sélectionne l'émission désirée et élimine les autres émetteurs assure la sélectivité du récepteur :

- sa **fréquence centrale** est fixe et souvent standardisée
- sa **largeur** est égale à la bande occupée par un émetteur
- sa **courbe de réponse** est plate dans la bande passante
- son **atténuation hors-bande** est la plus élevée possible
- en radiodiffusion **AM**, la valeur standard est $f_i = 455 \text{ kHz}$
- en radiodiffusion **FM**, la valeur standard est $f_i = 10,7 \text{ MHz}$



La variation de la fréquence f_0 de l'oscillateur local permet de déplacer les émetteurs devant le filtre f_i fixe et de sélectionner ainsi l'émetteur désiré :



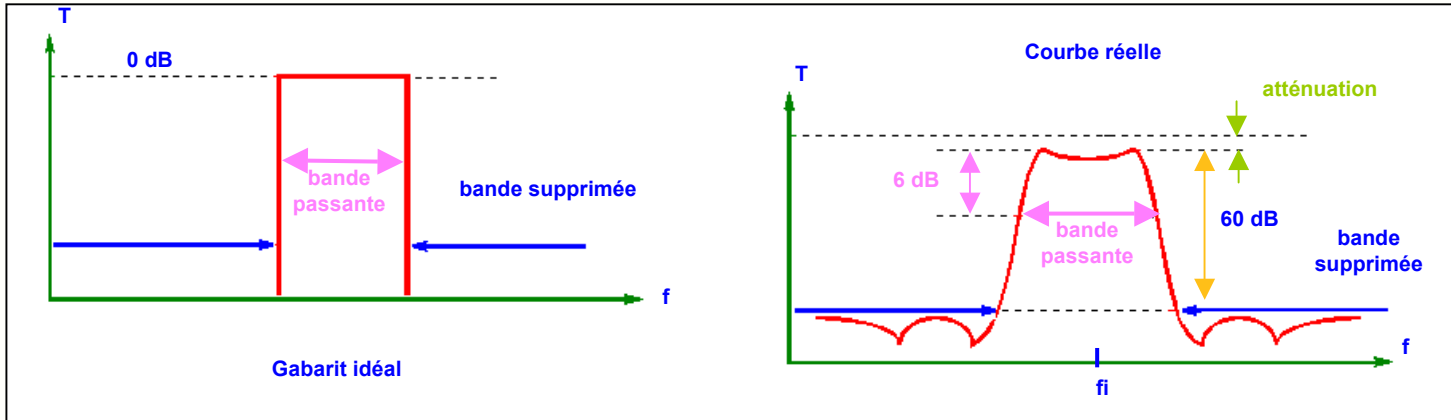
[Vidéo](#) : déplacement du spectre en sortie du mélangeur si f_0 varie



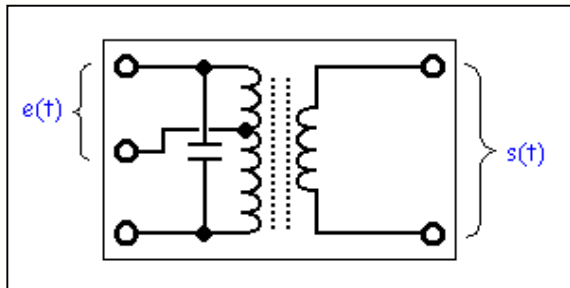
17- La technologie des filtres fi



Différents types de filtres fi sont disponibles, permettant d'obtenir une courbe de réponse proche du gabarit idéal :

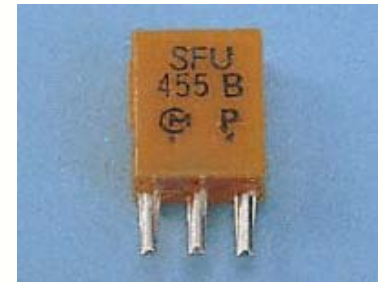


Selon l'application et la fréquence de travail, on utilise principalement :



- le **transformateur fi** qui est un filtre LC accordable pour les mêmes applications que les filtres céramique

- le **filtre fi céramique** utilisé en AM ($f_i = 455 \text{ kHz}$, $B = 10 \text{ kHz}$) et FM ($f_i = 10,7 \text{ MHz}$, $B = 300 \text{ kHz}$)



- le **filtre à onde de surface**, pour les fréquences supérieures à 50 MHz (TV, GSM ...)

Remarque : l'utilisation des **filtres fi numériques** après digitalisation du signal en sortie du mélangeur se développe rapidement

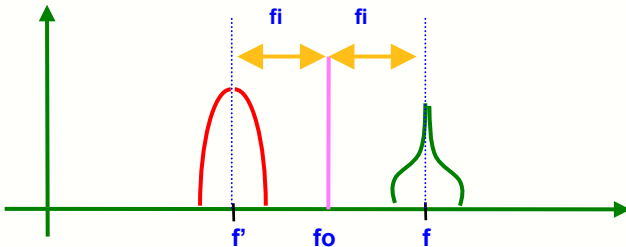
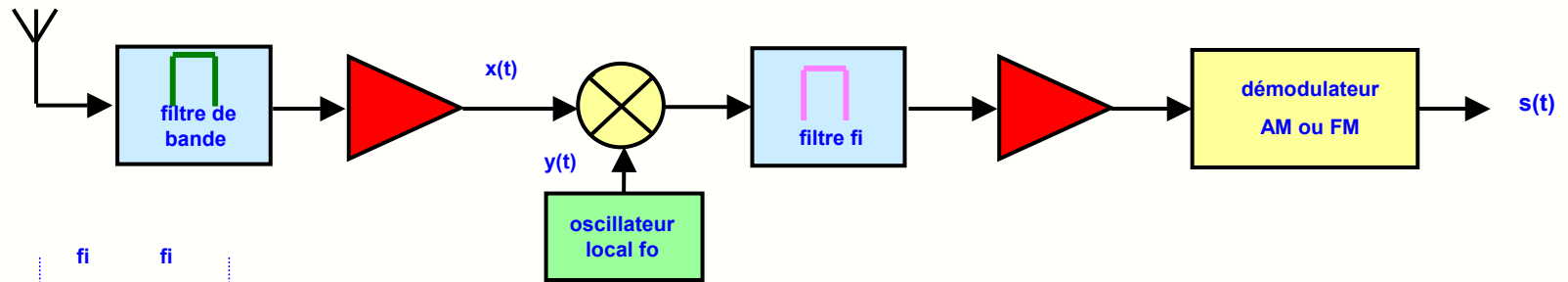


18- Le problème de la fréquence image



Cette structure quasi idéale a un défaut puisque 2 émetteurs seront reçus pour une valeur donnée de l'oscillateur local f_0 :

- pour recevoir l'émetteur de France-Inter à $f = 95,7$ MHz, on règle $f_0 = 85$ MHz
- la fréquence $f' = f_0 - f_i = 74,3$ MHz mélangée à 85 MHz tombera aussi à 10,7 MHz
- s'il y a un émetteur qui émet à cette fréquence f' , il sera reçu et se superposera à France-Inter
- cette deuxième fréquence f' est appelée **fréquence image de f**
- l'émetteur image peut être supprimé par un **filtre de bande** qui sélectionne la bande à recevoir et supprime la bande image



$$f - f_0 = f_i \text{ soit } f = f_0 + f_i \quad f_0 - f' = f_i \text{ soit } f' = f_0 - f_i$$

- un émetteur et son image sont symétriques par rapport à f_0
- un émetteur est séparé de son image par un intervalle égal à $2f_i$

La suppression de l'image est d'autant plus facile qu'il est éloigné de l'émetteur à recevoir, d'où l'intérêt de choisir une f_i élevée :

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

Ce filtre d'entrée peut être fixe (CB, GSM) ou variable et commandé parallèlement avec l'oscillateur local (FM, TV ...).



19- Changement de fréquence dans le récepteur FM



20- La fréquence image dans le récepteur FM



signal d'entrée à $f = 73,9$ MHz
(fréquence image de 95 MHz)

• le signal à f a aussi été transposé à $f_i = 10,7$ MHz
• il est plus faible qu'avec $f = 95$ MHz
• l'atténuation a été apportée par le filtre d'entrée

• signal à $f_i = 10,7$ MHz
• amplitude 0,05V

A
filtre d'entrée

B sortie du mélangeur

oscillateur local réglé à 84,3 MHz
(récepteur accordé sur 95 MHz)

RECEPTEUR FM 88-108 MHz

Valeurs théoriques :

- signal à recevoir $f = 95$ MHz
- $f_i = 10,7$ MHz
- oscillateur local $f_o = f - f_i = 84,3$ MHz
- fréquence image $f' = f_o - f_i = 73,6$ MHz

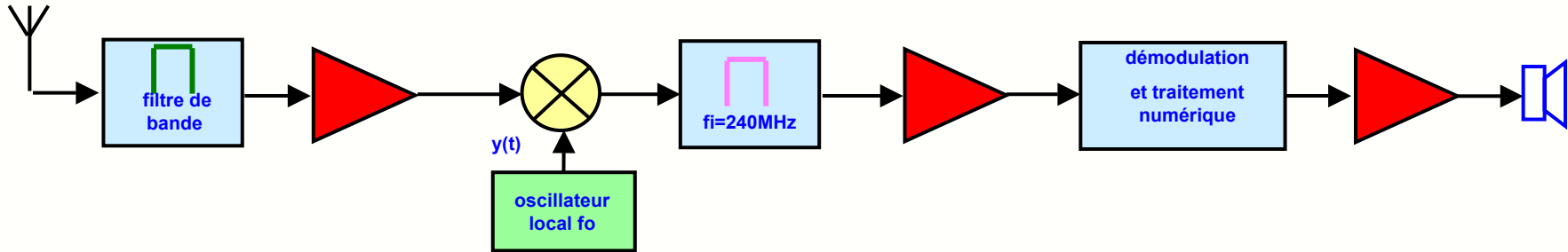
21 - Application : étage de réception d'un GSM



L'étage de réception d'un téléphone GSM doit répondre aux spécifications suivantes :

- il doit recevoir la bande de fréquences allant de $f = 935$ à 960 MHz
- cette bande est divisée en canaux de largeur $B = 200$ kHz
- la bande occupée par la porteuse modulée est de 300 kHz
- la valeur standard du filtre f_i est de $f_i = 240$ MHz
- l'oscillateur local est placé **au-dessus** de la fréquence à recevoir

fréquence à recevoir f
fréquence image f'



Définition des grandeurs :

- largeur du filtre f_i ?
- gamme couverte par l'oscillateur local ?
- bande image de la bande GSM ?
- filtre de bande ?

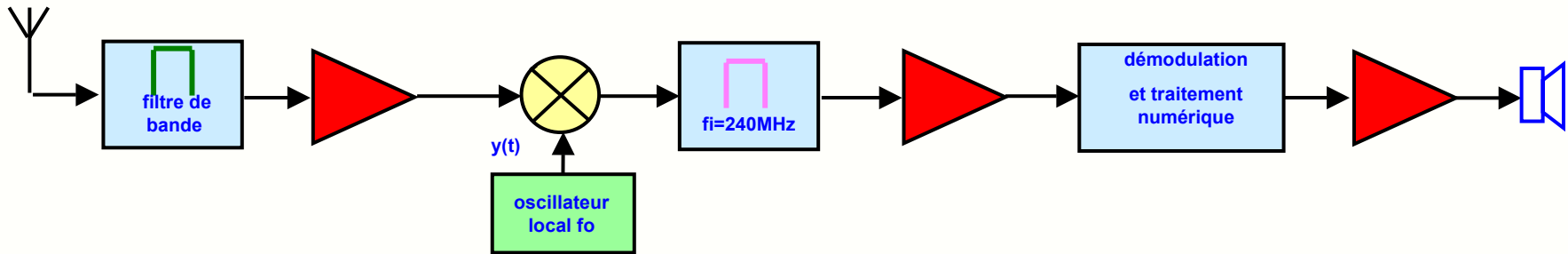
22- Application : étage de réception d'un GSM



L'étage de réception d'un téléphone GSM doit répondre aux spécifications suivantes :

- il doit recevoir la bande de fréquences allant de $f = 935$ à 960 MHz
- cette bande est divisée en canaux de largeur $B = 200$ kHz
- la bande occupée par la porteuse modulée est de 300 kHz
- la valeur standard du filtre f_i est de $f_i = 240$ MHz
- l'oscillateur local est placé **au-dessus** de la fréquence à recevoir

fréquence à recevoir f
fréquence image f'



Définition des grandeurs :

- largeur du filtre f_i : elle doit être de $B = 300$ kHz
- oscillateur local
- bande image
- filtre de bande

- la largeur du filtre f_i est toujours égale à la bande occupée par la porteuse modulée
- cette largeur est pour le GSM supérieure à la largeur du canal, ce qui veut simplement dire qu'une émission GSM déborde de son canal

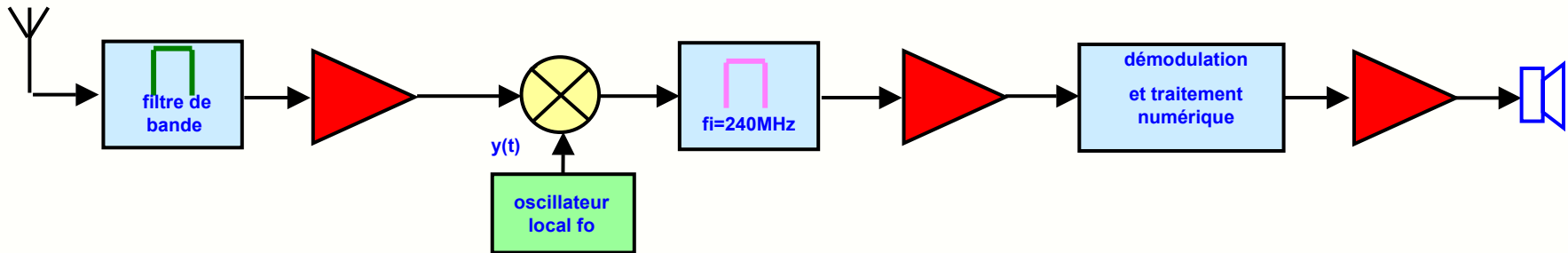
23- Application : étage de réception d'un GSM



L'étage de réception d'un téléphone GSM doit répondre aux spécifications suivantes :

- il doit recevoir la bande de fréquences allant de $f = 935$ à 960 MHz
- cette bande est divisée en canaux de largeur $B = 200$ kHz
- la bande occupée par la porteuse modulée est de 300 kHz
- la valeur standard du filtre f_i est de $f_i = 240$ MHz
- l'oscillateur local est placé **au-dessus** de la fréquence à recevoir

fréquence à recevoir f
fréquence image f'



Définition des grandeurs :

- largeur du filtre f_i : elle doit être de $B = 300$ kHz
- oscillateur local : la fréquence f_o varie de 1175 MHz à 1200 MHz
- bande image
- filtre de bande

- l'oscillateur local est ici au-dessus de f
- la fréquence différence doit être égale à 240 MHz
- pour recevoir le 935 MHz, on règlera donc $f_o = 1175$ MHz
- pour recevoir le 960 MHz, on règlera donc $f_o = 1200$ MHz
- l'oscillateur local doit varier par pas de 200 kHz

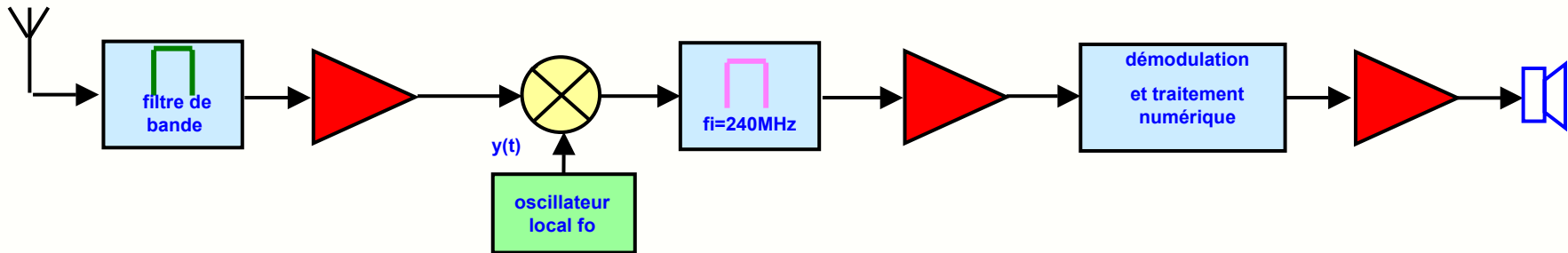
24- Application : étage de réception d'un GSM



L'étage de réception d'un téléphone GSM doit répondre aux spécifications suivantes :

- il doit recevoir la bande de fréquences allant de $f = 935$ à 960 MHz
- cette bande est divisée en canaux de largeur $B = 200$ kHz
- la bande occupée par la porteuse modulée est de 300 kHz
- la valeur standard du filtre f_i est de $f_i = 240$ MHz
- l'oscillateur local est placé **au-dessus** de la fréquence à recevoir

fréquence à recevoir f
fréquence image f'



Définition des grandeurs :

- largeur du filtre f_i : elle doit être de $B = 300$ kHz
- oscillateur local : la fréquence f_o varie de 1175 MHz à 1200 MHz
- bande image : elle s'étend de 1415 MHz à 1440 MHz
- filtre de bande

- l'oscillateur local est à 240 MHz au-dessus de f
- l'émetteur image f' est symétrique de f par rapport à f_o
- l'image de f est donc à $f' = f + 2f_i$
- l'image du 935 MHz est donc à $f' = 1415$ MHz
- l'image du 960 MHz est donc à $f' = 1440$ MHz

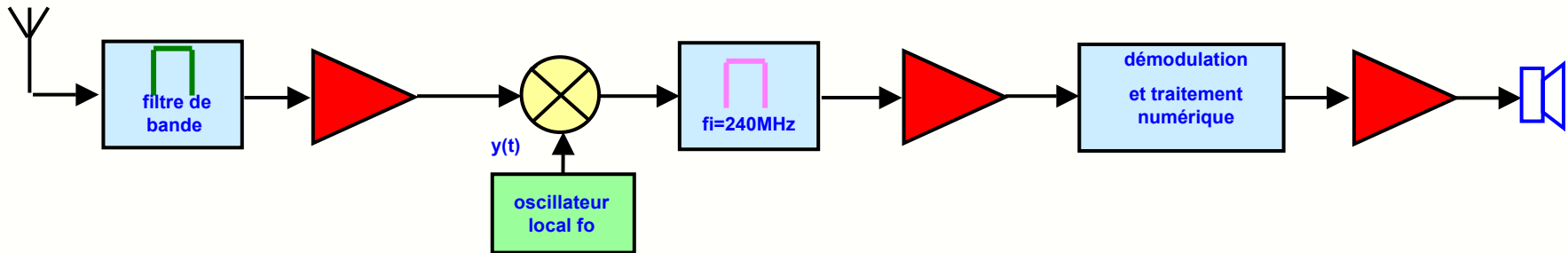
25- Application : étage de réception d'un GSM



L'étage de réception d'un téléphone GSM doit répondre aux spécifications suivantes :

- il doit recevoir la bande de fréquences allant de $f = 935$ à 960 MHz
- cette bande est divisée en canaux de largeur $B = 200$ kHz
- la bande occupée par la porteuse modulée est de 300 kHz
- la valeur standard du filtre f_i est de $f_i = 240$ MHz
- l'oscillateur local est placé **au-dessus** de la fréquence à recevoir

fréquence à recevoir f
fréquence image f'



Définition des grandeurs :

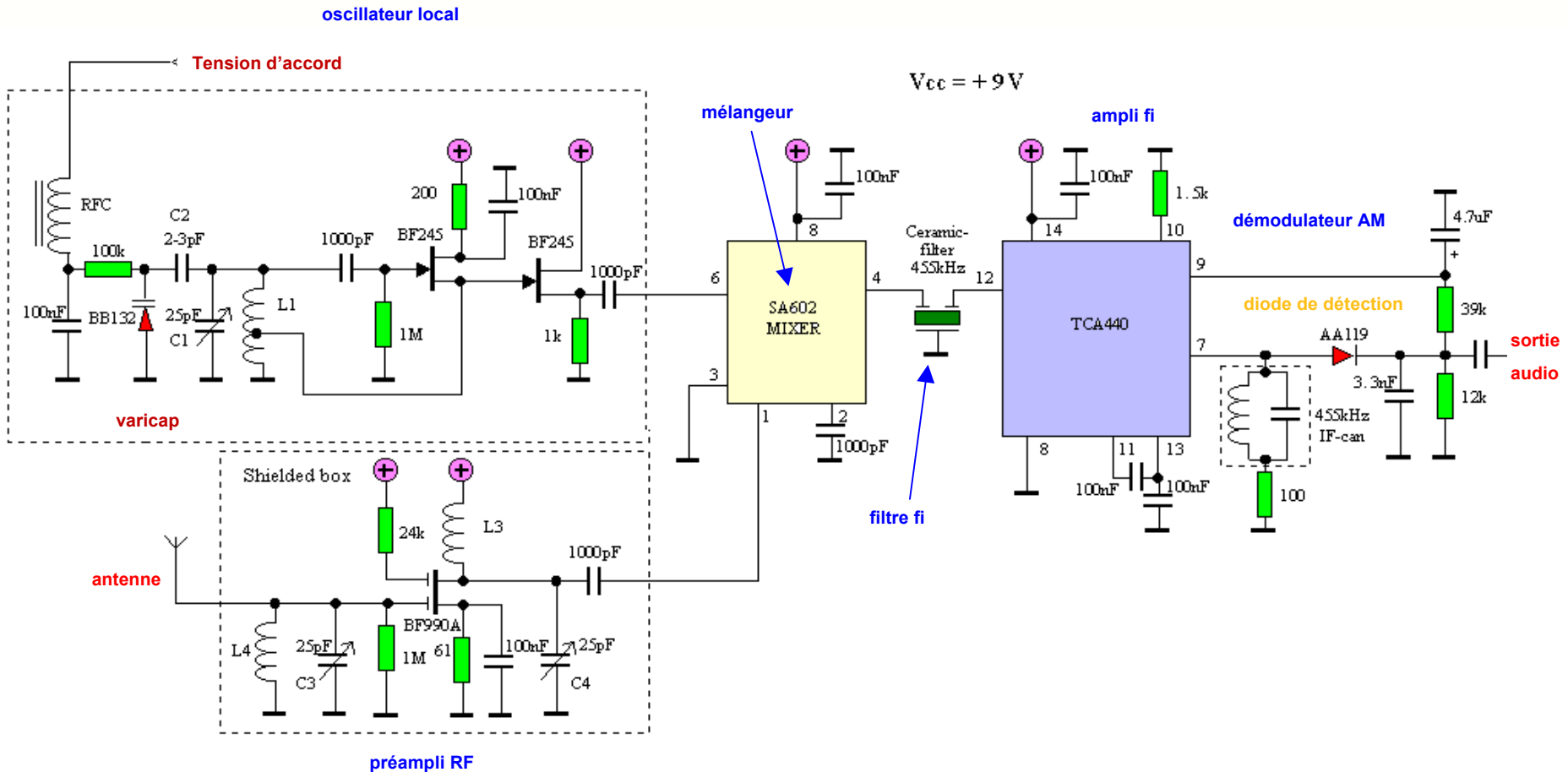
- largeur du filtre f_i : elle doit être de $B = 300$ kHz
- oscillateur local : la fréquence f_o varie de 1175 MHz à 1200 MHz
- bande image : elle s'étend de 1415 MHz à 1440 MHz
- filtre de bande : sa bande passante va de 935 à 960 MHz

- ce filtre doit laisser passer les fréquences à recevoir
- il doit supprimer les fréquences images
- il doit supprimer les émissions qui risqueraient de saturer l'étage d'entrée du récepteur (autres GSM en émission, signaux TV ...)

26- Récepteur AM pour la bande « aviation »

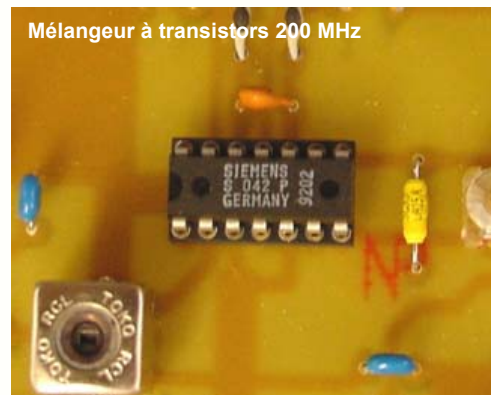
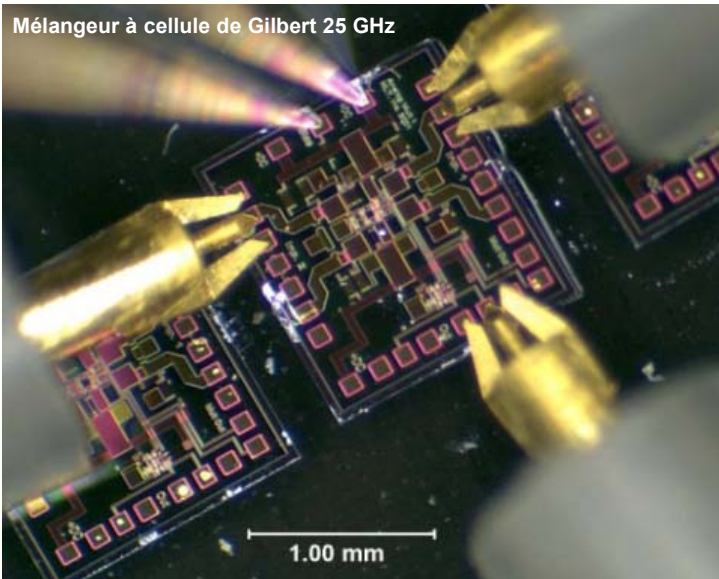


- gamme de fréquence de 100 à 130 MHz par C1
- accord fin par la « tension d'accord » sur une plage de 100 kHz environ
- oscillateur local de type Hartley
- démodulation AM par détecteur crête





Les mélangeurs





Le mélange

- 1- La fonction de "mélange"
- 2- Le mélange de deux sinusoïdes
- 3- Multiplication d'un signal modulé par une sinusoïde
- 4- Spectre en sortie du mélangeur
- 5- La fonction "changement de fréquence"
- 6- Le changement de fréquence dans les émetteurs
- 7- La réception d'un signal radio
- 8- Le récepteur à amplification directe
- 9- Exemple de récepteur à amplification directe
- 10- Le récepteur à changement de fréquence
- 11- Les premiers récepteurs superhétérodynes
- 12- Structure d'un récepteur FM
- 13- Exemple de récepteur FM (1)
- 14- Exemple de récepteur FM (2)
- 15- Le filtre de fréquence intermédiaire
- 16- La technologie des filtres fi
- 17- Le problème de la fréquence image
- 18- Changement de fréquence dans le récepteur FM
- 19- La fréquence image dans le récepteur FM
- 20 à 25- Application : étage de réception d'un GSM
- 26- Récepteur pour la bande "aviation"



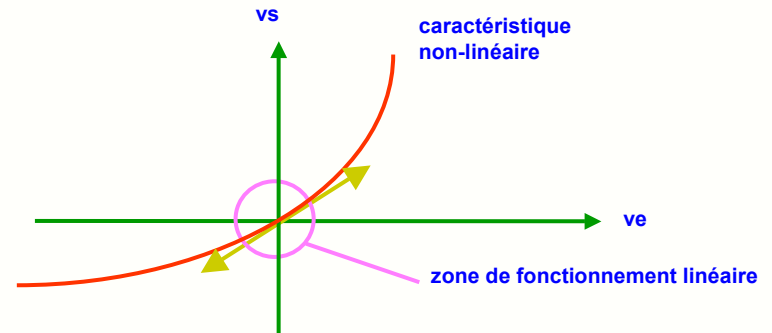
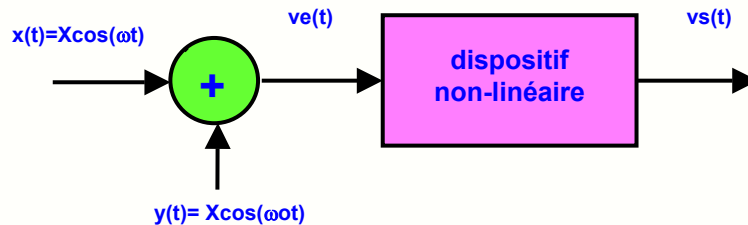
Les mélangeurs

- 27- Le principe du mélange par non-linéarité
- 28- Les dispositifs mélangeurs
- 29- Influence du niveau d'injection
- 30- Principe du mélangeur à cellule de Gilbert
- 31- Exemple de cellule de Gilbert : le NE602/612
- 32- Exemple d'utilisation du NE602
- 33- La cellule de Gilbert en auto-oscillation
- 34- Principe du mélangeur à diode
- 35- Exemple d'utilisation d'une diode mélangeuse
- 36- La diode mélangeuse dans le radar Doppler
- 37- Exemple de réalisation d'un mélangeur à 2 diodes
- 38- Exemple d'utilisation de 2 diodes mélangeuses
- 39- Structure du mélangeur Schottky
- 40- Exemple de mélangeur Schottky
- 41- Exemple d'utilisation de mélangeur Schottky

27- Le principe du mélange par non-linéarité



D'une façon générale, le mélange de deux signaux peut être obtenu en les envoyant sur un dispositif non-linéaire comme une diode, un transistor à jonction ou à effet de champ, ou autre fois une lampe radio.



▪ si l'amplitude de $v_e(t)$ est faible, le système peut être considéré comme linéaire :

$$v_s(t) = A \cdot v_e(t)$$

▪ si l'amplitude est plus forte, la caractéristique doit être modélisée par un polynôme :

$$v_s(t) = A \cdot v_e(t) + B \cdot v_e(t)^2 + C \cdot v_e(t)^3 + \dots$$

Si on applique à l'entrée de ce quadripôle la somme de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$, le signal de sortie aura l'expression suivante :

$$v_s(t) = A \cdot (x(t) + y(t)) + B \cdot (x(t) + y(t))^2 + C \cdot (x(t) + y(t))^3 + \dots$$

$$v_s(t) = A \cdot x(t) + A \cdot y(t) + B \cdot x(t)^2 + 2 \cdot B \cdot x(t) \cdot y(t) + B \cdot y(t)^2 + C \cdot x(t)^3 + 3 \cdot C \cdot x(t)^2 \cdot y(t) + \dots M \cdot x(t)^m \cdot y(t)^n + \dots$$

Dans ce développement apparaît le terme $2 \cdot B \cdot x(t) \cdot y(t)$ traduisant l'opération de multiplication.

Conclusion : si on applique deux signaux sinusoïdaux à l'entrée d'un dispositif non-linéaire, on obtient en sortie un signal dont la composition spectrale est très riche et contient entre autres la fréquence somme et la fréquence différence.



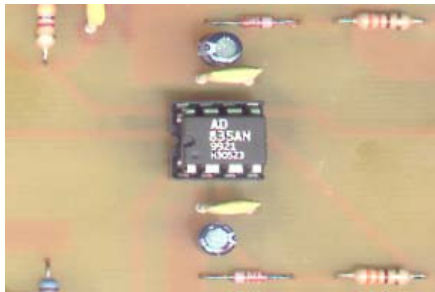
28- Les dispositifs mélangeurs



Pour réaliser la fonction de mélange, on dispose d'un grand choix de composants parmi lesquels il faut effectuer son choix en fonction de la fréquence de travail, des performances souhaitées et du coût :

Mélangeurs utilisant la non-linéarité du transistor :

- le **multiplieur analogique** , qui permet de multiplier deux signaux de forme quelconque, mais est coûteux et limité en fréquence
- le mélangeur à **1 transistor** qui n'est plus guère utilisé car remplacé par la cellule de Gilbert plus performante
- le mélangeur à **cellule de Gilbert** , le plus utilisé actuellement jusqu'à 2 GHz, qui allie bon fonctionnement, prix de revient réduit et facilité d'intégration. Il équipe les **récepteurs radio FM** (88 à 108 MHz), les **récepteurs de télévision** (400 à 800 MHz), les **téléphones GSM** (900 MHz) et **DCS** (1800 MHz), dans les réseaux locaux sans fil de type **Ethernet** ou **Bluetooth** (2,45 GHz) etc ...



Multiplieur analogique AD835



Mélangeur de Gilbert NE612



Diode Schottky 10- 20 GHz



Mélangeur Schottky

Mélangeurs utilisant la non-linéarité de la diode :

- le mélangeur à **1 ou 2 diodes**, très utilisé dans les dispositifs grands publics fonctionnant aux fréquences supérieures à quelques GHz comme les têtes de réception pour satellites
- le mélangeur **Schottky à 4 diodes** qui prend la relève de la cellule de Gilbert aux fréquences supérieures à quelques GHz avec des performances supérieures au mélangeur à diode



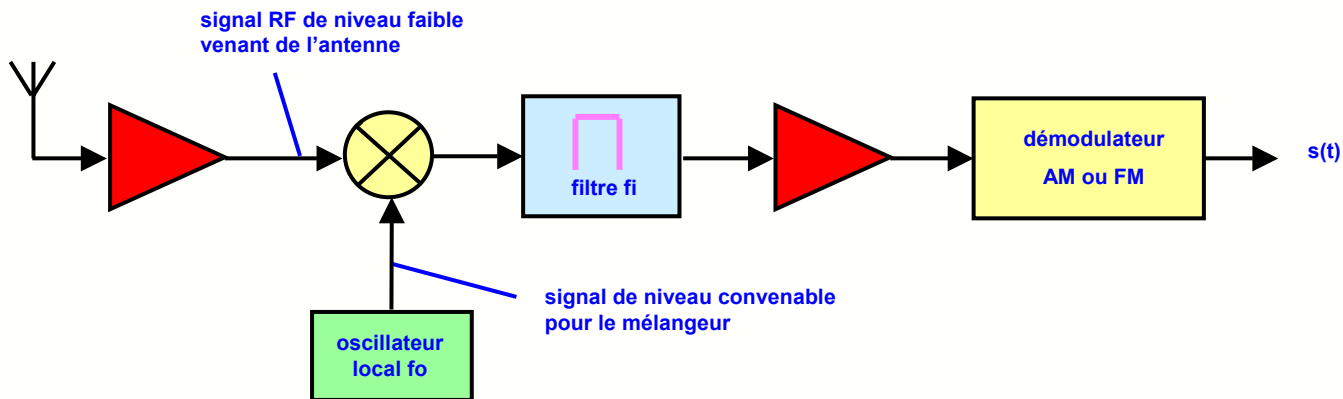
29- Influence du niveau d'injection



La composition spectrale en sortie du dispositif non-linéaire dépend du niveau des signaux injectés :

- **niveau d'injection faible** : le fonctionnement est linéaire et la sortie contient les fréquences f et f_0
- **niveau d'injection moyen** : la sortie contient f et ses multiples, f_0 et ses multiples ainsi que $f-f_0$ et $f+f_0$
- **niveau d'injection élevé** : la sortie est formée d'une quantité de composantes à $mf \pm n f_0$ avec m et n entiers

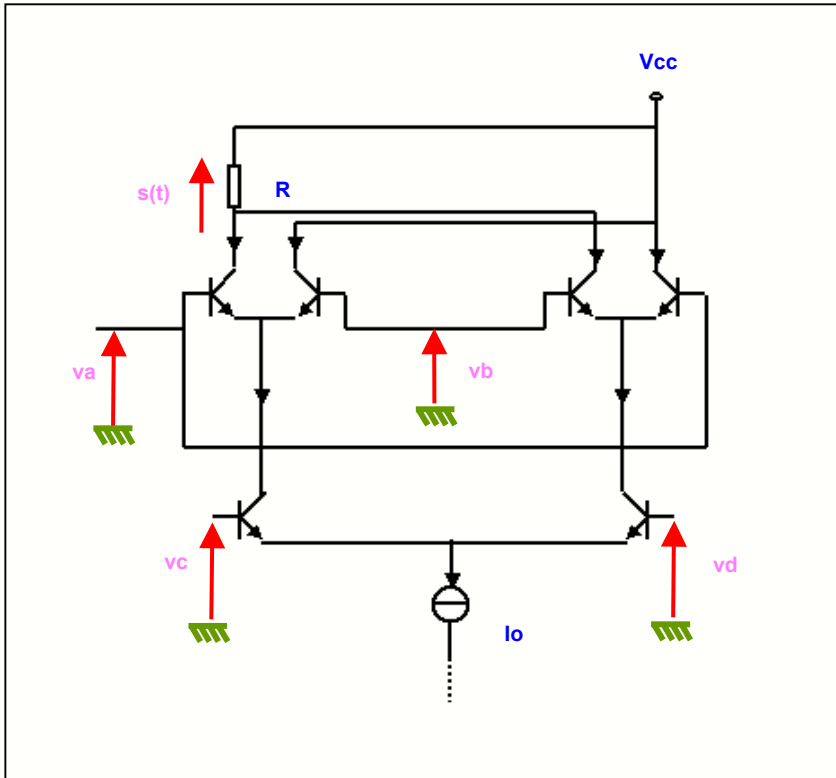
Il y a donc un **niveau optimal pour attaquer un mélangeur** qui est toujours précisé par le fabricant du composant.



C'est le niveau du signal issu de l'oscillateur local qui déterminera le bon fonctionnement du mélangeur :

- le signal RF provenant de l'antenne a un niveau inconnu et variable en fonction de la puissance de l'émetteur et de la distance
- le signal de l'oscillateur est produit dans le récepteur et son niveau peut-être réglé facilement

30- Principe du mélangeur à cellule de Gilbert



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

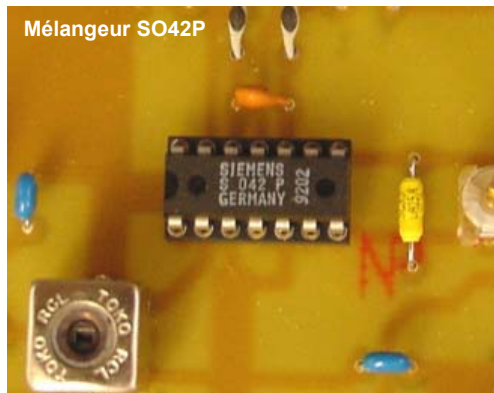
Si on pose $x = va - vb$ et $y = vd - vc$

la tension de sortie $s(t)$ de la cellule est composée :

- d'une composante continue
- d'un terme de **produit** à entrée différentielle

$$s(t) = A + B.x.y = A + B.(va - vb).(vd - vc)$$

Depuis le **LM1496**, ancêtre des mélangeurs à cellule de Gilbert, de nombreuses versions plus performantes ont été mises sur le marché comme le **SO42P** de Siemens, aujourd'hui obsolète, et les très connus **NE602 -NE612**.



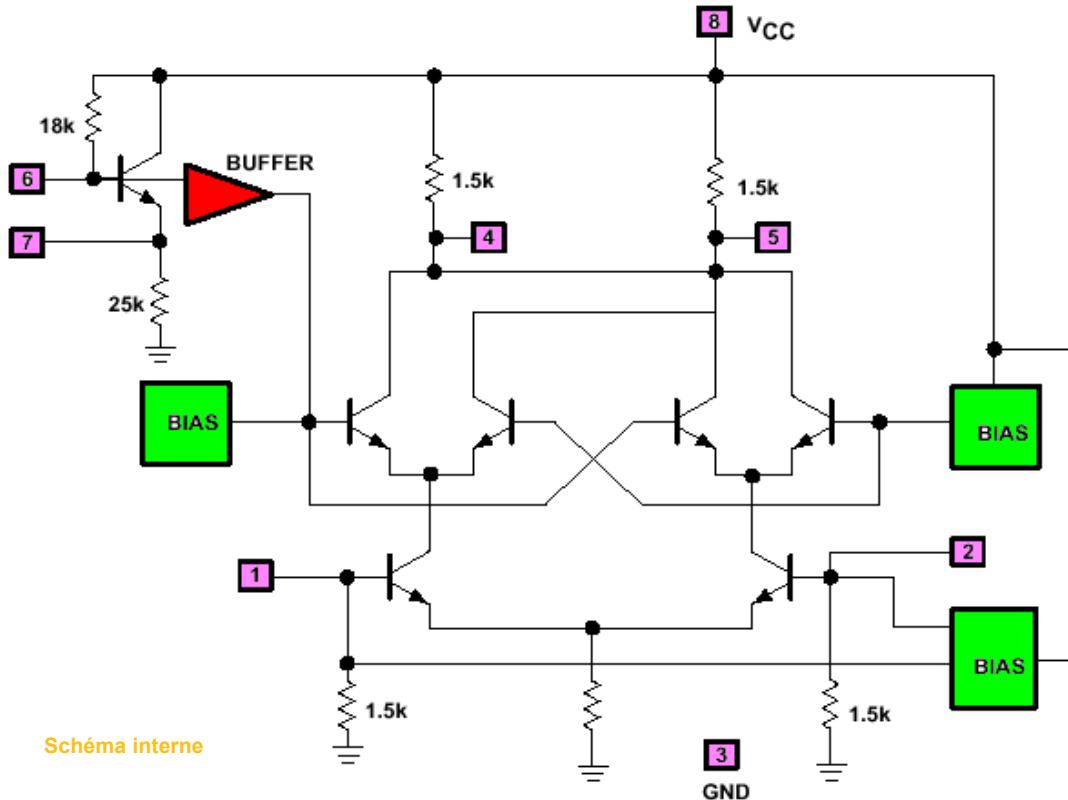
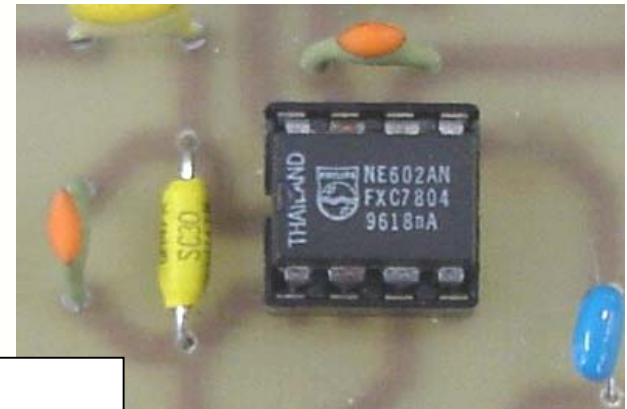


31 - Exemple de cellule de Gilbert : le NE602/612



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=5dB**
- niveau d'oscillateur local : **entre 200 et 300 mV crête-crête**



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

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

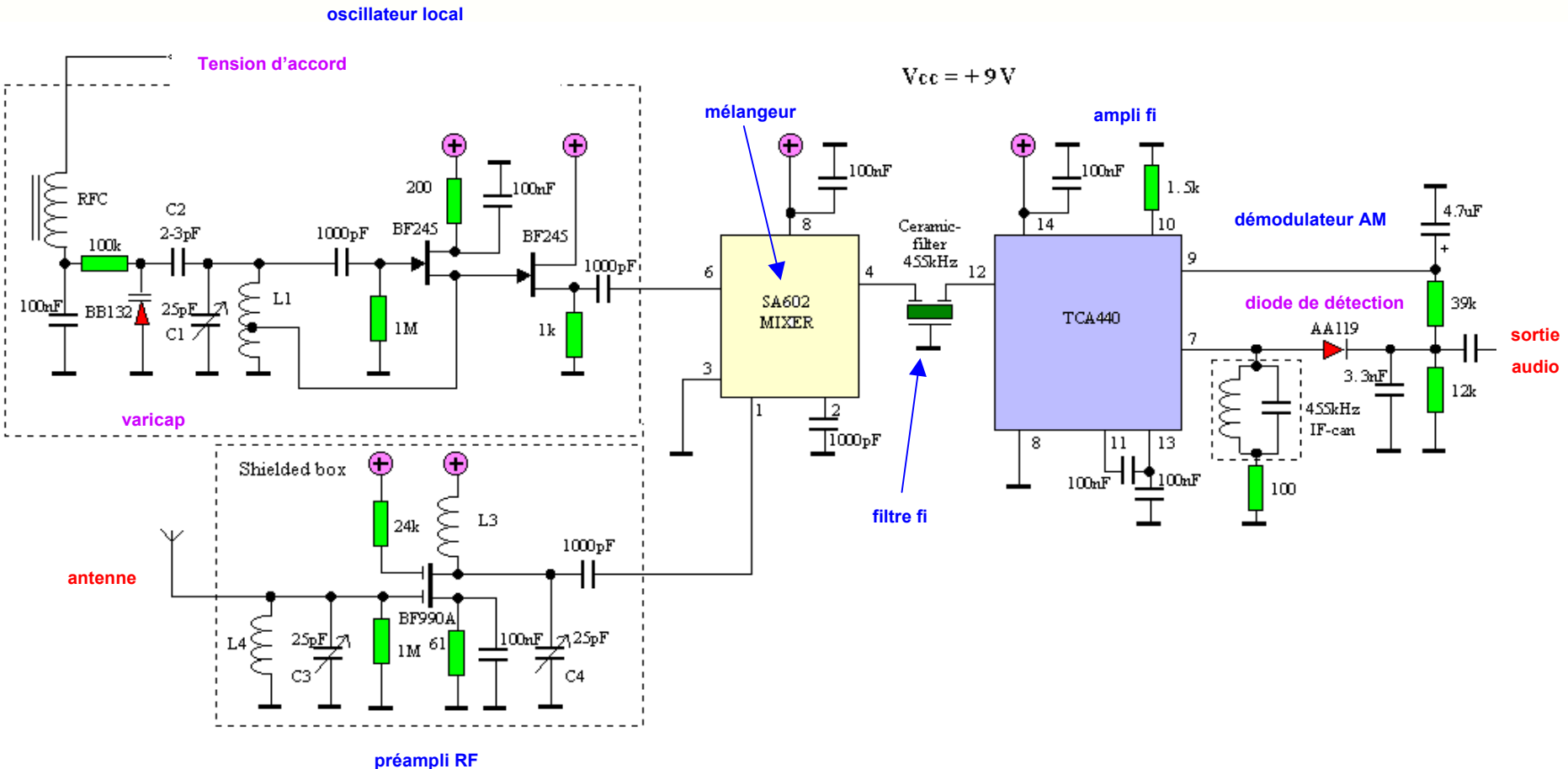


32- Exemple d'utilisation du NE602



Récepteur AM pour la bande « aviation »

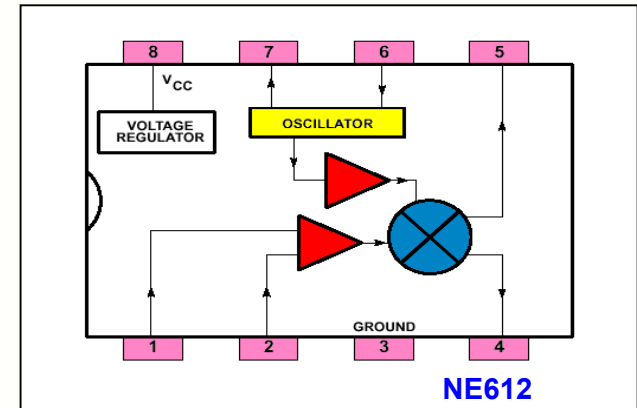
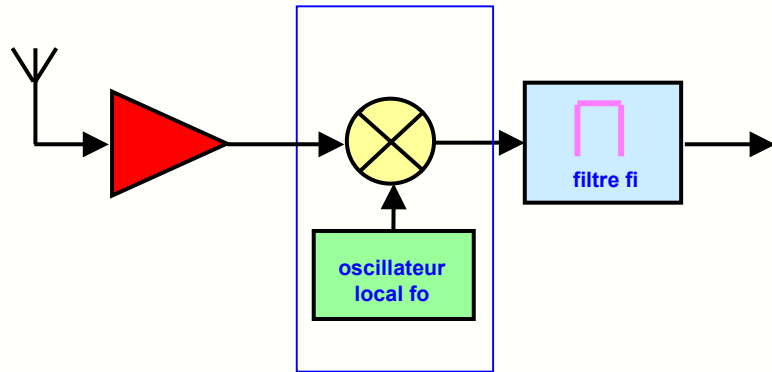
- gamme de fréquence de 100 à 130 MHz par C1
- accord fin par la « tension d'accord » sur une plage de 100 kHz environ
- oscillateur local de type Hartley
- démodulation AM par détecteur crête



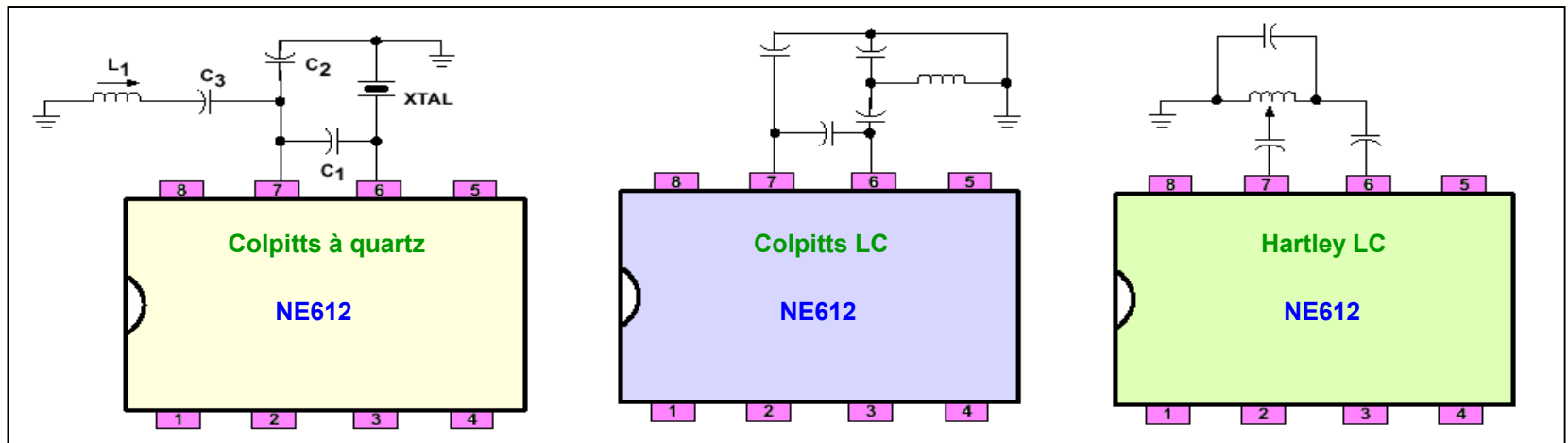
33- La cellule de Gilbert en auto-oscillation



Dans un dispositif de télécommunication (émetteur, récepteur) le mélangeur est toujours associé à un oscillateur local pour effectuer le changement de fréquence.



La cellule de Gilbert peut **osciller**, ce qui permet de réaliser avec le même circuit les fonctions d'oscillateur local et de mélangeur.





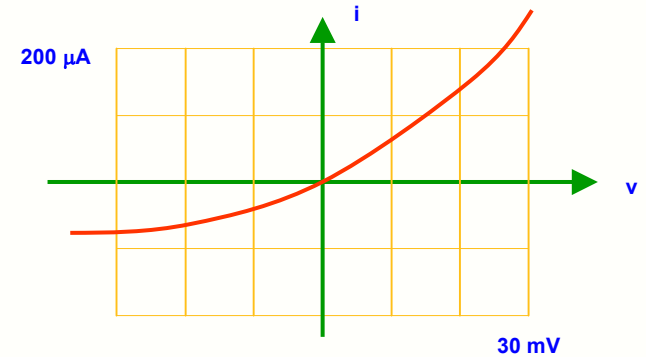
34- Principe du mélangeur à diode



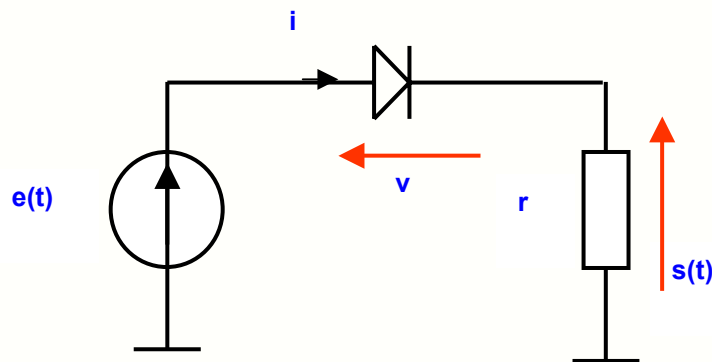
- la caractéristique d'une diode pour les faibles valeurs de la tension de polarisation n'est pas linéaire :

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

- $\lambda = q/kT = 40$ à température ambiante
- I_s courant de saturation



- la caractéristique n'étant pas linéaire, la diode va introduire de la distorsion si elle est placée dans un circuit



Dans certaines conditions (tension $e(t)$ faible) on montre que la tension de sortie $s(t) = r.i(t)$ s'écrit :

$$s(t) = r.I_s.\lambda.e(t) + 0,5.r.I_s.\lambda.e(t)^2 + \dots$$

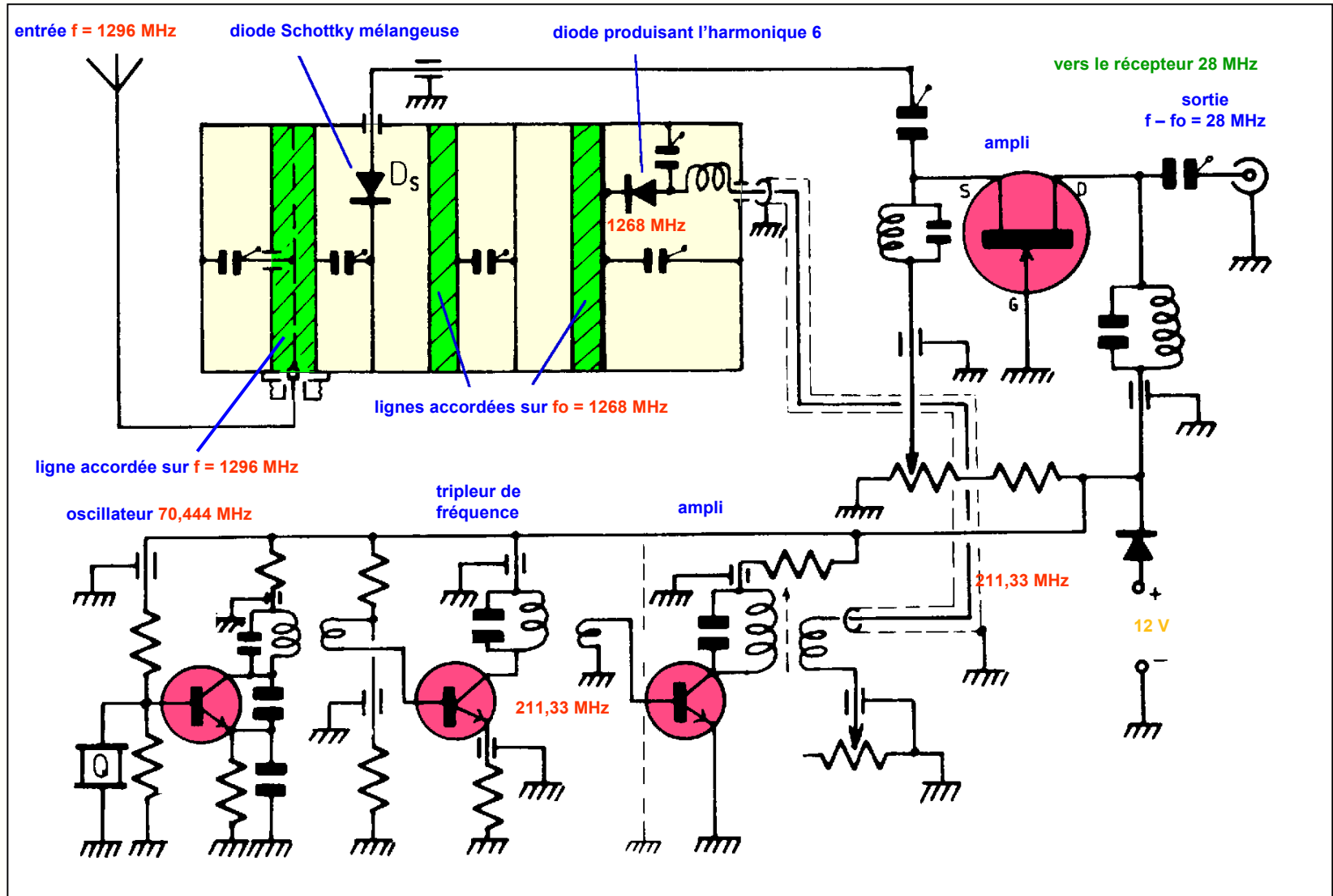
- la diode introduit de la **distorsion quadratique, cubique** ...
- si $e(t)$ est la somme de 2 signaux, la distorsion quadratique pourra être utilisée pour effectuer le **mélange**



35- Exemple d'utilisation d'une diode mélangeuse



Le montage est un **convertisseur** permettant de recevoir la **bande amateur 1296 MHz** sur un **récepteur 28 MHz**.

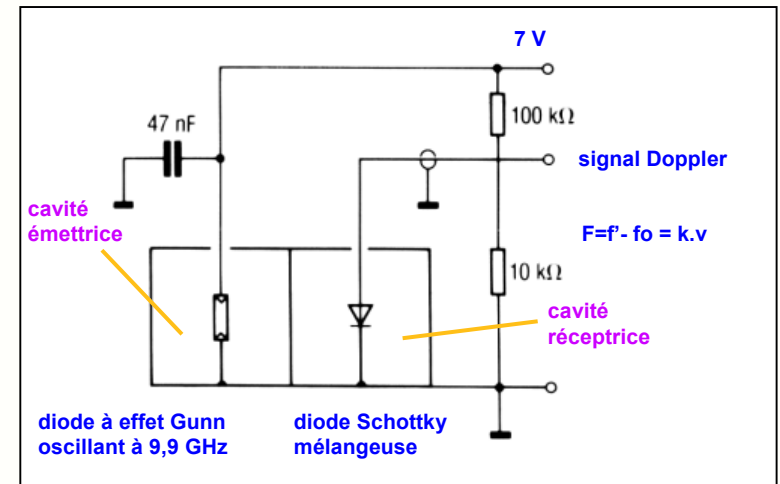
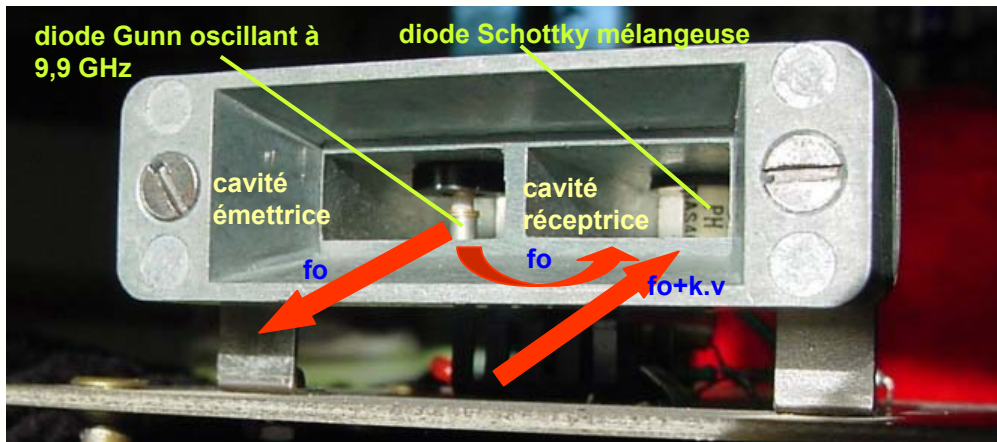
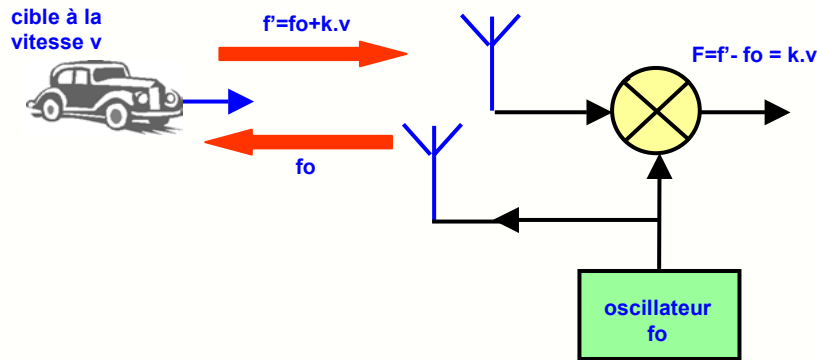


36- La diode mélangeuse dans le radar Doppler



Le dispositif est un module **radar Doppler** hyperfréquence fonctionnant à $f = 9,9 \text{ GHz}$ qui fournit à sa sortie un signal BF dont la fréquence F est proportionnelle à la vitesse de la cible (effet Doppler) :

- le signal à $f = 9,9 \text{ GHz}$ est produit par une **diode Gunn** placée dans une cavité dont les dimensions fixent la fréquence
- le signal reçu à la fréquence f' est mélangé au signal émis f par la **diode Schottky** qui produit la fréquence différence liée à la vitesse v

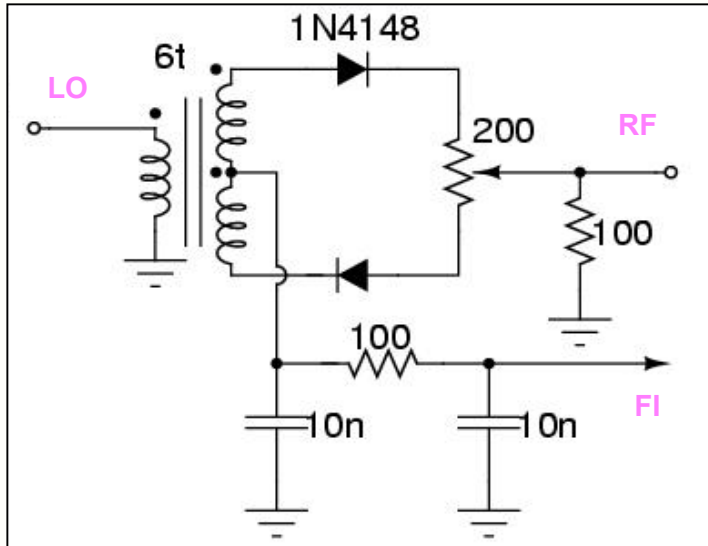




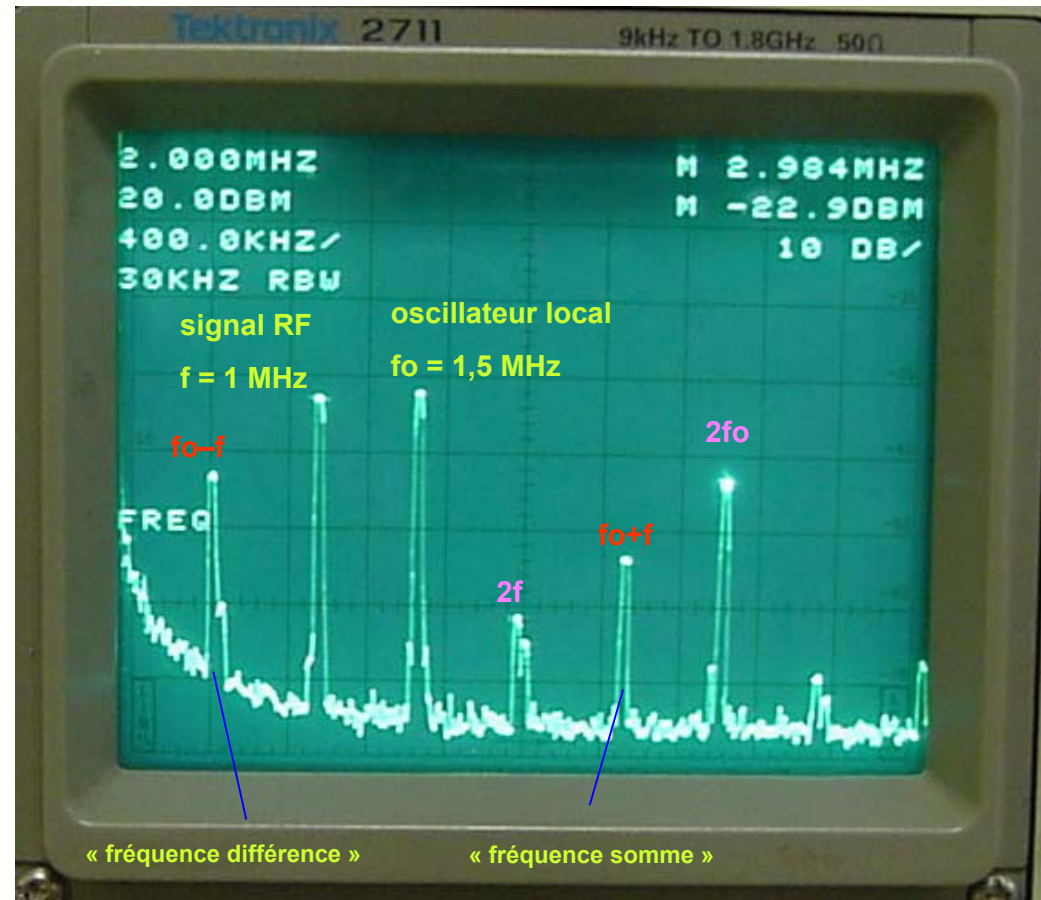
37- Exemple de réalisation d'un mélangeur à 2 diodes



Avec une poignée de composants, il est facile de réaliser un mélangeur à très faible coût qui peut être utilisé du continu jusqu'à quelques dizaines de MHz.



Allure du spectre relevé sur la sortie fi



Caractéristiques du mélangeur :

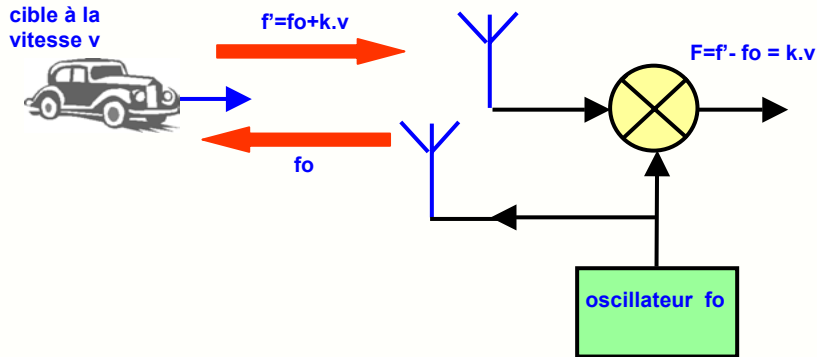
- fréquence de travail RF et LO : jusqu'à 20 - 30 MHz
- fréquence de travail fi : du continu à 1 MHz
- niveau d'oscillateur local : 13 dB
- défaut : pertes de conversions élevées (20 dB)



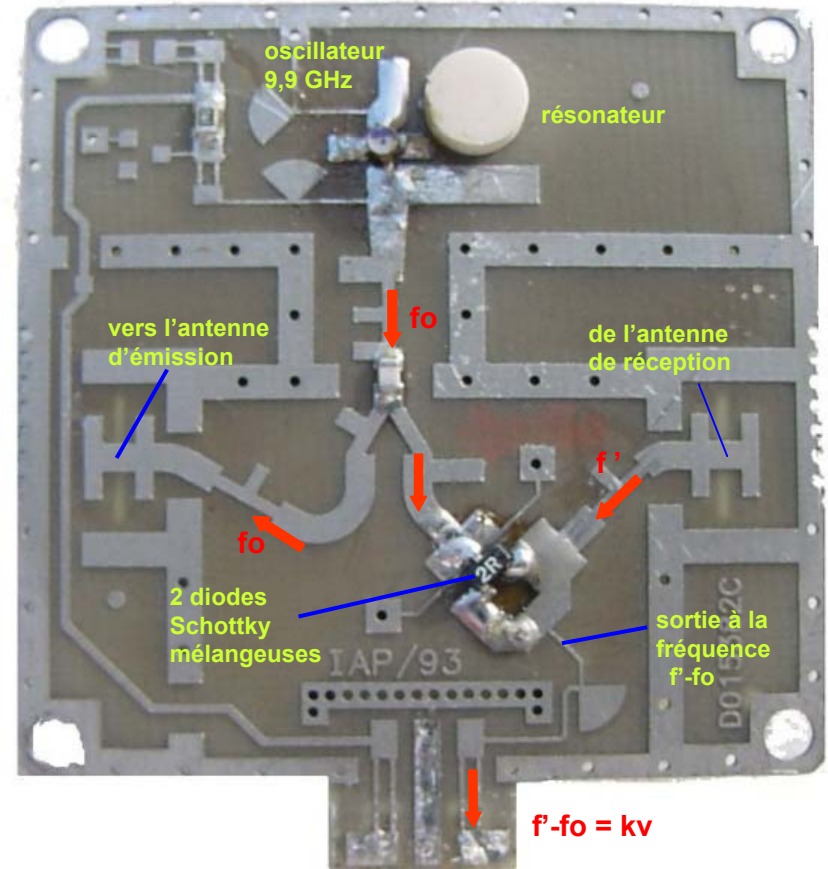
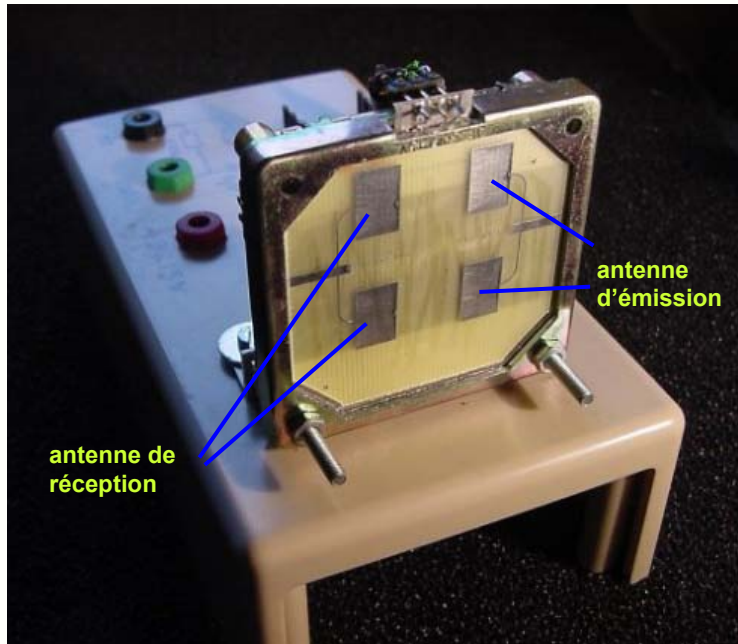
38- Exemple d'utilisation de 2 diodes mélangeuses



Le dispositif est un module **radar Doppler** hyperfréquence fonctionnant à $f = 9,9 \text{ GHz}$ qui fournit à sa sortie un signal BF dont la fréquence F est proportionnelle à la vitesse de la cible.



- oscillateur à TEC stabilisé par résonateur diélectrique
- mélangeur à 2 diodes



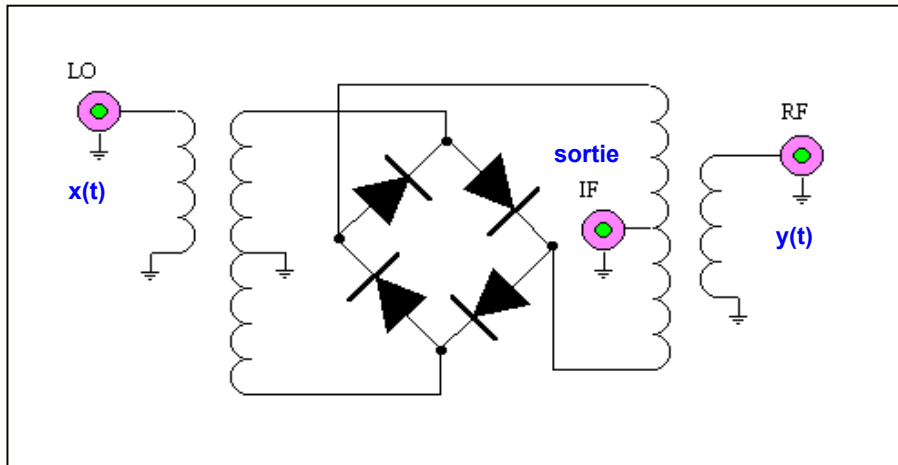
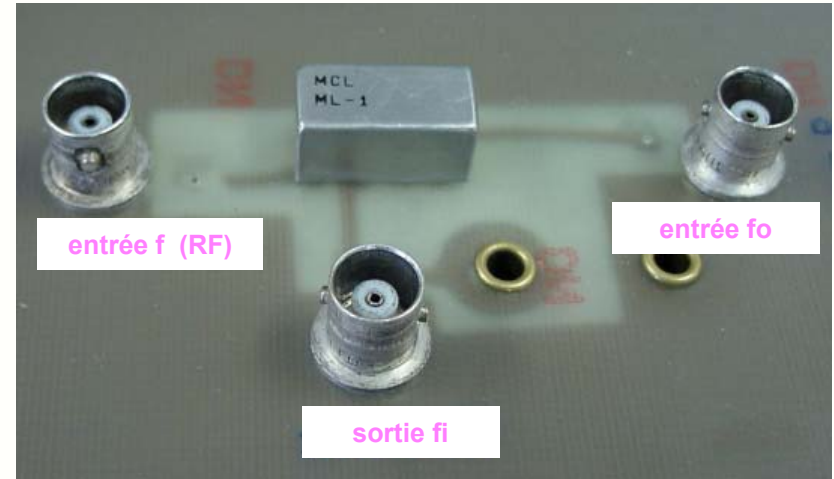


39- Structure du mélangeur Schottky



Le mélangeur Schottky utilise aussi la non-linéarité de diodes pour faire le mélange :

- il est constitué de quatre diodes montées en anneau et de deux transformateurs
- l'utilisation de 4 diodes permet de supprimer en sortie les composantes aux fréquences f , f_0 , $2f$ et $2f_0$
- le spectre du signal de sortie est donc plus « propre » qu'avec une seule diode mélangeuse et est constitué essentiellement des fréquences « somme » et « différence »



- s'il est attaqué par un niveau d'oscillateur local convenable, il réalise bien la fonction de multiplieur passif :

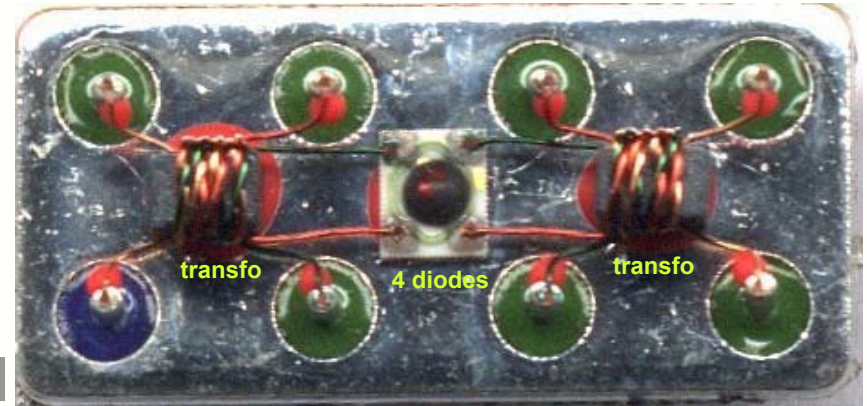
$$s(t) = 4.r.l_s.\lambda.x.y$$

si r est la résistance de charge

- contrairement aux mélangeurs à transistors qui peuvent apporter un gain de conversion, les mélangeurs à diodes sont passifs et introduisent donc automatiquement une atténuation d'au moins 6 dB pour l'une ou l'autre des raies utilisées en sortie ($f+f_0$ ou $f-f_0$)
- l'amplitude de la non-linéarité est définie par le niveau de l'oscillateur local f_0 qui est précisé par le fabricant et se trouve généralement dans une plage allant de 7 dBm (500 mV) à 13 dBm (1V)



40- Exemple de mélangeur Schottky



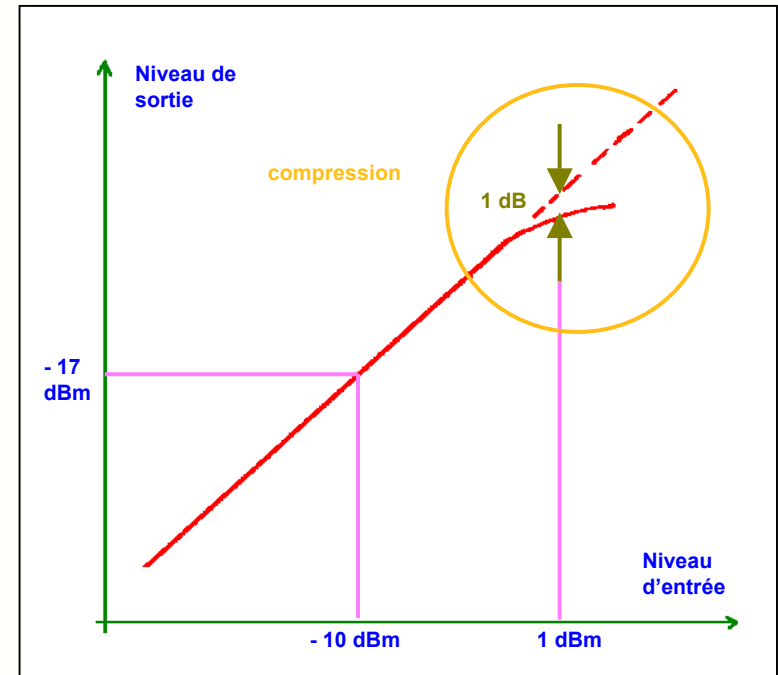
Vue interne

Caractéristiques du mélangeur SBL-1 :

- fréquence de travail RF et LO : 1 à 500 MHz
- fréquence de travail fi : du continu à 500 MHz
- niveau d'oscillateur local : 7 dBm
- pertes de conversion : 7 dB max sur toute la gamme
- point de compression : 1 dBm

Remarques :

- l'amplitude de la non-linéarité est fixée par le niveau de l'oscillateur local fo qui doit se trouver à 7 dBm (500 mV)
- le fabricant indique aussi un niveau limite sur l'entrée RF appelé **point de compression** qui précise le niveau maximal à ne pas dépasser si on veut rester dans le domaine de distorsion quadratique
- au-delà du point de compression, l'amplitude du signal de sortie n'est plus proportionnelle à celle du signal d'entrée, ce qui crée une distorsion inacceptable si on travaille en AM

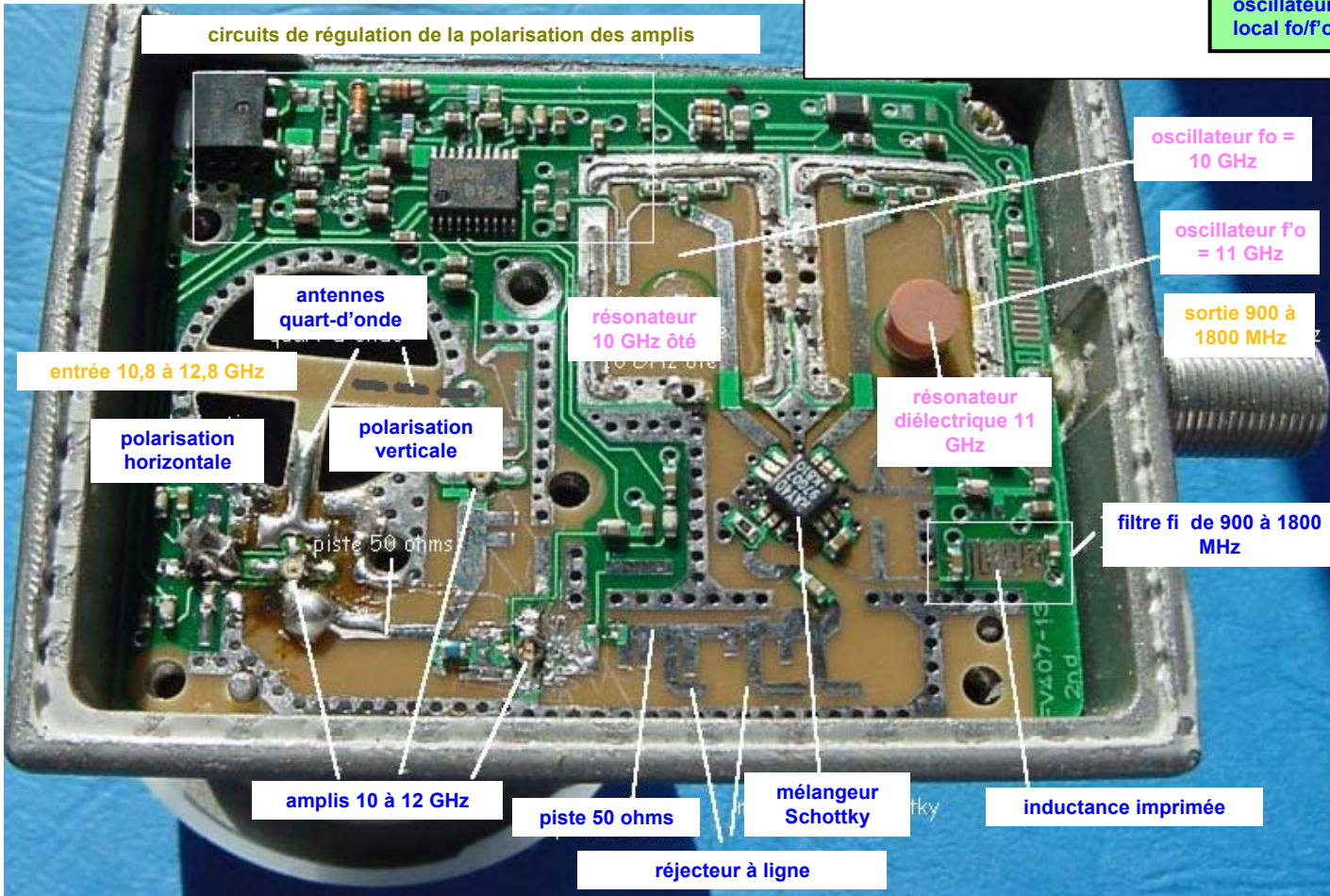
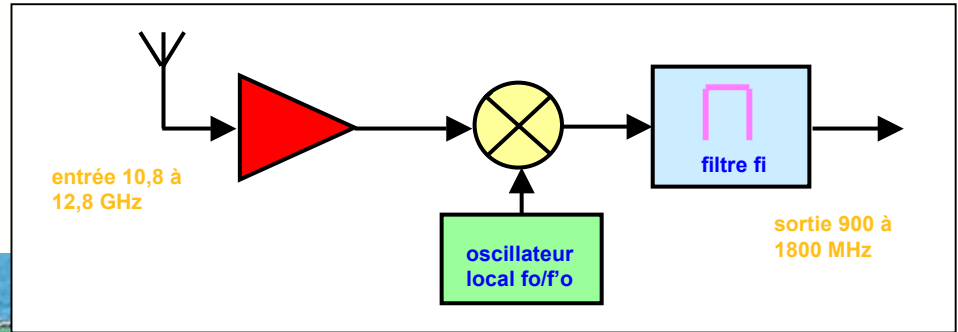


41 - Exemple d'utilisation de mélangeur Schottky



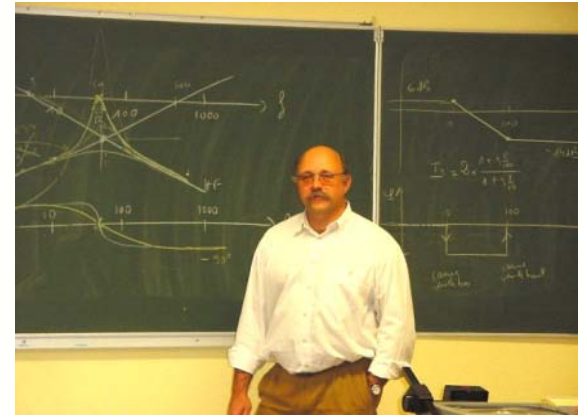
Tête de réception pour la télévision satellite analogique :

- bi-bande 10,8 à 11,8 GHz et 11,8 à 12,8 GHz
- oscillateur local stabilisé par résonateur diélectrique
- changement de fréquence par mélangeur Schottky





Un jardin dans Strasbourg



FIN