

# Chapitre IV: Changement de fréquence d'un signal RF par mélange

---

## I. Principes généraux du mélange et de la transposition de fréquence

Un mélangeur est un dispositif permettant de transposer en fréquence un signal sans modifier l'information dont il est porteur. Les mélangeurs sont utilisés dans la plupart des systèmes de communications (télécoms, guidage, radars, etc...). Dans tous ces systèmes, les signaux utiles sont transposés en hyperfréquence (RF) pour l'émission en espace libre et sont inversement transposés vers les basses fréquences (FI) en réception pour être traités avec une électronique plus classique. Le mélangeur constitue un maillon essentiel de tout système d'émission/réception.

On distingue deux modes de fonctionnement pour le mélangeur (up-converter et down-converter) qui correspondent respectivement à la transposition de la fréquence FI vers la fréquence RF et à la transposition de la fréquence RF vers la fréquence FI. Certains mélangeurs sont optimisés pour un fonctionnement up-converter ou down-converter alors que d'autres peuvent fonctionner dans les deux modes avec des performances similaires

Un mélangeur peut donc :

- Soit augmenter la fréquence du signal utile (up-converter)
- Soit diminuer la fréquence du signal utile (down-converter)

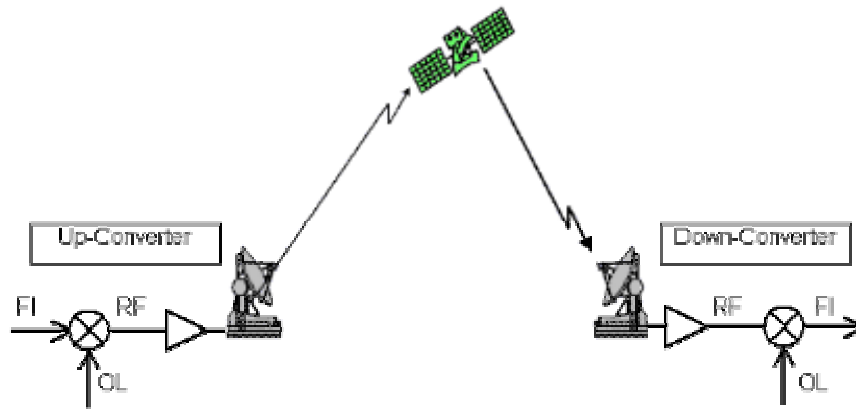
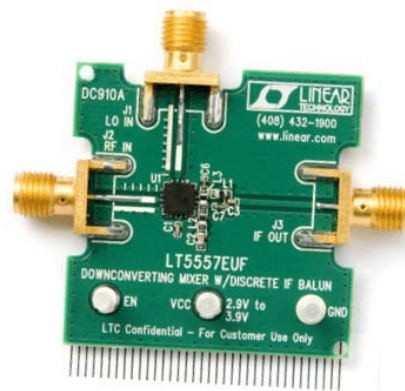


Illustration des fonctions Up- et Down- Converter



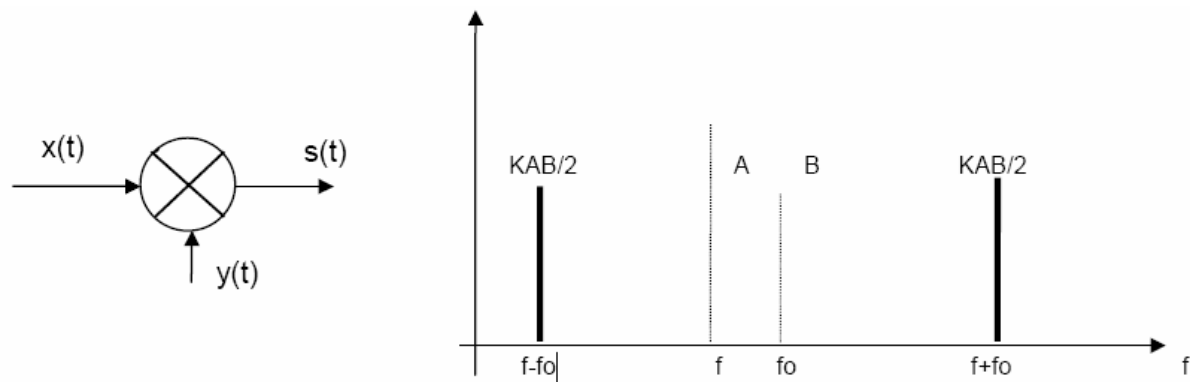
Mélangeur électronique

Un mélangeur possède deux accès pour les fréquences utiles (Fréquence Intermédiaire FI et Radio-Fréquence RF) et un accès pour la fréquence de pompe OL (Oscillateur Local). Pour assurer la transposition de fréquence entre les accès d'entrée et de sortie (FI et RF), la non-linéarité fondamentale de l'élément mélangeur doit être excitée à son accès OL par un signal d'amplitude très supérieure à celle des signaux utiles (FI et RF).

## II. Description d'un mélangeur idéal

- **Mélange de deux signaux sinusoïdaux**

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



Mélange de deux signaux sinusoïdaux

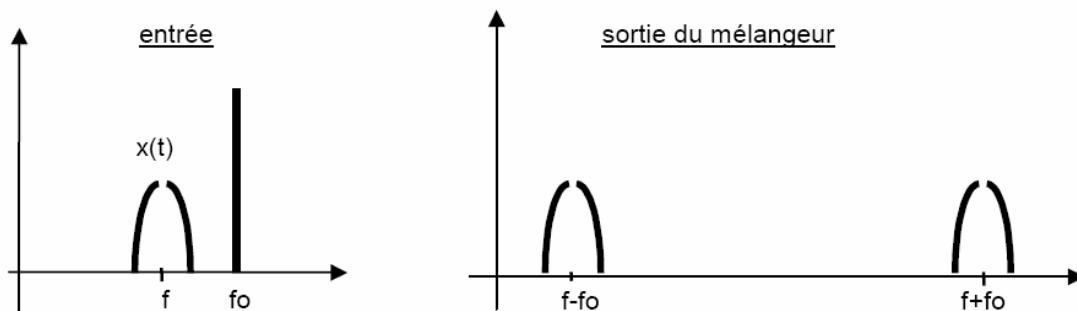
On obtient en sortie le signal suivant :

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

Le spectre en sortie est donc composé de deux raies aux fréquences somme et différence.

- **Mélange d'une porteuse modulée avec une sinusoïde.**

Dans l'utilisation normale du mélangeur, le signal  $x(t)$  est un signal modulé en amplitude, en fréquence ou en numérique centré sur  $\omega$  et  $y(t)$  est un signal de fréquence  $f_0$  provenant d'un oscillateur appelé oscillateur local.



Mélange d'un signal modulé avec un signal sinusoïdal

En sortie du mélangeur, on retrouve comme précédemment le spectre du signal  $x(t)$  centré sur les fréquences  $f - f_0$  et  $f + f_0$ .

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

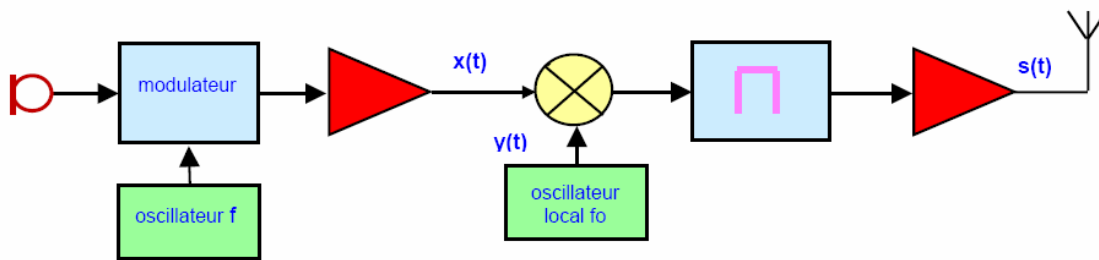
- si  $x(t)$  est modulé en AM, l'amplitude variable  $A$  se retrouve sur les deux composantes  $s(t) = K.x(t).y(t) = K.A\cos(\omega t).B\cos(\omega_0 t) = \frac{KAB}{2}.\cos(\omega + \omega_0)t + \frac{KAB}{2}.\cos(\omega - \omega_0)t$
- si  $x(t)$  est modulé en FM, la pulsation variable  $\omega$  se retrouve dans les deux composantes

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

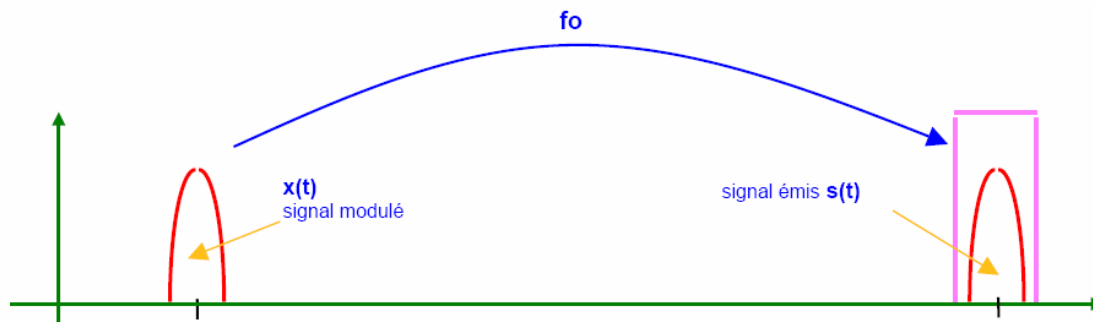
- **Le changement de fréquence dans un émetteur :**

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



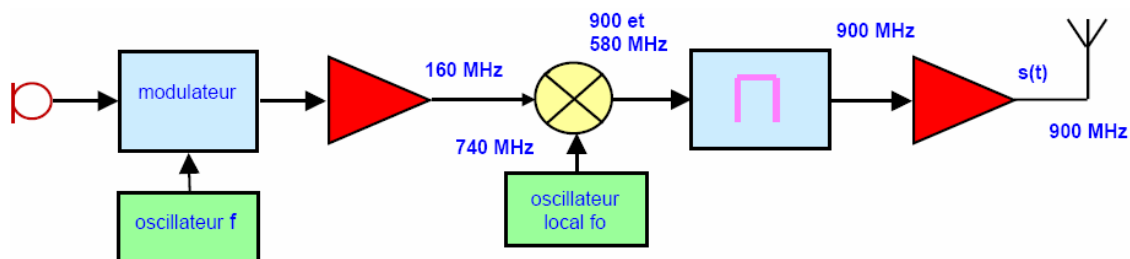
La valeur de la fréquence de l'oscillateur local  $f_0$  détermine la fréquence d'émission qui vaut  $f + f_0$ .



**Exemple :**

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

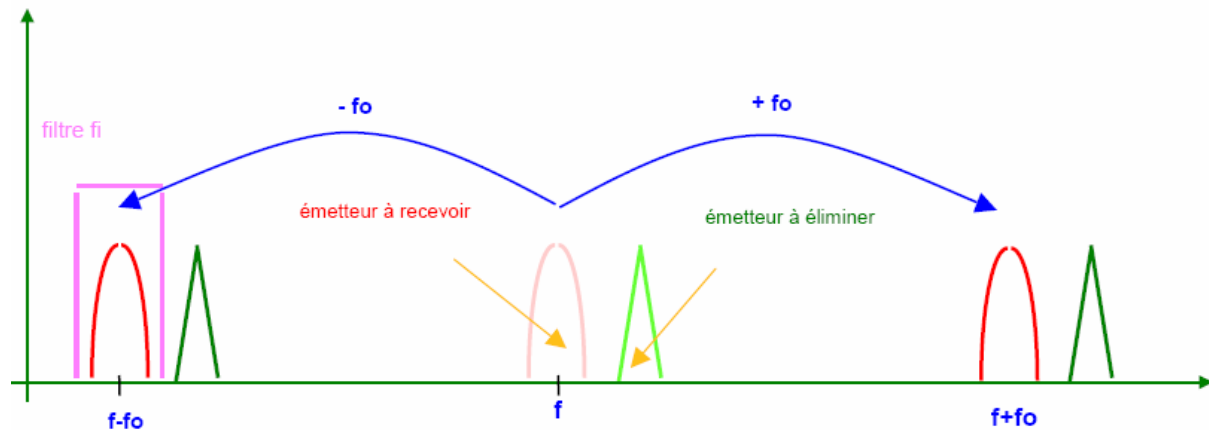
Pour le transposer à la fréquence d'émission de 900 MHz, il va être multiplié par  $f_0 = 740$  MHz, puis filtré à 900 MHz pour éliminer la fréquence indésirable de  $740 - 160 = 580$  MHz.



- **Le changement de fréquence dans le récepteur**

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

On obtient en sortie un spectre assez 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  $f+f_0$ .



Pourtant 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  $f_0$ , et le filtre de fréquence intermédiaire à  $f_i$  est fixe.

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

**Exemple :**

Pour recevoir une chaîne radio à  $f = 98,1$  MHz avec une fréquence intermédiaire  $f_i = 10,7$  MHz, il faut transposer cette chaîne radio à 10,7 MHz.

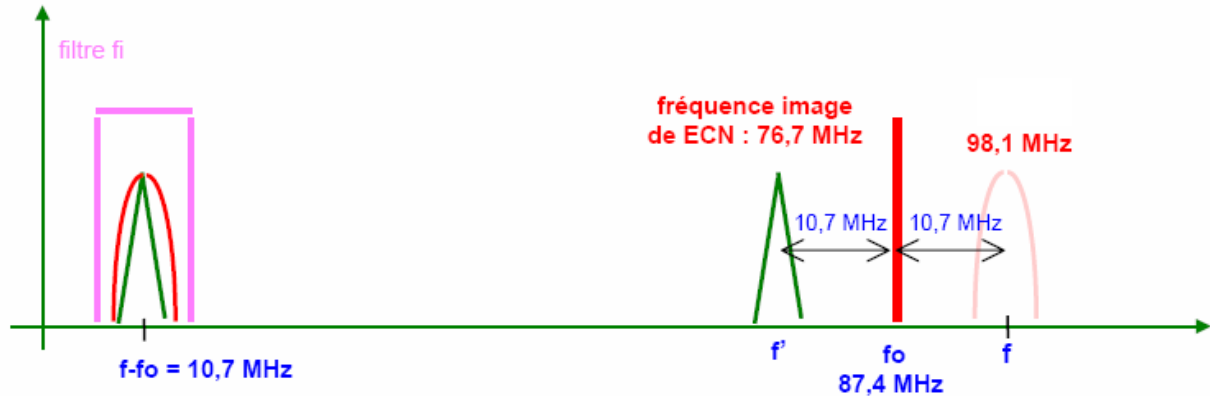
On réglera donc l'oscillateur local à  $f_0 = 87,4$  MHz pour que  $f-f_0 = 98,1 - 87,4 = 10,7$  MHz.

- **Le problème de la fréquence image**

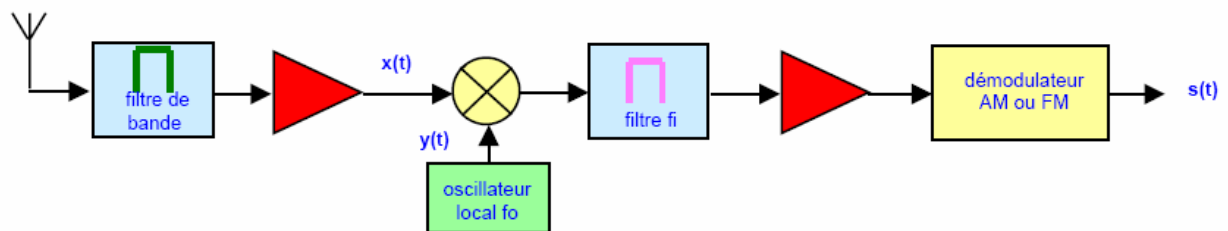
Cette structure presque idéale a un seul défaut :

- 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  $f$**

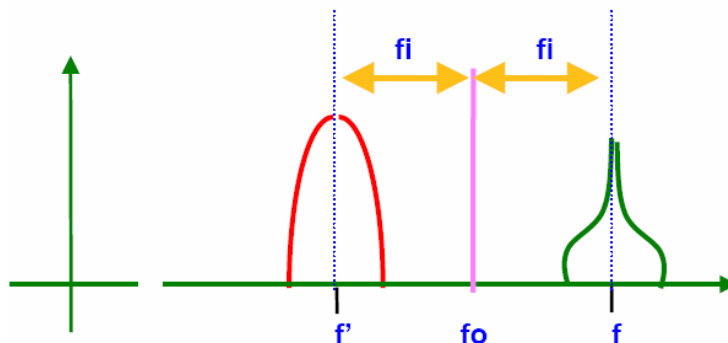
**Exemple :** pour la chaîne radio, on avait réglé  $f_0 = 87,4$  MHz. Mais un signal à  $f' = 76,7$  MHz sera aussi transposé à 10,7 MHz par le mélangeur, il sera donc aussi démodulé et entendu si on ne l'élimine pas.



L'émetteur image 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 :



$f$  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 d'autant plus facile que l'intervalle est important.

On choisit donc dans la pratique une fréquence intermédiaire suffisamment élevée :

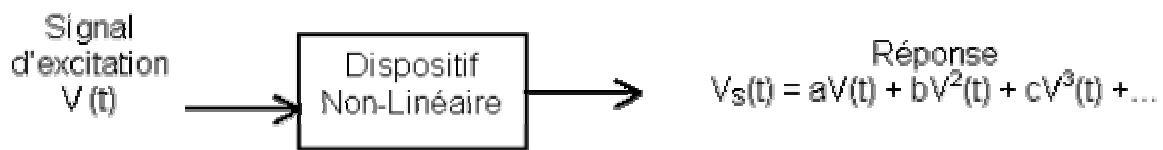
- bande FM :  $f_i = 10,7$  MHz pour une réception autour de 100 MHz
- bande PO :  $f_i = 455$  kHz ----- 1 MHz
- bande TV :  $f_i = 38,9$  MHz ----- de 400 à 800 MHz
- bande GSM :  $f_i = 70$  à 250 MHz ----- autour de 900 MHz

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 (GSM) ou variable et commandé parallèlement avec l'oscillateur local (récepteur FM, TV ...).

### III. Mélangeurs réels : Description du mélange par une non-linéarité

En pratique, l'opération de mélange est réalisée en utilisant des composants non-linéaires. De plus, bien que simple mathématiquement, l'opération de multiplication s'avère quasiment impossible à réaliser de manière idéale.



Mélangeur réalisé à partir d'un dispositif non-linéaire.

Soit un dispositif non-linéaire dont la réponse peut être mise sous la forme :

$$V_s(t) = aV(t) + bV^2(t) + cV^3(t) + \dots$$

excité par la somme de deux signaux sinusoïdaux  $V_E(t)$  et  $V_{OL}(t)$  aux pulsations  $\omega_E$  et  $\omega_{OL}$ :

$$V(t) = V_E \cos(\omega_E t) + V_{OL} \cos(\omega_{OL} t)$$

Le développement de la réponse du dispositif non-linéaire en fonction des fréquences  $f_E$  et  $f_{OL}$  montre que l'on obtient en sortie les harmoniques de ces fréquences ainsi que d'autres fréquences de battement du type :

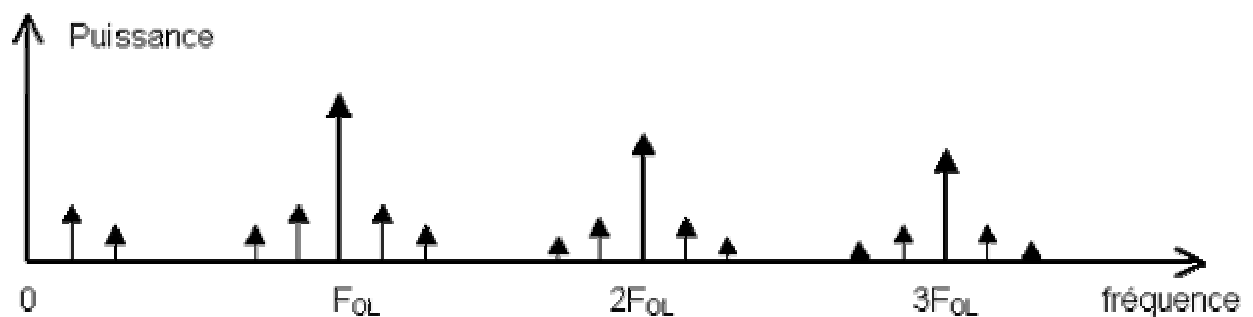
$$\pm m f_{OL} \pm n f_E \text{ (avec m et n entiers positifs)}$$

**Tableau représentant la décomposition du signal de sortie d'un mélangeur**

1er ordre : $aV(t)$	2nd ordre : $bV^2(t)$	3ème ordre : $cV^3(t)$	...
	$\frac{b}{2} (V_E^2 + V_{OL}^2)$	$(\frac{3c}{4} V_E^3 + \frac{3c}{2} V_E V_{OL}^2) \cos(\omega_E t) + (\frac{3c}{4} V_{OL}^3 +$	
$aV_E \cos(\omega_E t)$	$\frac{b}{2} V^2 \cos(2\omega_E t)$	$\frac{3c}{2} V_{OL} V_E^2) \cos(\omega_{OL} t)$	
$+aV_{OL} \cos(\omega_{OL} t)$	$\frac{b}{2} V_{OL}^2 \cos(2\omega_{OL} t)$	$+\frac{c}{4} V_E^3 \cos(\omega_E t) + \frac{c}{4} V_{OL}^3 \cos(3\omega_{OL} t)$	...
	$+bV_E V_{OL} \cos(\omega_{OL} + \omega_E) t$	$+\frac{3c}{4} V_{OL}^2 V_E [\cos(2\omega_E + \omega_{OL}) t + \cos(2\omega_E - \omega_{OL}) t]$	
	$+bV_E V_{OL} \cos(\omega_{OL} - \omega_E) t$	$+\frac{3c}{4} V_E^2 V_{OL} [\cos(2\omega_{OL} + \omega_E) t + \cos(2\omega_{OL} - \omega_E) t]$	

En utilisant les formules trigonométriques, on montre que chaque terme  $V_{OL}^m(t)$  génère l'harmonique  $mF_{OL}$ , que chaque terme  $V_E^n(t)$  génère l'harmonique  $nF_E$ , et enfin que chaque terme croisé  $K.V_{OL}^m(t).V_E^n(t)$  génère des fréquences sommes ( $mF_{OL} + nF_E$ ) et des fréquences différences ( $mF_{OL} - nF_E$ ) ou  $(-mF_{OL} + nF_E)$  (avec  $m$  et  $n$  entiers positifs).

Contrairement au multiplieur idéal, un élément non-linéaire génère donc un grand nombre de signaux aux fréquences de mélange dont l'amplitude décroît cependant lorsque les ordres  $m$  et  $n$  augmentent. Pour supprimer les raies parasites, on procède par filtrage.

**Spectre de mélange**

Les fréquences des raies du spectre peuvent s'exprimer en fonction des fréquences OL et FI :

$$m_1 F_{OL} \pm n_1 F_{FI} \text{ avec } m_1 \text{ et } n_1 \text{ entiers positifs, si } F_{OL} > F_{FI}$$

ce qui s'écrit de manière équivalente en fonction de la fréquence RF :



$$\pm m_2 F_{OL} \pm n_2 F_{RF} \text{ avec } m_2 \text{ et } n_2 \text{ entiers positifs}$$

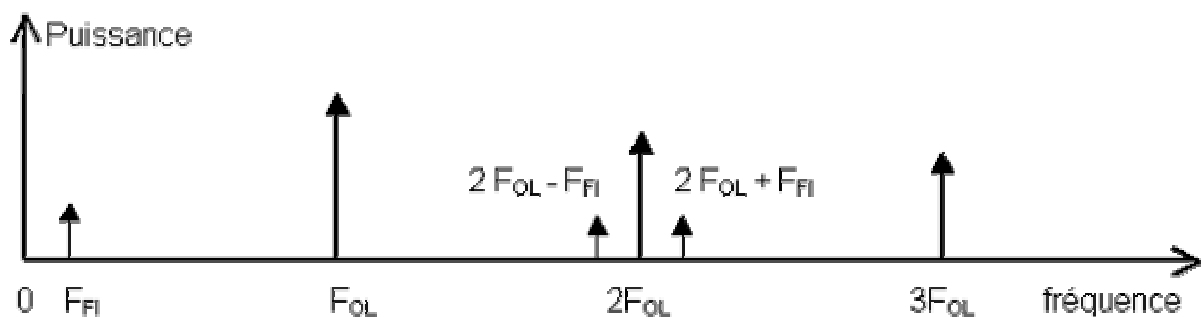
Dans le cas d'un mélangeur fondamental, pour lequel le mélange s'effectue avec la fréquence fondamentale de l'OL, la fréquence RF est donnée par :

$$F_{RF} = F_{OL} \pm F_{FI}$$

De manière plus générale, lorsque le mélange s'effectue avec l'harmonique  $x$  de l'OL, on a :

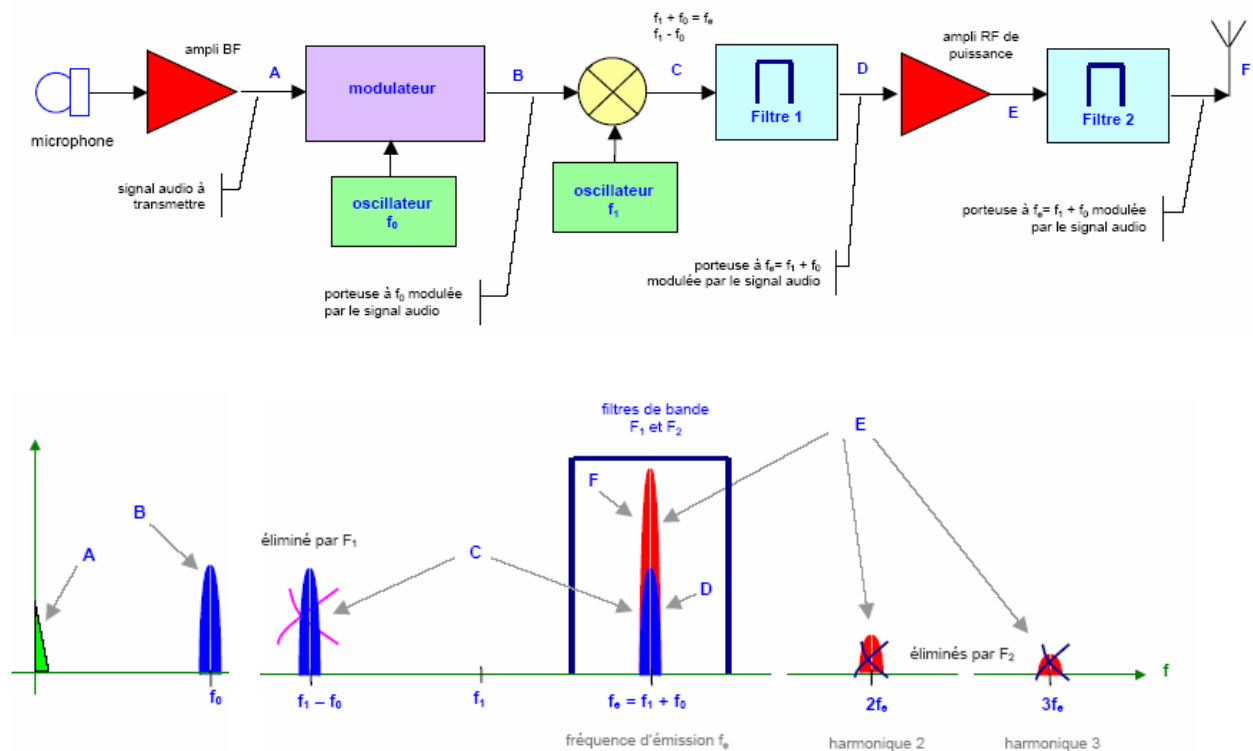
$$F_{RF} = x F_{OL} \pm F_{FI}$$

Si ( $x > 1$ ,  $x$  entier) on parle alors de mélangeur sous-harmonique d'ordre  $x$ . La figure suivante illustre les raies principales du spectre d'un mélangeur sous-harmonique d'ordre 2 que l'on appelle en général plus simplement « mélangeur sous-harmonique  $x2$  ».

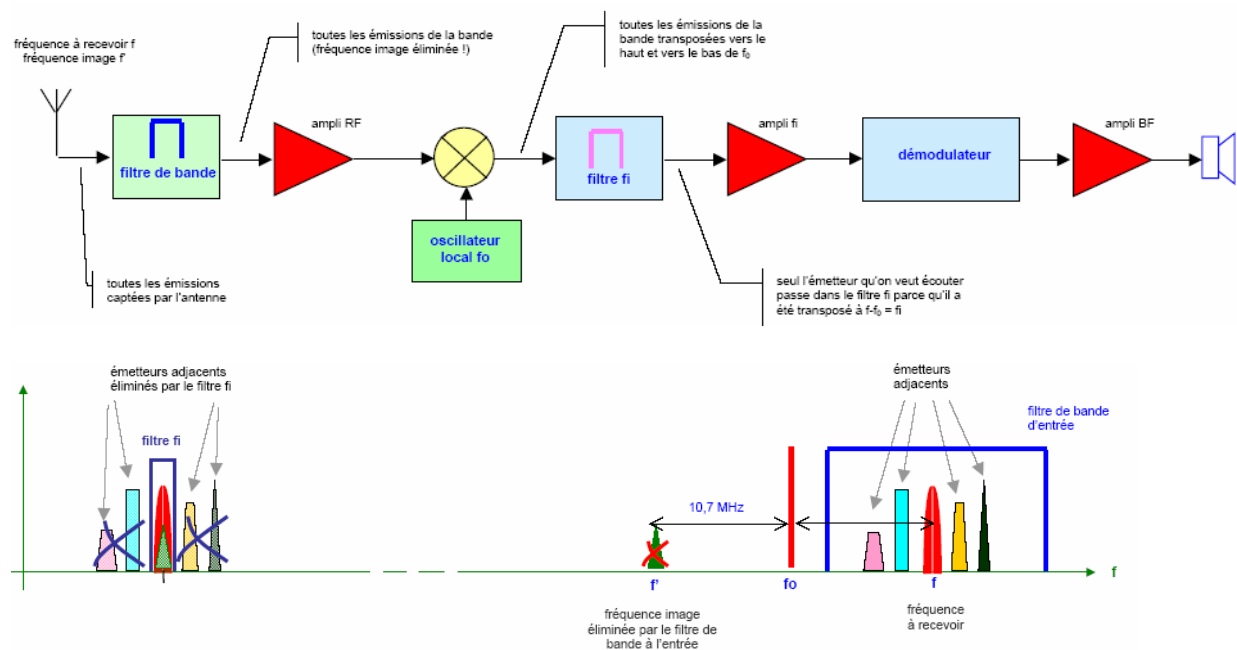


Principales raies du spectre d'un mélangeur sous-harmonique  $x2$

Les fréquences des signaux en bande latérale supérieure USB ( $x.F_{OL} + F_{FI}$ ) et en bande latérale inférieure LSB ( $x.F_{OL} - F_{FI}$ ) sont symétriques par rapport à la fréquence ( $x.F_{OL}$ ) de l'harmonique d'OL réalisant le mélange. Dans le cas le plus courant, on utilise une seule des deux bandes à la fois (fonctionnement bande latérale unique SSB). Le signal utile est appelé signal RF tandis que l'autre fréquence est appelée fréquence image.



### Vue d'ensemble d'un émetteur



### Vue d'ensemble d'un récepteur

## IV. Les différents types de mélangeur

### 1. Mélangeurs résistifs à diode Schottky

- La diode Schottky

Une diode Schottky (nommée d'après le physicien allemand Walter H. Schottky) est une diode qui a un seuil de tension directe très bas et un temps de commutation très court. Ceci permet la détection des signaux HF faibles et hyperfréquences. La diode Schottky est le composant le plus largement utilisé pour réaliser les différents types de mélangeur.

Le comportement électrique non linéaire de la diode Schottky peut être modélisé de manière simplifiée par le schéma suivant :

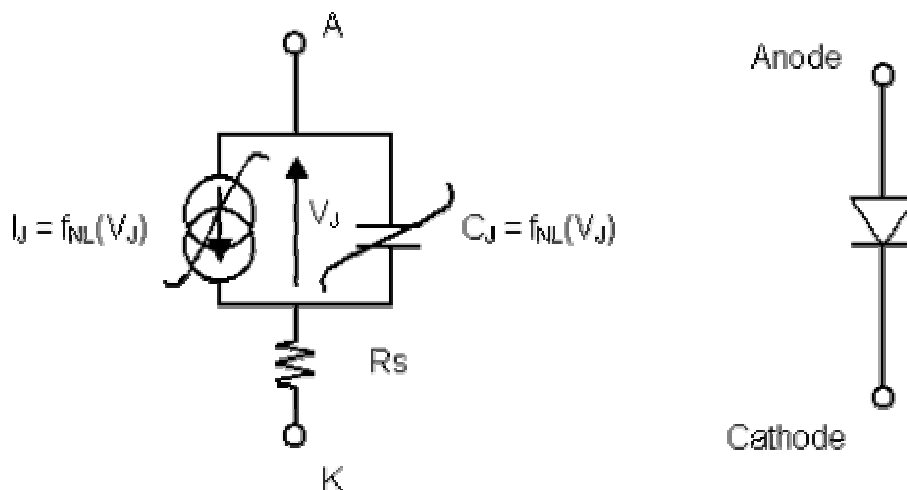


Schéma équivalent non linéaire d'une diode Schottky

Le modèle fait apparaître les deux non-linéarités fondamentales d'une diode Schottky que sont la source de courant  $I_J$  et la capacité de jonction  $C_J$ .

Le courant  $I_J$  circulant du métal vers le semi-conducteur est commandé par la tension  $V_J$  appliquée à la jonction. Il peut s'écrire selon l'équation suivante :

$$I_J = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

avec  $kT/q = 25.8\text{mV}$  pour  $T=293\text{K}$

Les paramètres sont :

$I_s$  : le courant de saturation

$\eta$ : le facteur d'idéalité qui vaut 1 dans le cas d'une diode idéale

La capacité de jonction de la diode  $C_J$  dépend de la tension aux bornes de la jonction par la relation approchée:

$$C_J = \frac{C_{J0}}{\sqrt{1 - \frac{V_J}{V_b}}}$$

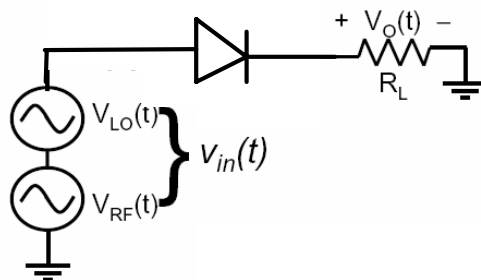
avec  $C_{J0}$  : capacité de jonction de la diode polarisée à 0V

et  $V_b$  : tension de seuil de la diode

Enfin, la résistance  $R_s$  est une résistance série parasite. Cette résistance est généralement considérée comme linéaire.

- **Mélangeurs simple diode**

Le mélangeur simple diode est le mélangeur résistif dont le principe de fonctionnement est le plus simple. Le signal OL de pompe ainsi que le signal d'entrée sont appliqués à l'anode de la diode et le signal de sortie est récupéré de la cathode.



Mélangeur simple diode

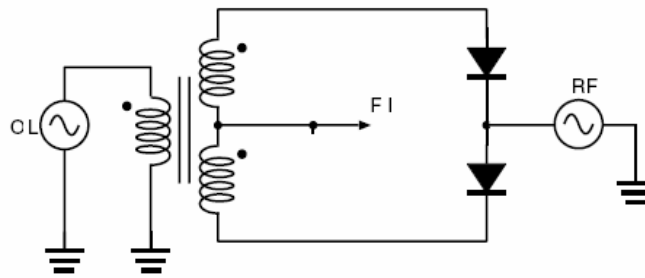
Les performances globales des mélangeurs simple diode sont médiocres quand on les compare à celles des circuits *équilibrés*. Ils restent cependant utilisés aux très hautes

fréquences où ils restent les seuls mélangeurs réalisables ainsi que dans le cas de réalisations discrètes ne nécessitant que des performances modestes.

- **Mélangeurs simplement équilibrés à diode**

- **Définition**

Le mélangeur simplement équilibré à diode est constitué de deux diodes.



Mélangeurs simplement équilibrés

- **Principe de fonctionnement**

On applique des tensions sinusoïdales  $V_{OL}$  et  $V_{RF}$  à deux diodes connectées conformément au schéma de la figure précédente.

L'équation caractéristique du courant de la diode peut s'exprimer sous la forme d'une série de puissance :

$$I(V) = BV + CV^2 + DV^3 + \dots$$

Les courants circulant dans chacune des diodes sont :

$$I_1 = f(V_{OL} + V_{RF})$$

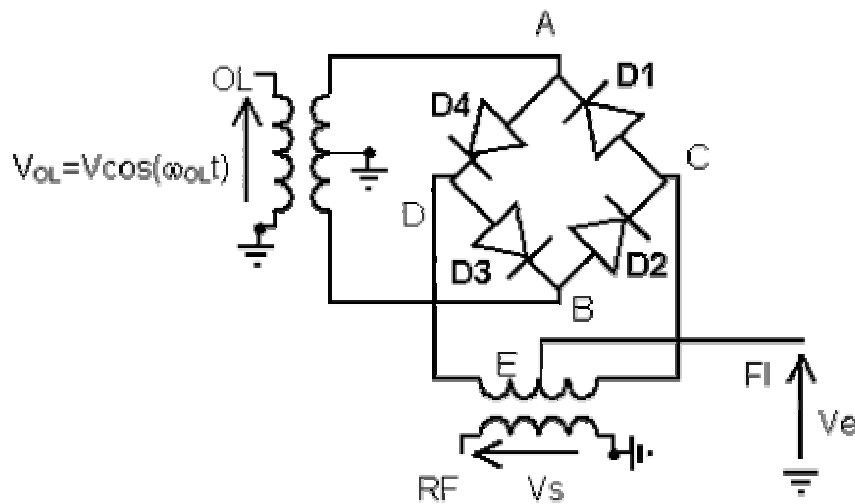
$$I_2 = f(V_{OL} - V_{RF})$$

On peut montrer par les formules de trigonométrie que les fréquences de mélange ( $m.f_{OL} \pm n.f_{RF}$ ) sont issues du terme de la forme  $V_{OL}^m \cdot V_{RF}^n$ , (voir TD).

- **Mélangeurs doublement équilibrés à diode**

- **Définition et schéma bloc**

Un circuit de mélangeur à diodes doublement équilibré (DBM) intègre deux paires de diodes. La figure suivante montre un mélangeur à diode doublement équilibré en anneau (diode ring DBM).



Mélangeur doublement équilibré à diodes en anneau

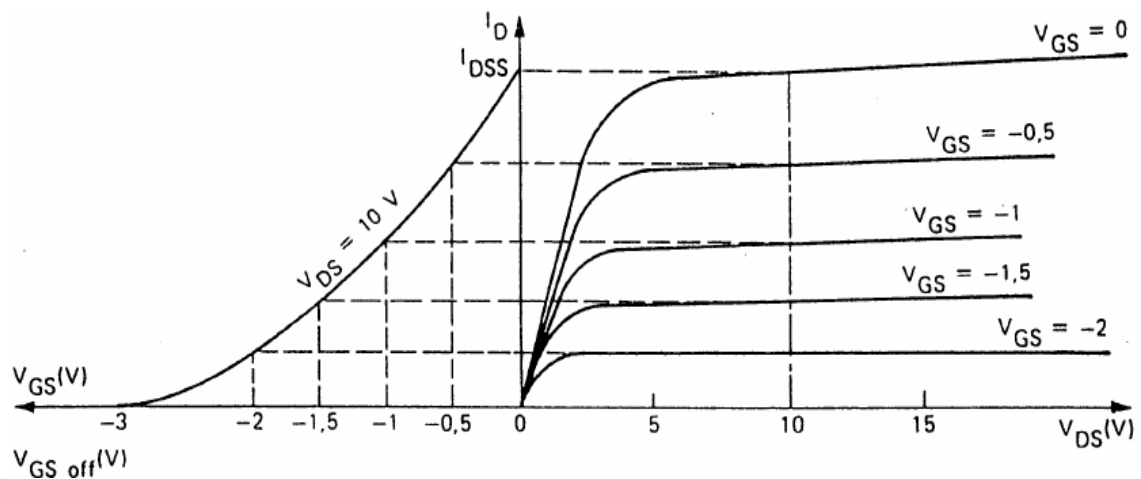
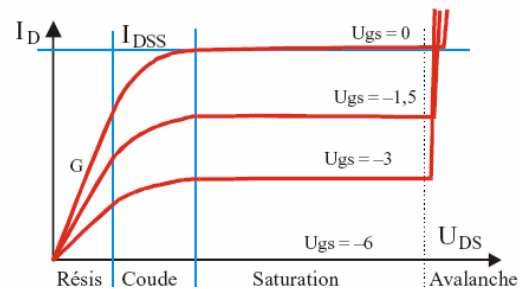
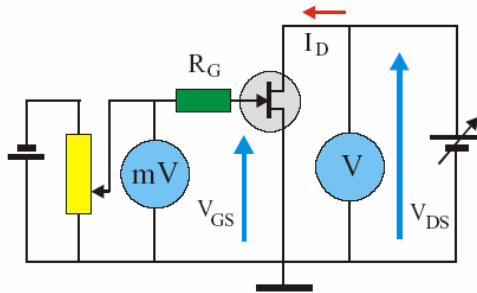
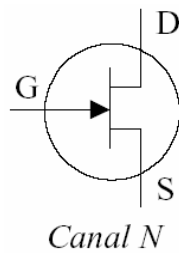
- **Conclusions sur les mélangeurs à diode**

Les topologies de mélangeur à diode sont aujourd'hui bien connues et largement utilisées. Grâce à l'utilisation de la diode Schottky et de la topologie doublement équilibrée, il est possible d'obtenir des performances solides.

## V. Mélangeurs actif

### 1. Définition

Les mélangeurs actifs sont réalisés à partir de transistors à effet de champ ou bipolaire polarisés.



Ce réseau correspond aux courbes  $I_D = f(V_{GS})$  pour  $V_{DS} = \text{Constante}$ .

Les caractéristiques sont des droites pour la partie ohmique. Dans la zone de saturation pour les valeurs supérieures de  $V_{DS}$ , la caractéristique est parabolique et on peut écrire en première approximation que :

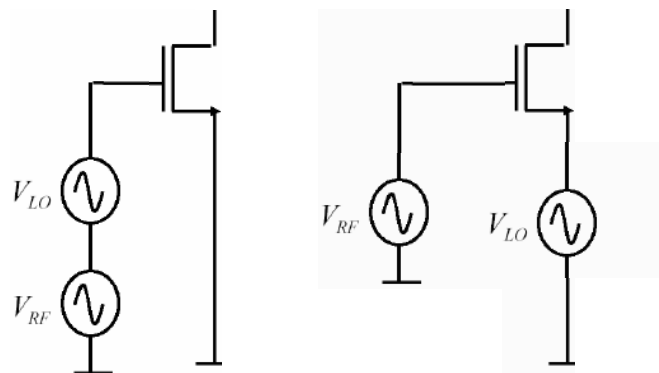
### MOSFET

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

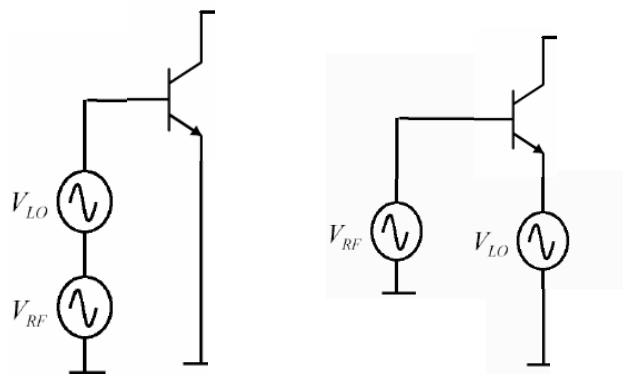
### JFET

$$i_D = K (v_{GS} - V_t)^2$$

## 2. Mélangeurs simples



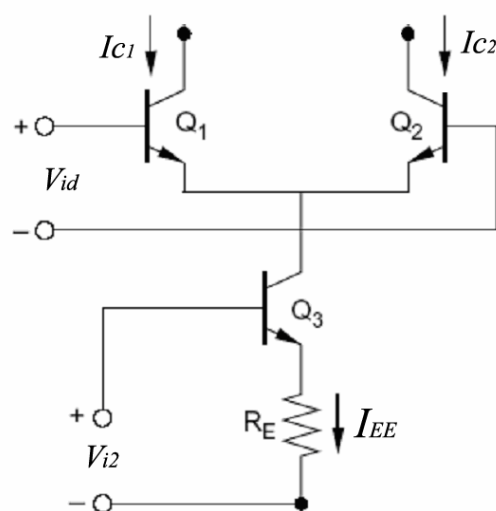
Mélangeurs simples (JFET)



Mélangeurs simples (transistors bipolaires)

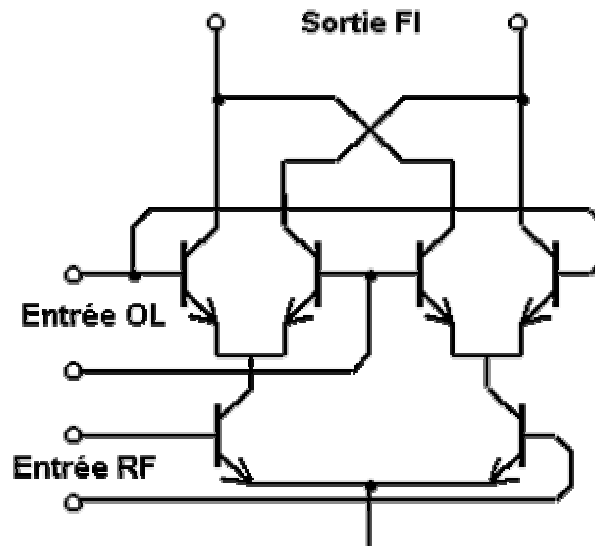
## 3. Mélangeurs simplement équilibrés

- Structure générale et principe de fonctionnement

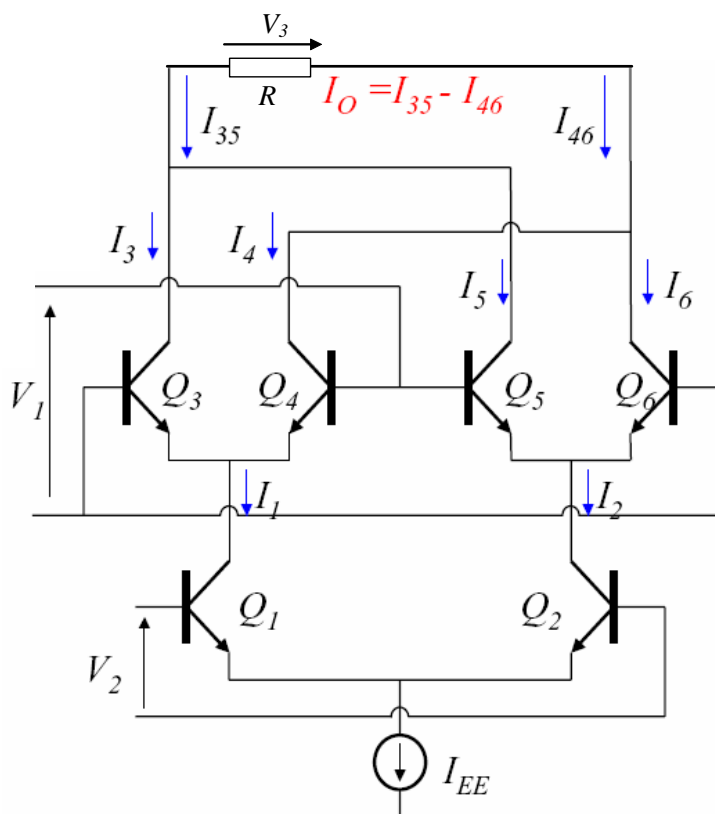




- Mélangeurs doublement équilibrés

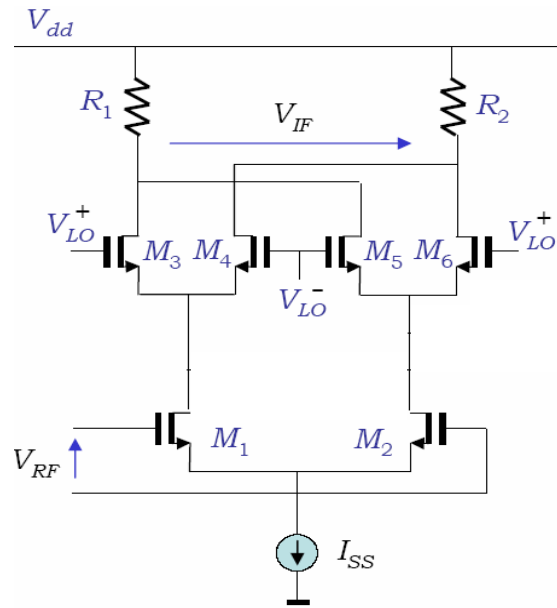


Mélangeur à cellule de Gilbert (transistors bipolaires)



On va montrer dans le TD que

$$\Delta I = I_{EE} \tanh(V_1 / 2V_T) \tanh(V_2 / 2V_T)$$



Mélangeur à cellule de Gilbert (JFET)

## VI. Conclusion

Différents composants non-linéaires peuvent être utilisés pour réaliser des mélangeurs : des diodes Schottky, des transistors à effet de champ et des transistors bipolaires. De manière générale, on peut classer les mélangeurs en deux grandes catégories: les mélangeurs résistifs qui sont réalisés à partir de diodes Schottky ou de FETs « froids » (travaillant dans la zone ohmique) et les mélangeurs actifs qui sont réalisés à partir de transistors « chauds » à effet de champ ou bipolaires.

D'autre part, les mélangeurs peuvent être réalisés à partir d'un seul dispositif non-linéaire mais on leur préfère souvent des structures équilibrées qui permettent d'obtenir des performances supérieures. De nombreuses variations sont possibles au niveau des topologies mises en oeuvre avec des performances associées plus ou moins satisfaisantes.