

Radiocommunications

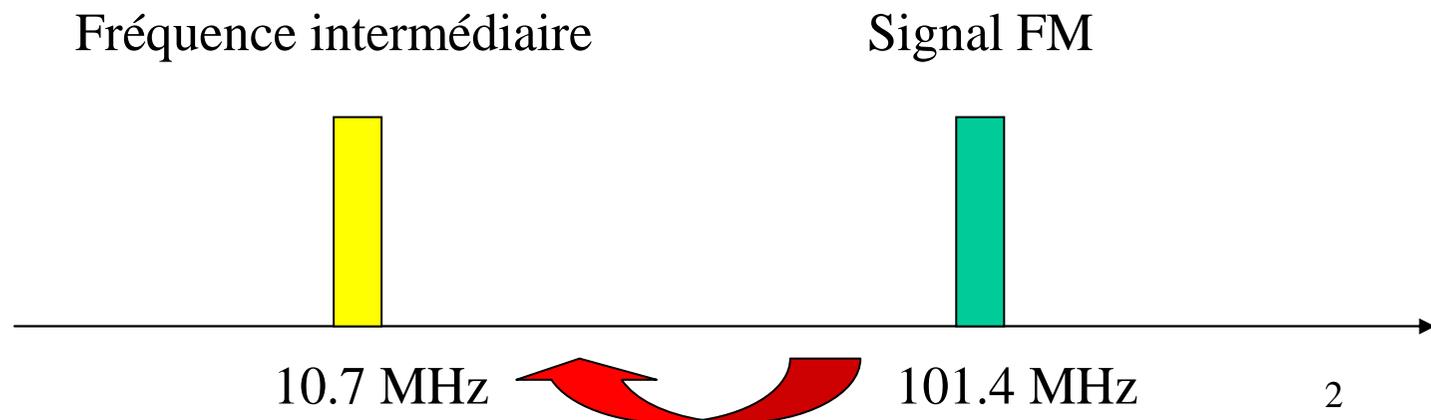
Transposition de fréquence Principe et applications

Joël Redoutey - 2009

Transposition de fréquence

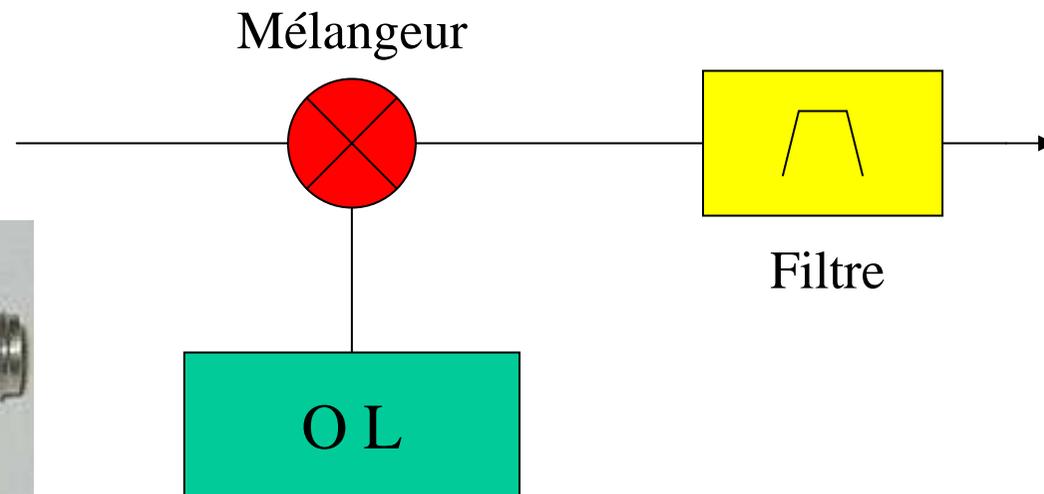
Le changement de fréquence est une opération fondamentale en radiocommunications. Elle consiste à traduire le spectre d'un signal, sans en altérer le contenu, soit vers une fréquence plus basse afin de le traiter plus facilement (**down conversion**), soit vers une fréquence plus élevée afin de le transmettre par voie hertzienne (**up conversion**).

Exemple Radio FM



Conversion de fréquence

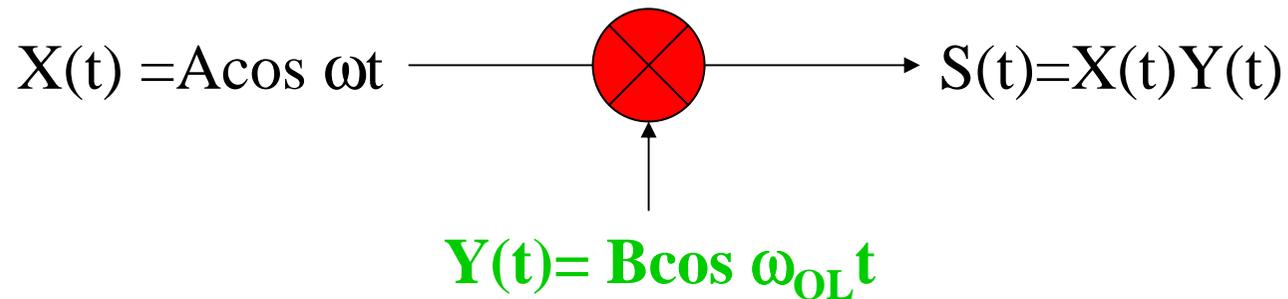
L'opération de changement de fréquence fait appel à un **oscillateur local** (OL) qui fixe la valeur de la translation en fréquence, à un dispositif **mélangeur** (mixer) qui effectue la translation et à des **filtres** pour éliminer les produits indésirables.



Principes de fonctionnement des mélangeurs

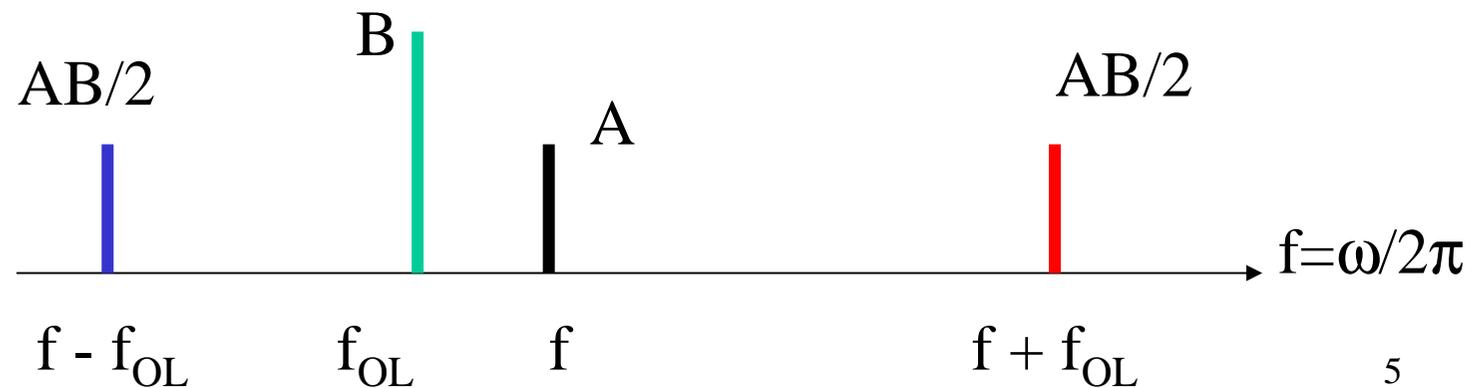
- **Mélangeur multiplicatif**
- **Mélangeur non linéaire**
- **Mélangeur à commutation**

Mélangeur multiplicatif

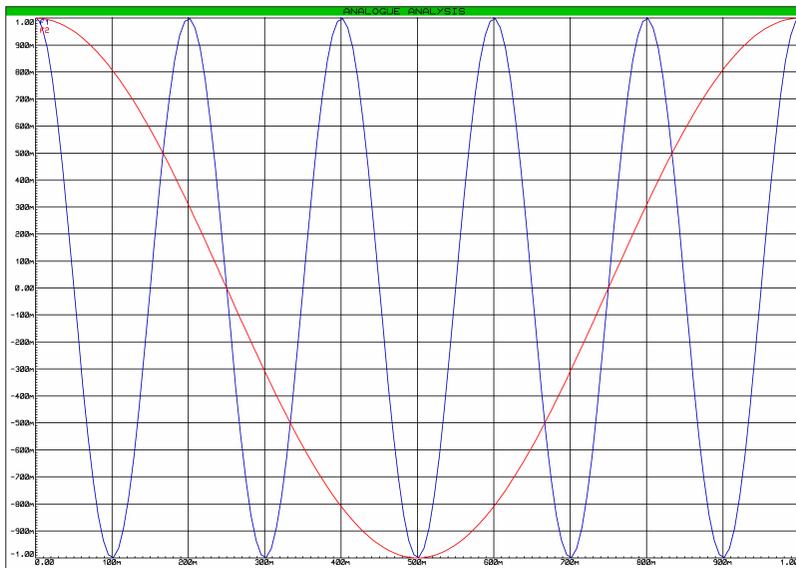


$$S(t) = AB \cdot \cos \omega t \cdot \cos \omega_{OL} t$$

$$S(t) = (AB/2) \cos(\omega - \omega_{OL})t + (AB/2) \cos(\omega + \omega_{OL})t$$



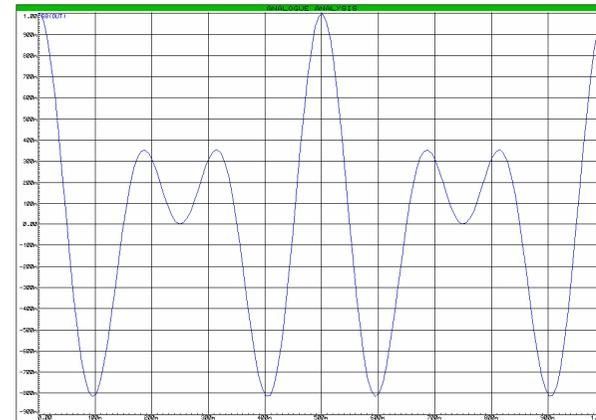
Formes d'ondes



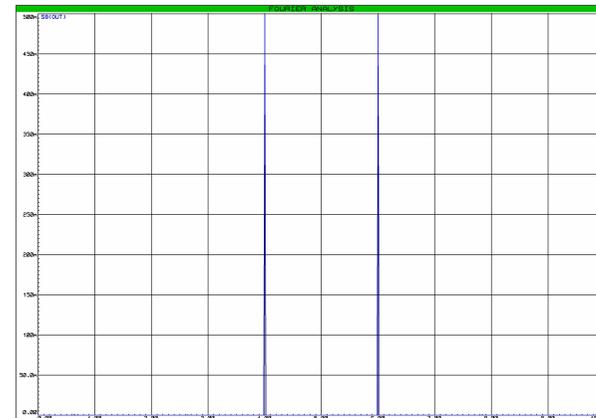
Signaux d'entrée

$$X(t) = \cos(2\pi t)$$

$$Y(t) = \cos(10\pi t)$$



Signal de sortie



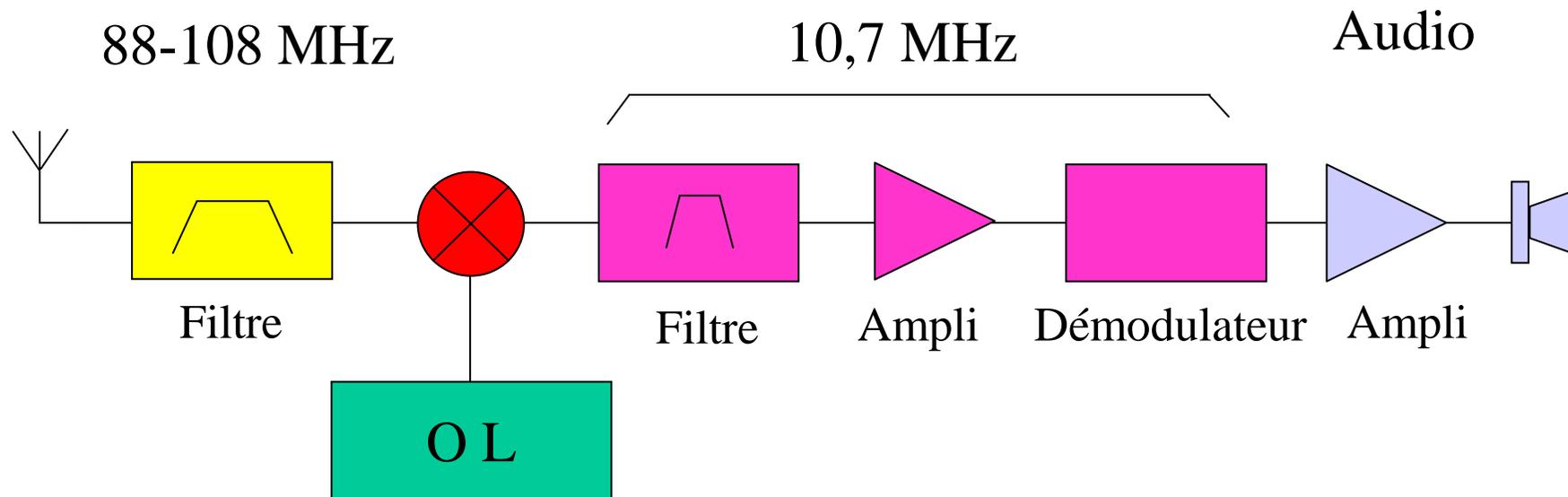
Propriétés de la conversion de fréquence

En sortie du mélangeur nous obtenons deux signaux dont les fréquences sont la **somme** et la **différence** des signaux d'entrée.

La sélection du battement inférieur (**infradyne**) ou supérieur (**supradyne**) s'effectue par **filtrage**.

On notera que **la translation de fréquence conserve le spectre** du signal incident, la modulation est donc conservée.

Exemple: Récepteur radio FM



Fréquence de l'OL pour recevoir RTL sur 101,4 MHz ?

Réception de RTL sur 101,4 MHz

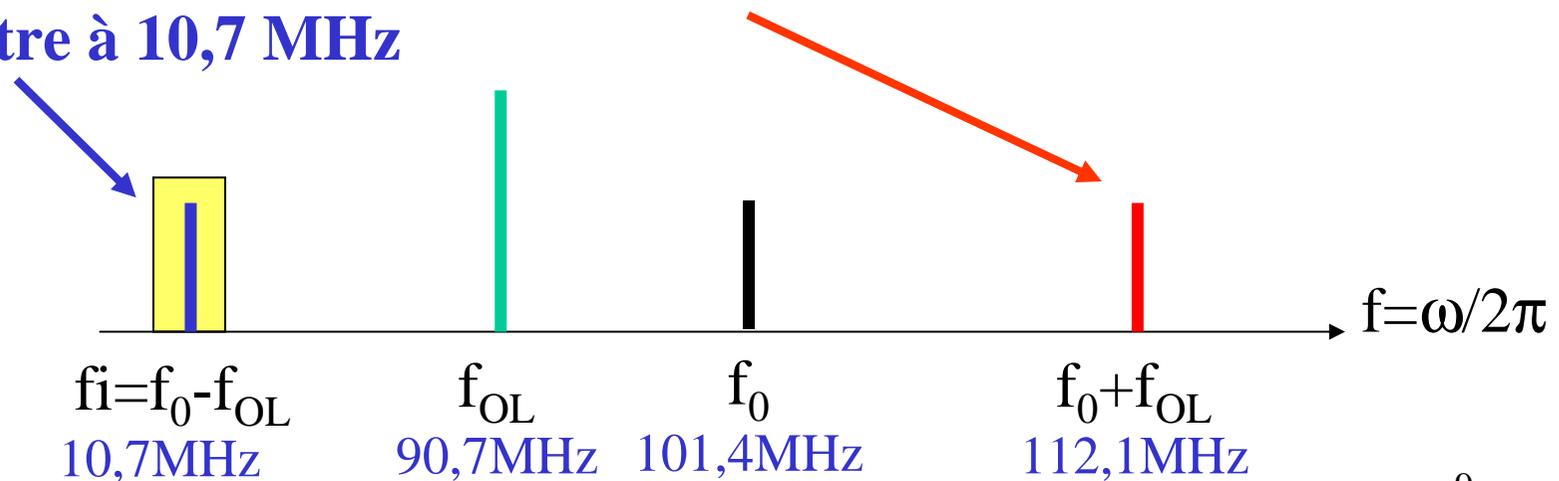
On utilise le battement infradyne

Fréquence intermédiaire $f_i = 10,7$ MHz (valeur normalisée)

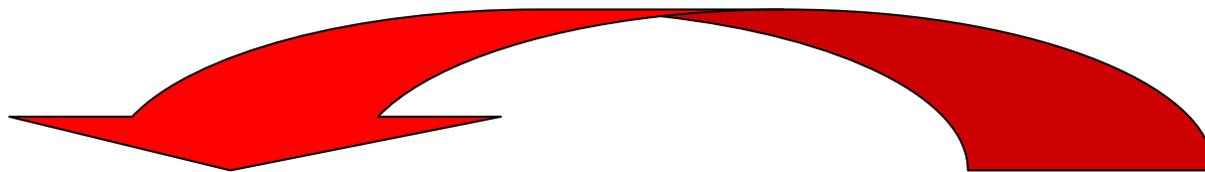
Fréquence à recevoir $f_0 = 101,4$ MHz

Fréquence de l'oscillateur local $f_{OL} = 101,4 - 10,7 = 90,7$ MHz

Le **battement supradyn** (112,1 MHz) est éliminé par le **filtre à 10,7 MHz**

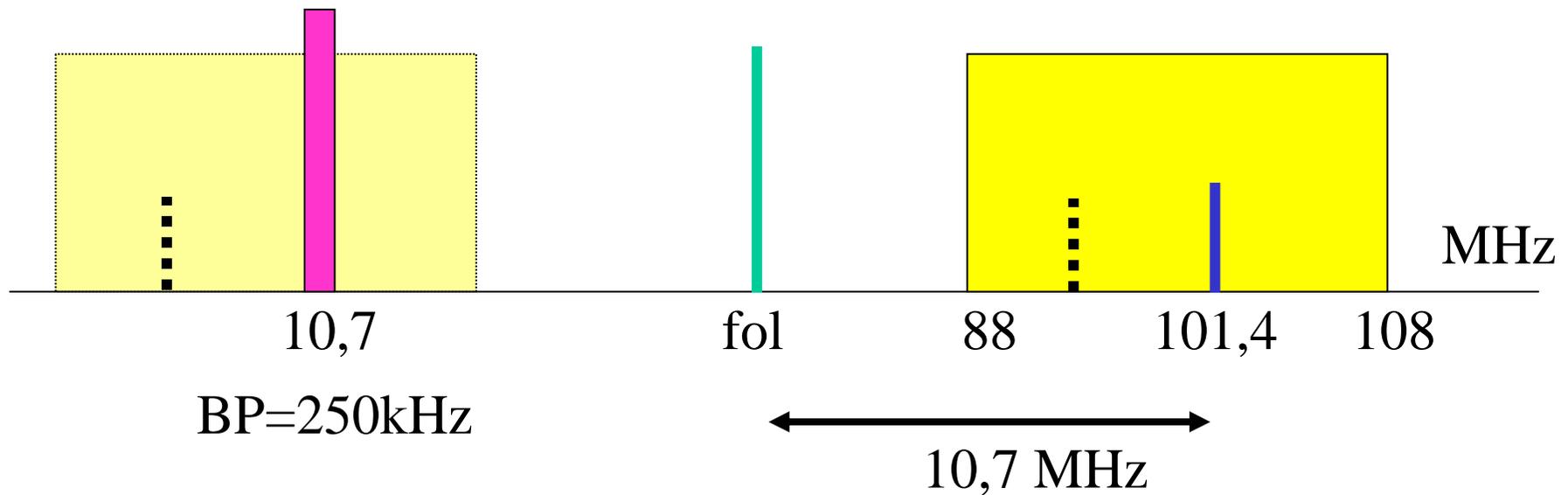


Sélection des fréquences

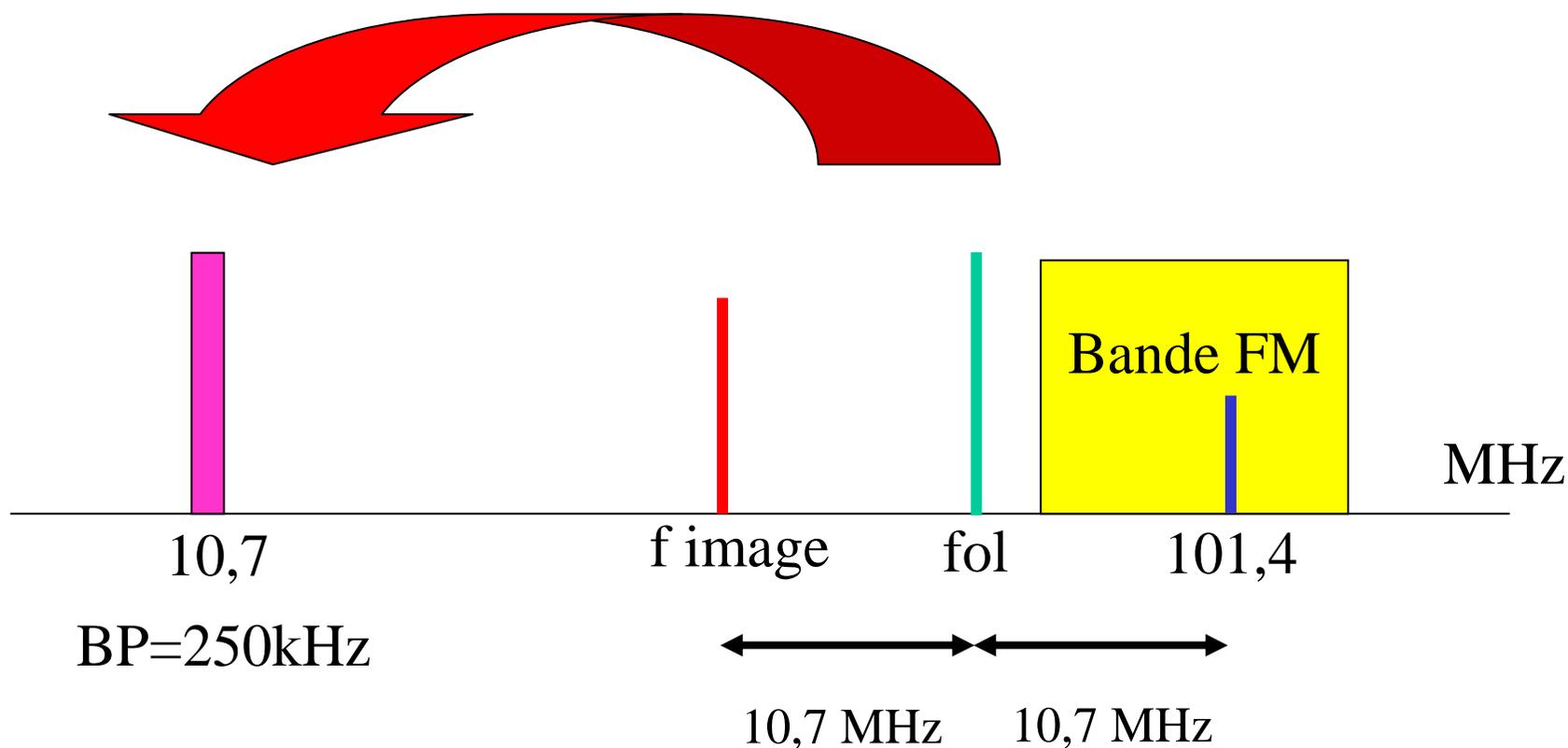


Bande FM transposée

Bande FM



Fréquence image



$$f_{\text{image}} = f_{\text{oscillateur local}} - \text{fréquence intermédiaire}$$

Exemple: $F=107,7\text{MHz}$

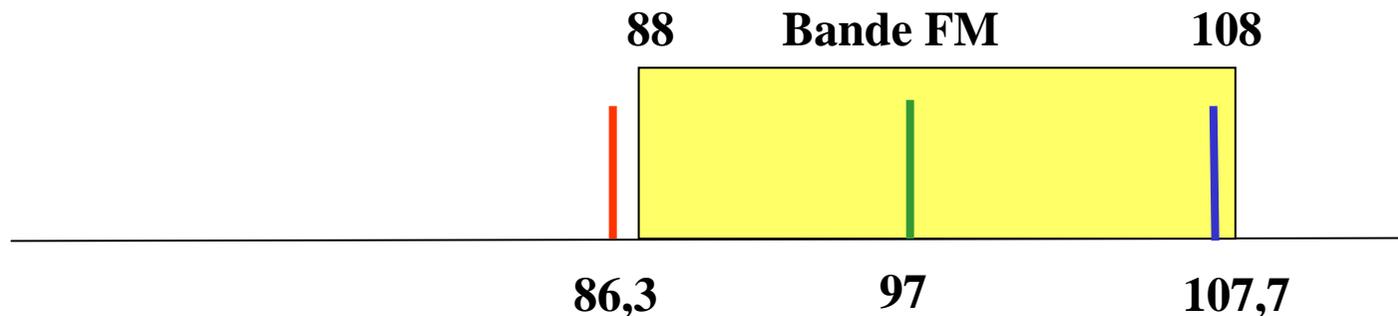
Fréquence intermédiaire $f_i = 10,7\text{ MHz}$ (valeur normalisée)

Fréquence à recevoir $f_{rf} = 107,7\text{ MHz}$ (radio trafic autoroutes)

Fréquence de l'oscillateur local $f_{ol}=107,7-10,7 = 97\text{ MHz}$

Fréquence image $f_{im}=97 - 10,7 = 86,3\text{ MHz}$

La fréquence image est très proche du début de la bande à recevoir (bande FM : 88 à 108 MHz) → difficulté de filtrage



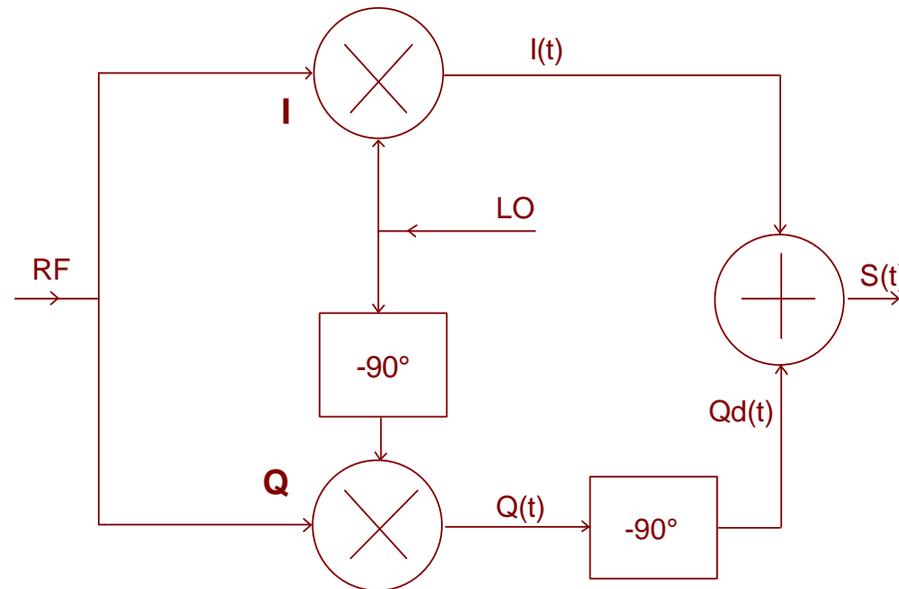
Réjection de la fréquence image

Une réjection correcte de la fréquence image nécessite un filtrage avant mélange pour ne laisser parvenir au mélangeur que la bande de fréquences désirée.

Dans certains cas on peut utiliser une fréquence intermédiaire élevée (voire supérieure à la fréquence à recevoir).

L'utilisation d'un mélangeur à réjection de la fréquence image est une solution élégante à ce problème.

Mélangeur à réjection de la fréquence image



Le signal est appliqué à deux voies en quadrature qui sont ensuite sommées

Mélangeur à réjection de la fréquence image

Cas du signal incident utile

Signal RF incident: $V_i = V \cos \omega_i t$

Oscillateur local : $V_{LO} = \cos(\omega_{LO} t)$.

Battement infradyne : $\omega_i > \omega_{LO}$, soit $(\omega_i - \omega_{LO}) > 0$.

Voie I (en phase)

$$I(t) = V \cos \omega_i t \cdot \cos \omega_{LO} t = (V/2)[\cos(\omega_i - \omega_{LO})t + \cos(\omega_i + \omega_{LO})t]$$

Voie Q (en quadrature)

$$Q(t) = V \cos \omega_i t \cdot \cos(\omega_{LO} t - 90^\circ)$$

$$Q(t) = (V/2)[\cos \{(\omega_i - \omega_{LO})t + 90^\circ\} + \cos \{(\omega_i + \omega_{LO})t - 90^\circ\}]$$

Voie Qd (Q déphasée de -90°): $Qd(t) = (V/2)[\cos \{(\omega_i - \omega_{LO})t + 90^\circ - 90^\circ\} + \cos \{(\omega_i + \omega_{LO})t - 180^\circ\}]$

$$Qd(t) = (V/2)[\cos(\omega_i - \omega_{LO})t - \cos(\omega_i + \omega_{LO})t]$$

Sortie S(t) = I(t) + Qd(t)

$$S(t) = (V/2)[\cos(\omega_i - \omega_{LO})t + \cos(\omega_i + \omega_{LO})t] + (V/2)[\cos(\omega_i - \omega_{LO})t - \cos(\omega_i + \omega_{LO})t]$$

$$S(t) = V \cos(\omega_i - \omega_{LO})t$$

On constate qu'il y a **annulation du battement supradyn**

Mélangeur à réjection de la fréquence image

Cas de la fréquence image

Battement infradyne $\Rightarrow (\omega_{im} < \omega_{LO}), (\omega_{im} - \omega_{LO}) < 0$

$$I(t) = V \cos \omega_{im} t \cdot \cos \omega_{LO} t = (V/2) [\cos (\omega_{im} - \omega_{LO}) t + \cos (\omega_{im} + \omega_{LO}) t]$$

$$I(t) = (V/2) [\cos (\omega_{LO} - \omega_{im}) t + \cos (\omega_{im} + \omega_{LO}) t]$$

$$Q(t) = (V/2) [\cos \{(\omega_{LO} - \omega_{im}) t - 90^\circ\} + \cos \{(\omega_{im} + \omega_{LO}) t - 90^\circ\}]$$

$$Qd(t) = (V/2) [\cos \{(\omega_{LO} - \omega_{im}) t - 180^\circ\} + \cos \{(\omega_{im} + \omega_{LO}) t - 180^\circ\}]$$

$$Qd(t) = (V/2) [-\cos (\omega_{LO} - \omega_{im}) t - \cos (\omega_{im} + \omega_{LO}) t]$$

$$S(t) = (V/2) [\cos (\omega_{LO} - \omega_{im}) t + \cos (\omega_{im} + \omega_{LO}) t] \\ + (V/2) [-\cos (\omega_{LO} - \omega_{im}) t - \cos (\omega_{im} + \omega_{LO}) t]$$

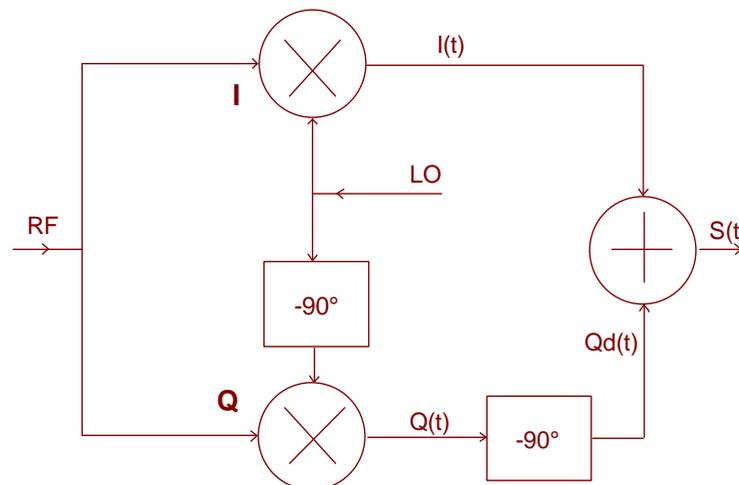
$$S(t) = 0$$

Il y a annulation de la fréquence image en sortie.

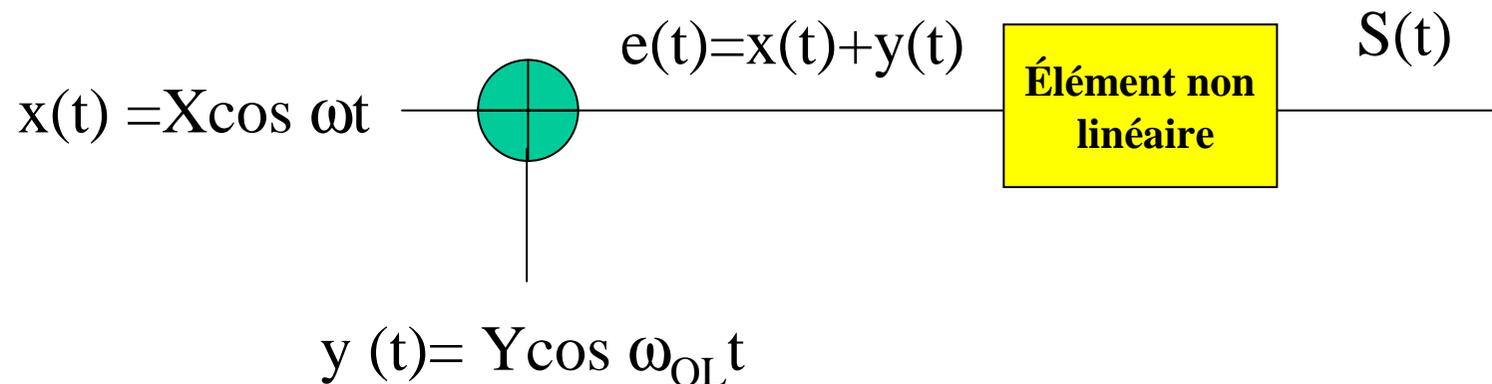
Mélangeur à réjection de la fréquence image

En configuration infradyne ($f_{OL} < f_{RF}$) il y a annulation:

- du battement supérieur ($f_{OL} + f_{RF}$)
- de la fréquence image



Mélange par non linéarité



On peut approximer la caractéristique de l'élément non linéaire par un polynôme du $n^{\text{ème}}$ degré

$$S(t) = Ae(t) + Be^2(t) + Ce^3(t) + \dots + Ke^n(t)$$

Mélange par non linéarité

$$S(t) = Ae(t) + Be^2(t) + Ce^3(t) + \dots + Ke^n(t)$$

$$e(t) = x(t) + y(t) = X \cos \omega t + Y \cos \omega_{01} t$$

$$\begin{aligned} S(t) = & AX \cos \omega t + AY \cos \omega_{01} t \\ & + BX^2 \cos^2 \omega t + 2 BXY \cos \omega t \cdot \cos \omega_{01} t + B Y^2 \cos^2 \omega_{01} t \\ & + CX^3 \cos^3 \omega t + 3CX^2 Y \cos^2 \omega t \cdot \cos \omega_{01} t \\ & + CY^3 \cos^3 \omega_{01} t + 3CXY^2 \cos \omega t \cdot \cos^2 \omega_{01} t + \dots \end{aligned}$$

En développant on fait apparaître des **produits de conversion** de la forme **$k(X, Y) \cos (m \omega t \pm n \omega_{01} t)$** où m et n sont deux entiers [0, 1, 2, 3, ...]

Exemple

$$F_{RF}: 101,4\text{MHz}$$

$$F_{OL} : 90,7\text{MHz}$$

$$F_i : 10,7 \text{ MHz}$$

En sortie de mélangeur on retrouve les produits suivants:

Premier ordre

$$F_{RF}: 101,4\text{MHz}$$

$$F_{OL} : 90,7\text{MHz}$$

Second ordre

$$2 F_{RF} = 202,8\text{MHz}$$

$$F_{RF} - F_{OL} = 10,7\text{MHz}$$

$$2 F_{OL} = 181,4\text{MHz}$$

$$F_{RF} + F_{OL} = 192,1\text{MHz}$$

Troisième ordre

$$3 F_{RF} = 304,2\text{MHz}$$

$$2F_{RF} - F_{OL} = 112\text{MHz} \quad 2F_{OL} - F_{RF} = 80\text{MHz}$$

$$3F_{OL} = 272,1\text{MHz}$$

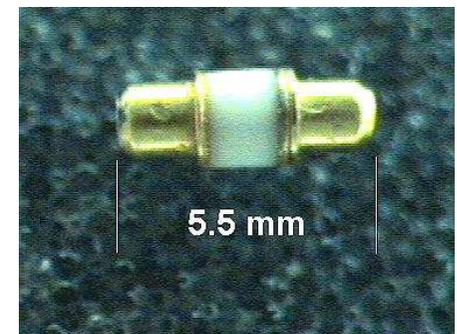
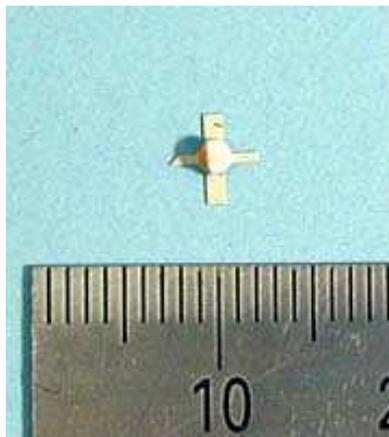
$$2F_{RF} + F_{OL} = 293,5\text{MHz} \quad 2F_{OL} + F_{RF} = 282,8\text{MHz}$$

Nécessité d'un filtrage efficace de la fréquence intermédiaire

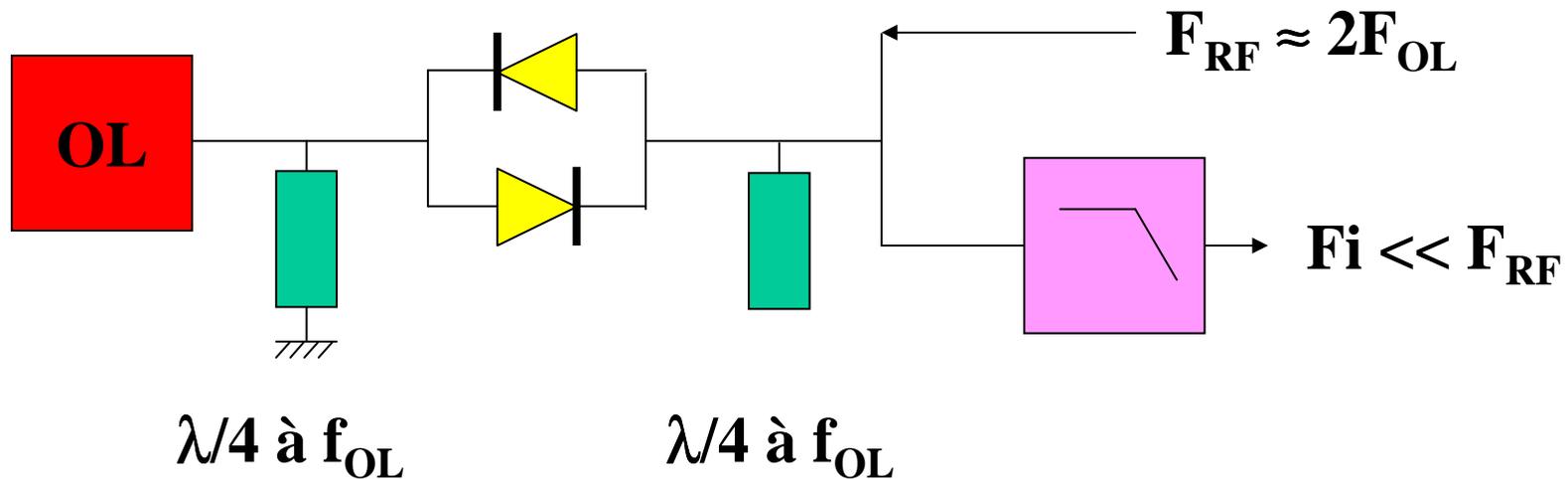
Mélangeurs non linéaires

**Tout élément non linéaire peut être utilisé comme mélangeur.
On utilise fréquemment:**

- **Diode (surtout en hyperfréquences)**
- **Transistor bipolaire**
- **Transistor à effet de champ**



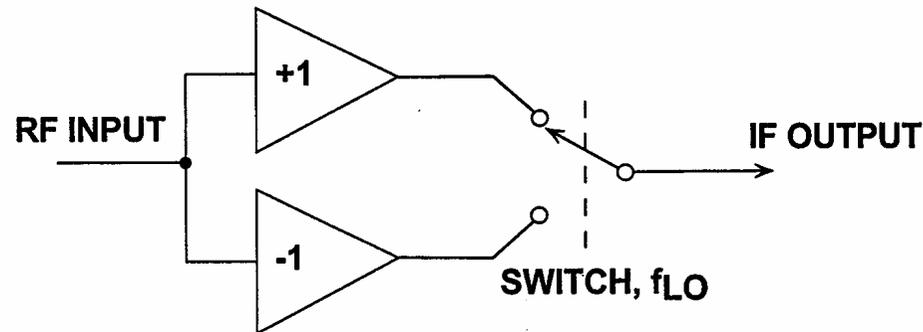
Mélangeur sous harmonique



$$F_i = F_{RF} - 2F_{OL} \quad \text{ou} \quad F_i = 2F_{OL} - F_{RF}$$

Très utilisé en hyperfréquences

Mélangeur à commutation



Le signal RF est alternativement connecté à la sortie en phase puis en opposition de phase, au rythme de l'oscillateur local.

$$S_{LO}(t) = (4/\pi) [\sin\omega_{LO}t - (1/3).\sin3\omega_{LO}t + (1/5)\sin5\omega_{LO}t - \dots]$$

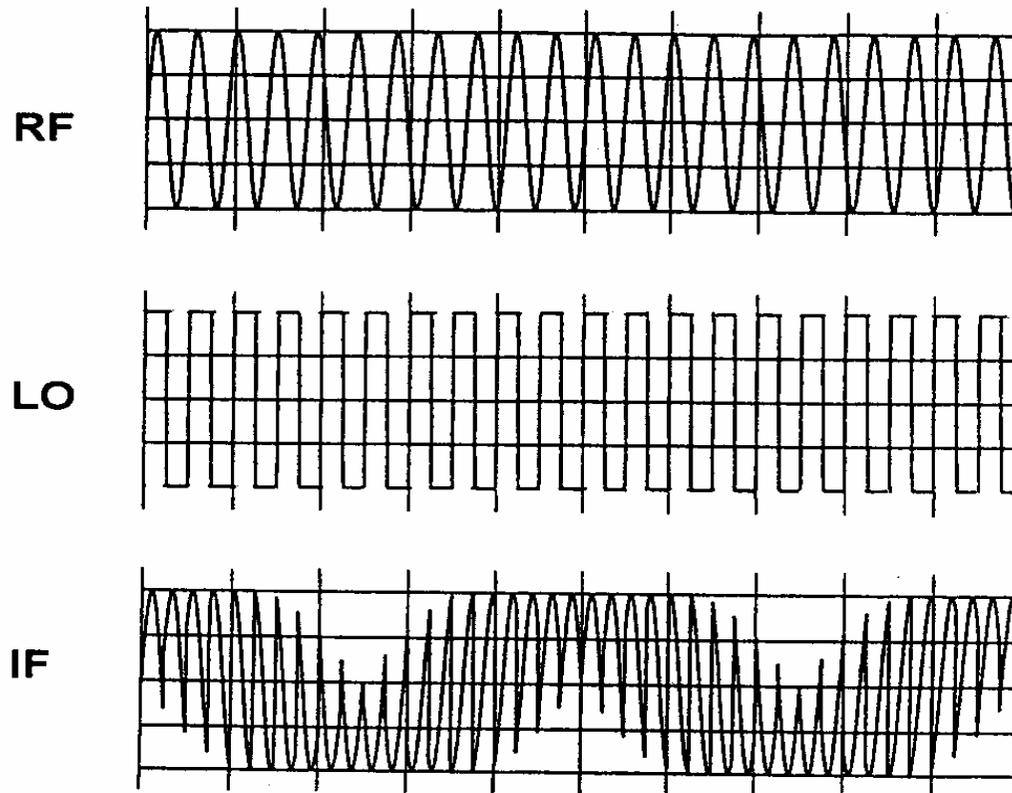
$$S_{RF}(t) = A.\sin\omega_{RF}t$$

$$S_{IF}(t) = S_{RF}(t).S_{LO}(t)$$

$$S_{IF}(t) = (2A/\pi) [\cos(\omega_{RF} - \omega_{LO})t - \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO})t - (1/3)(\cos(\omega_{RF} - 3\omega_{LO})t - \cos(\omega_{RF} + 3\omega_{LO})t) + (1/5)(\cos(\omega_{RF} - 5\omega_{LO})t - \cos(\omega_{RF} + 5\omega_{LO})t) + \dots]$$

Formes d'ondes

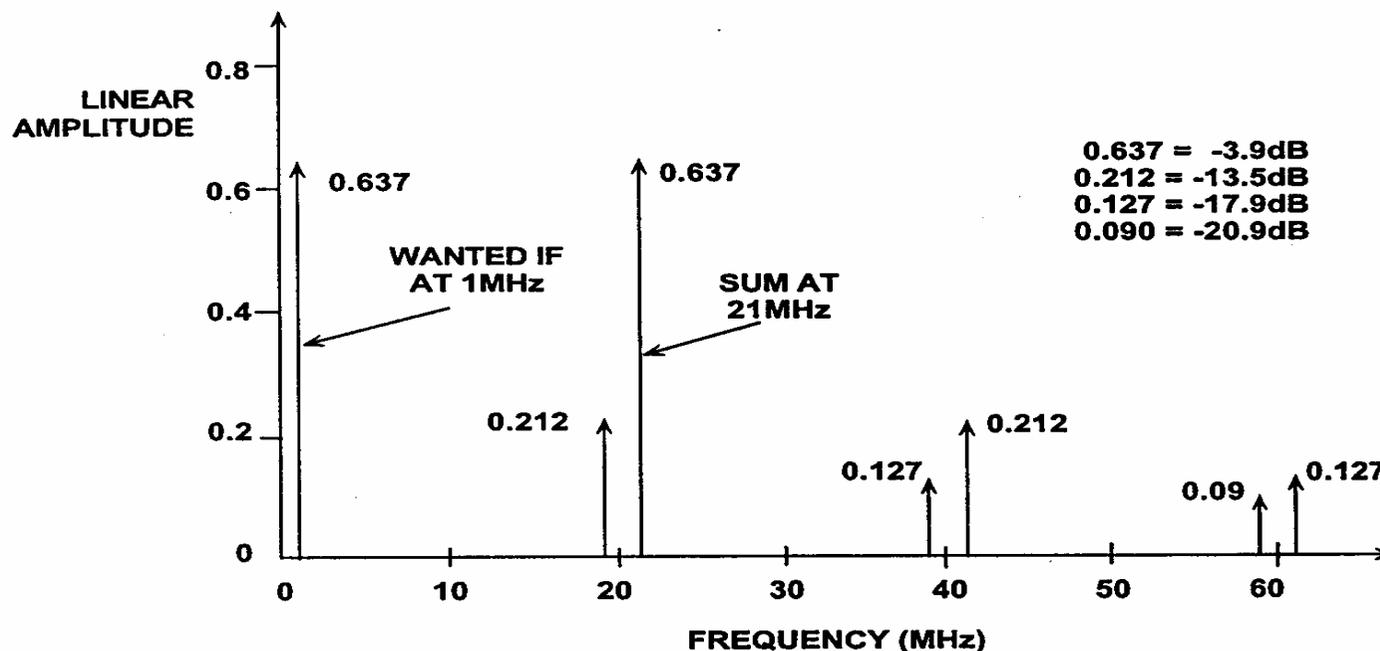
**INPUTS AND OUTPUT FOR IDEAL SWITCHING MIXER
FOR $f_{RF} = 11\text{MHz}$, $f_{LO} = 10\text{MHz}$**



**Horizontal:
200ns/div.**

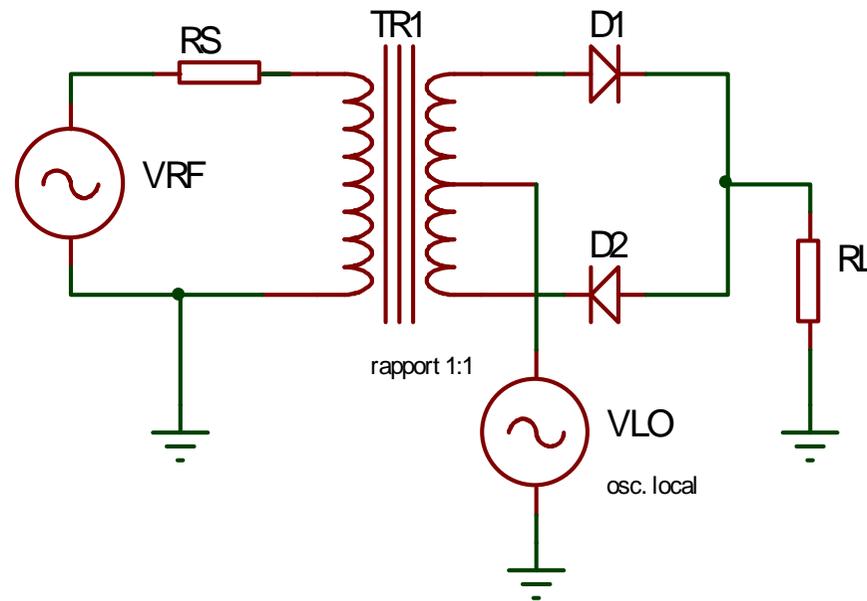
Spectre d'un mélange à commutation

OUTPUT SPECTRUM FOR SWITCHING MIXER
FOR $f_{RF} = 11\text{MHz}$ AND $f_{LO} = 10\text{MHz}$



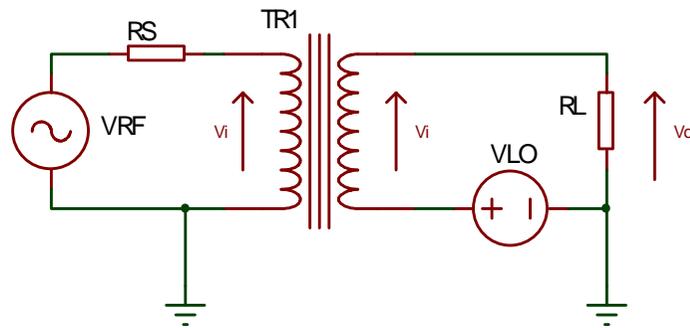
Le spectre se compose des battements entre la fréquence d'entrée ω_{RF} et les harmoniques impairs de la fréquence de l'oscillateur local ω_{LO} .

Mélangeur équilibré à diodes



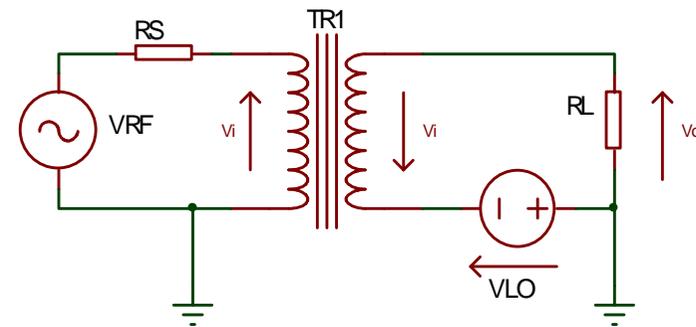
L'oscillateur local (OL) rend alternativement conductrices les diodes D1 et D2. Quand D1 conduit, D2 est bloquée et vice versa. La puissance de l'OL doit être suffisante.

Mélangeur équilibré à diodes



Alternance positive de l'OL

$$V_O = V_{LO} + V_i$$

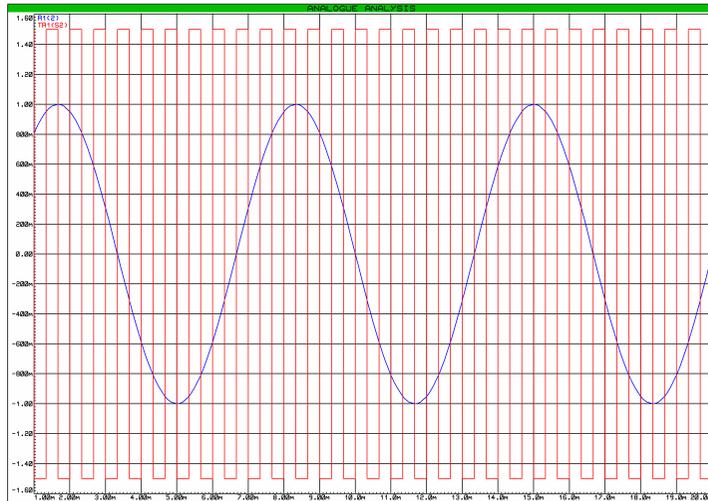


Alternance négative de l'OL

$$V_O = V_{LO} - V_i$$

**La tension de l'OL est toujours présente en sortie:
Nécessité d'un filtrage efficace**

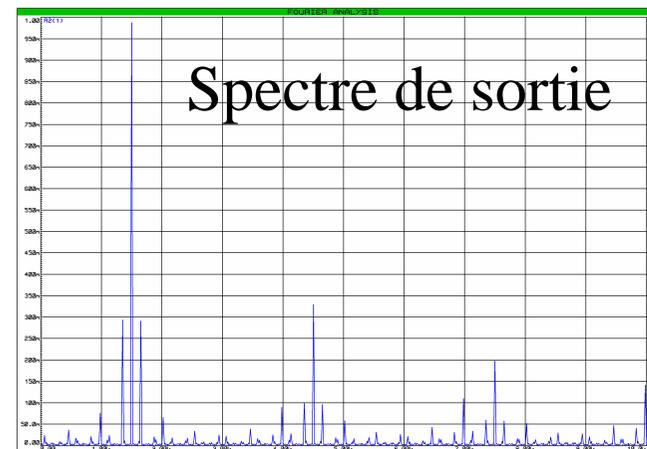
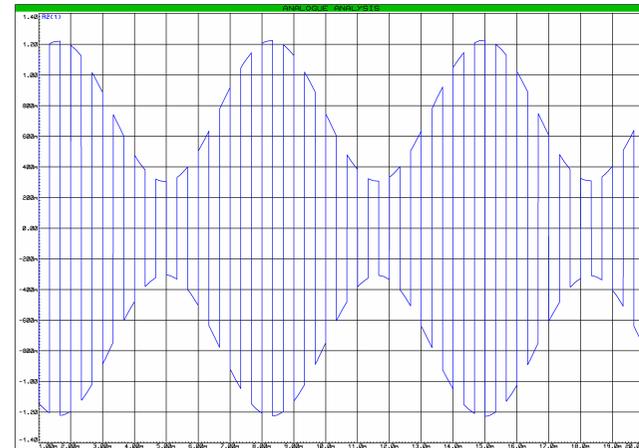
Formes d'ondes



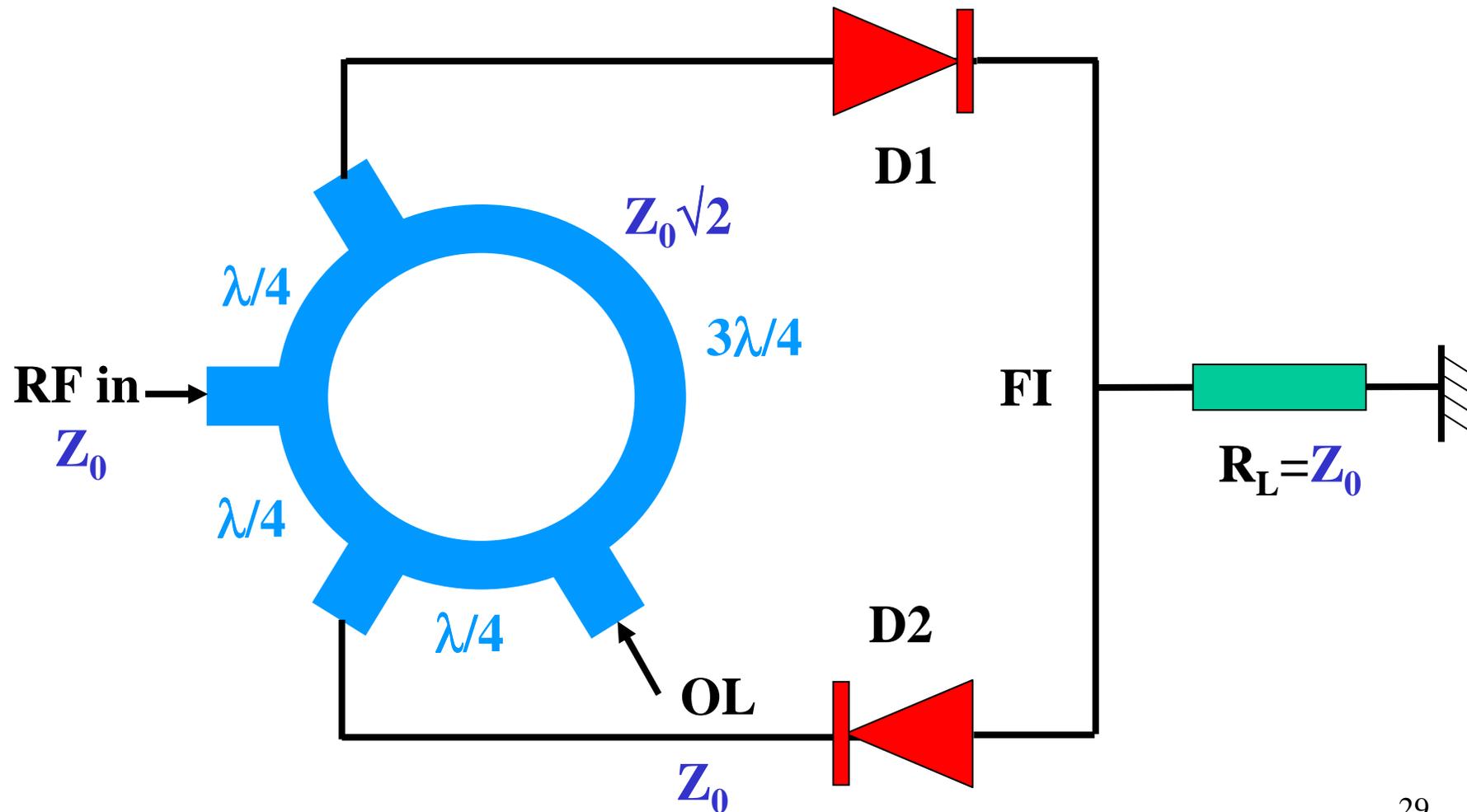
Signaux d'entrée

$$F_{ol} = 1500$$

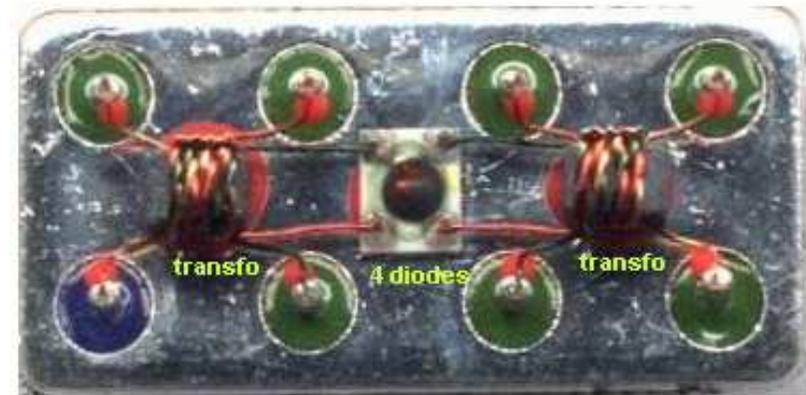
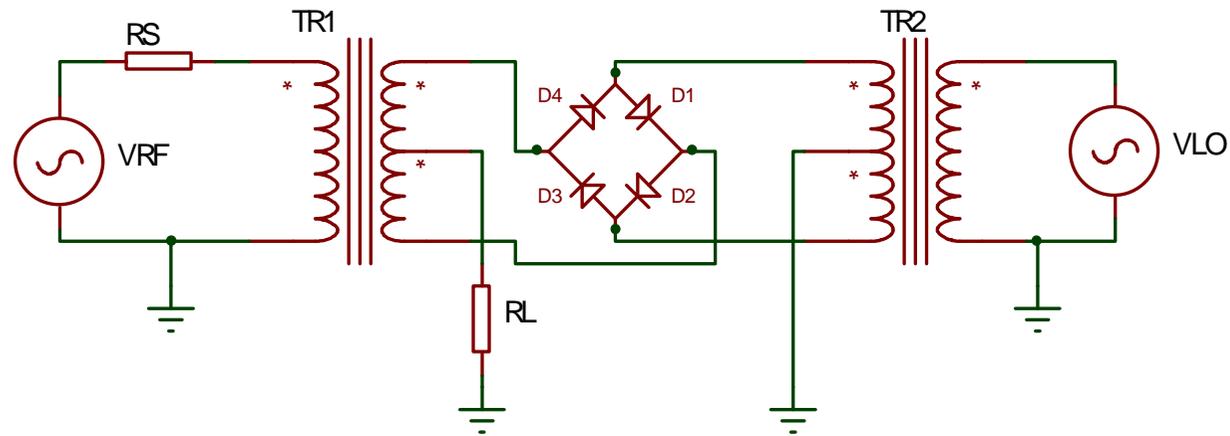
$$F_{rf} = 150$$



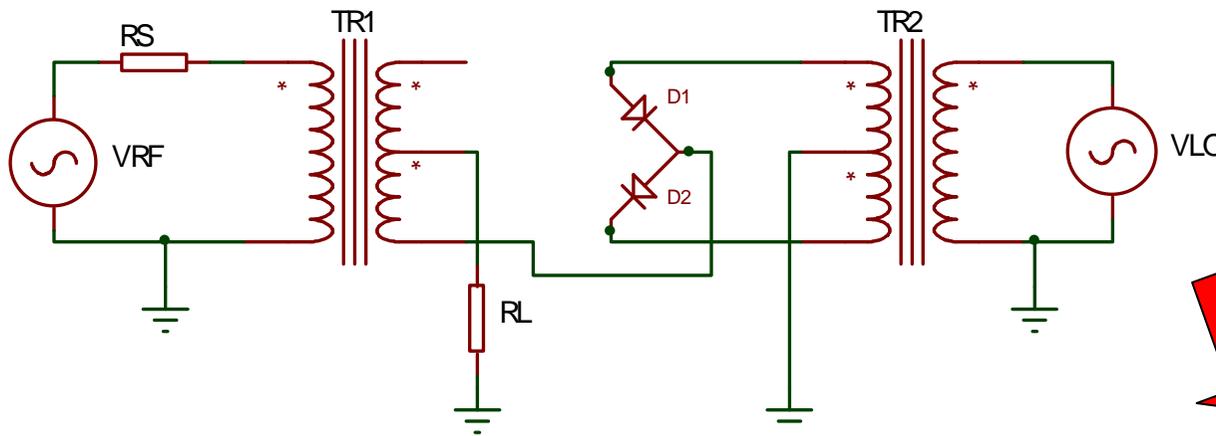
En hyperfréquences : Rat race mixer



Mélangeur en anneau



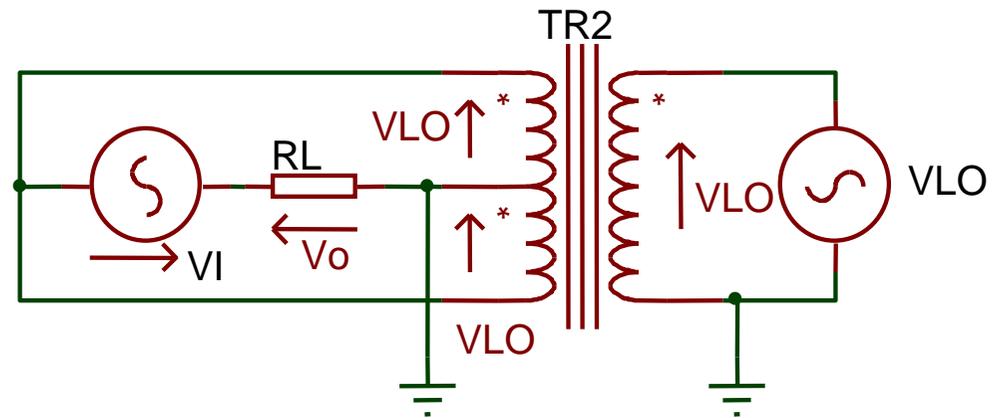
Alternance positive de l'OL



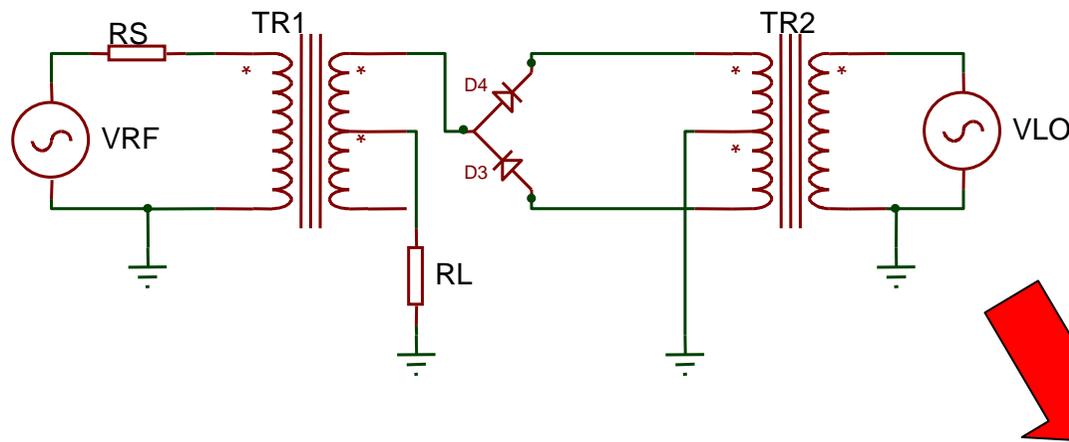
D3 et D4 sont bloquées

Maille du haut
 $V_{LO} = -V_i + V_o$
 Maille du bas
 $-V_{LO} = -V_i + V_o$

$$V_o = V_i$$



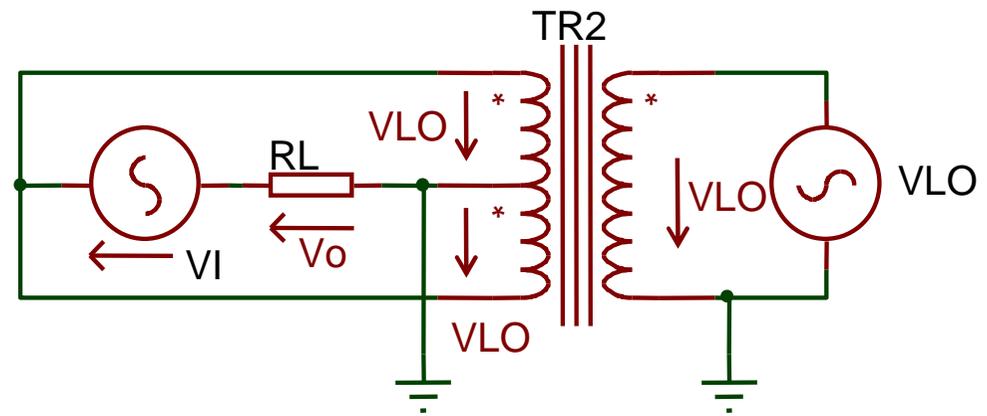
Alternance négative de l'OL



D1 et D2 sont Bloquées

Maille du haut
 $-V_{LO} = V_i + V_o$
 Maille du bas
 $V_{LO} = V_i + V_o$

$$V_o = -V_i$$



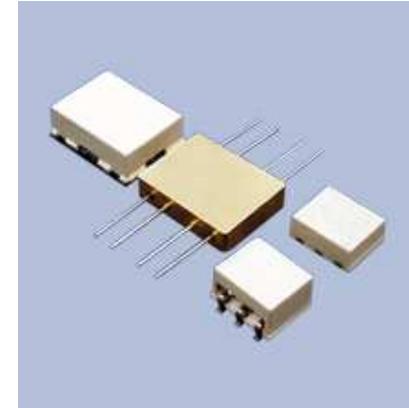
Mélangeur en anneau

Signal d'entrée

$$V_i(t) = V \sin \omega_{RF} t$$

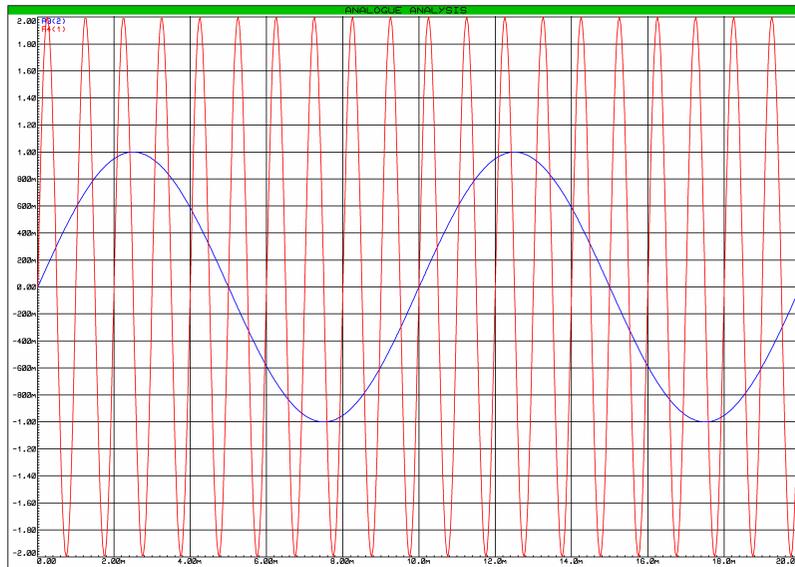
Signal de sortie

$$V_o = - (2V/\pi) [\cos(\omega_{RF} - \omega_{LO})t - \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO})t - (1/3)(\cos(\omega_{RF} - 3\omega_{LO})t - \cos(\omega_{RF} + 3\omega_{LO})t) + (1/5)(\cos(\omega_{RF} - 5\omega_{LO})t - \cos(\omega_{RF} + 5\omega_{LO})t) + \dots]$$



Le spectre se compose uniquement des battements entre la fréquence d'entrée ω_{RF} et les harmoniques impairs de la fréquence de l'oscillateur local ω_{LO} .

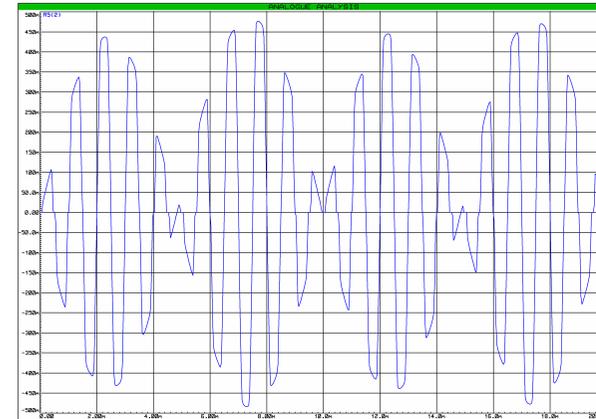
Formes d'ondes



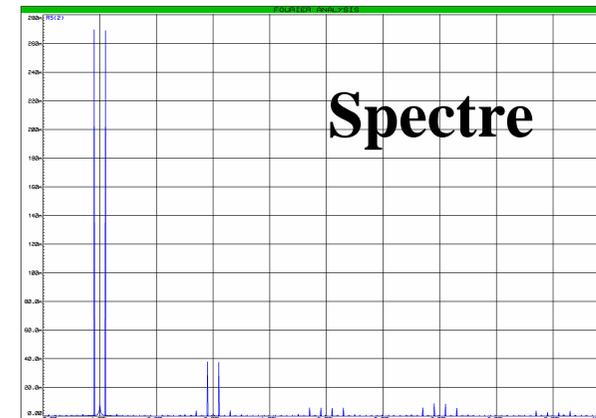
Signaux d'entrée

$$F_{OL} = 1000$$

$$F_{RF} = 100$$

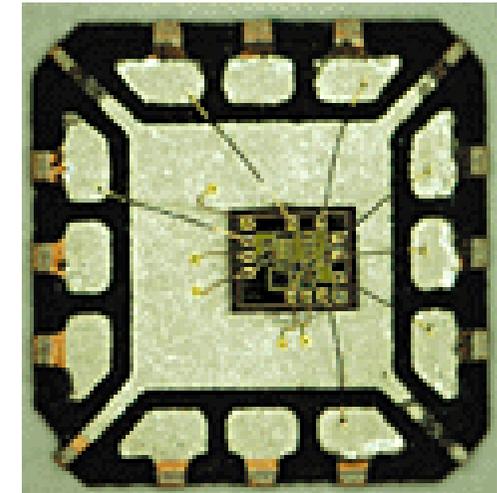
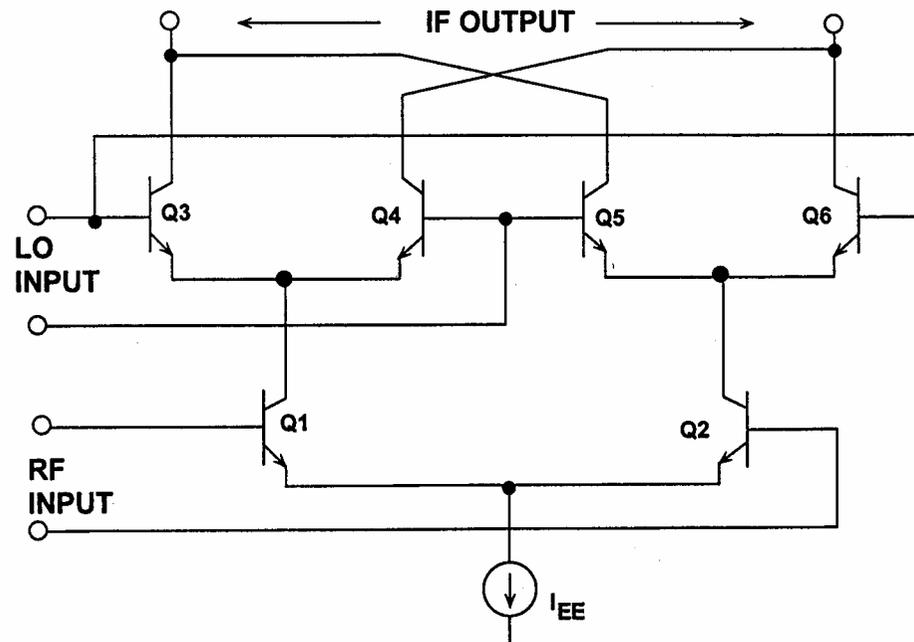


Signal de sortie



Spectre

Mélangeur actif : la cellule de Gilbert

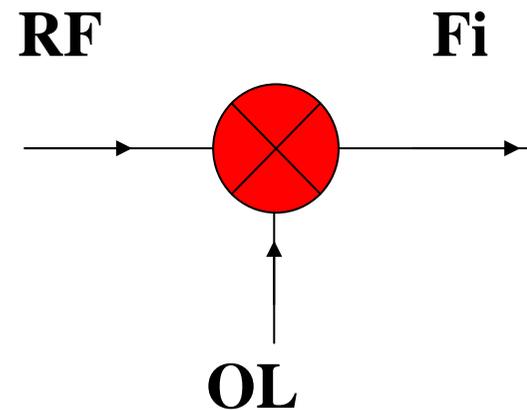


Le circuit se compose d'un amplificateur différentiel (Q1-Q2), recevant le signal d'entrée (RF), dont les collecteurs sont commutés au rythme de l'oscillateur local.

Quand Q3 et Q6 conduisent, Q4 et Q5 sont bloqués et vice versa.

Grandeurs caractéristiques des mélangeurs

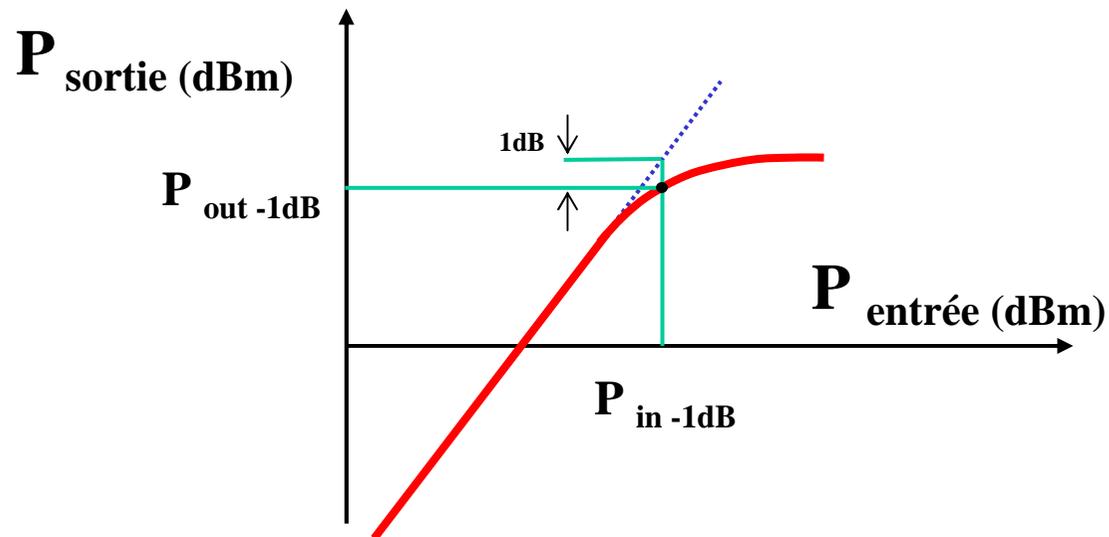
- **Perte de conversion** $L_c(\text{dB}) = 10 \log(P_{\text{RF}}/P_{\text{fi}}) = P_{\text{RF}}(\text{dBm}) - P_{\text{fi}}(\text{dBm})$
- **Isolations entre les accès** $I_{\text{OL/RF}} = P_{\text{RF}}(\text{dBm}) - P_{\text{OL}}(\text{dBm})$
- **Réjections des signaux en sortie (OL, fréquence image,...)**
- **Facteur de bruit**
- **Linéarité et dynamique**



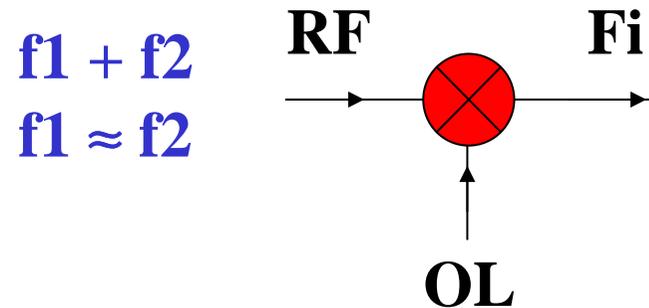
Point de compression à -1 dB

Les mélangeurs sont sujets au phénomène de **saturation de la puissance de sortie** pour de fortes puissances d'entrée.

Le point de compression à 1dB caractérise la limite du fonctionnement linéaire du circuit en fonctionnement monoporteuse (un seul signal RF).



Distorsion d'intermodulation



A cause de la non linéarité du mélangeur, le spectre de sortie comprend un grand nombre de raies dont les fréquences sont:

$$m.F_{OL} \pm n_1.f_1 \pm n_2.f_2 \quad \text{avec } (m, n_1, n_2) \text{ entiers positifs}$$

Les fréquences issues du battement entre les fréquences f_1 et f_2 sont appelées **produits d'intermodulation d'ordre (n_1+n_2)**

Les produits d'intermodulation d'ordre impair sont les plus gênants, notamment ceux du troisième ordre.

Produits d'intermodulation du troisième ordre (IM3)

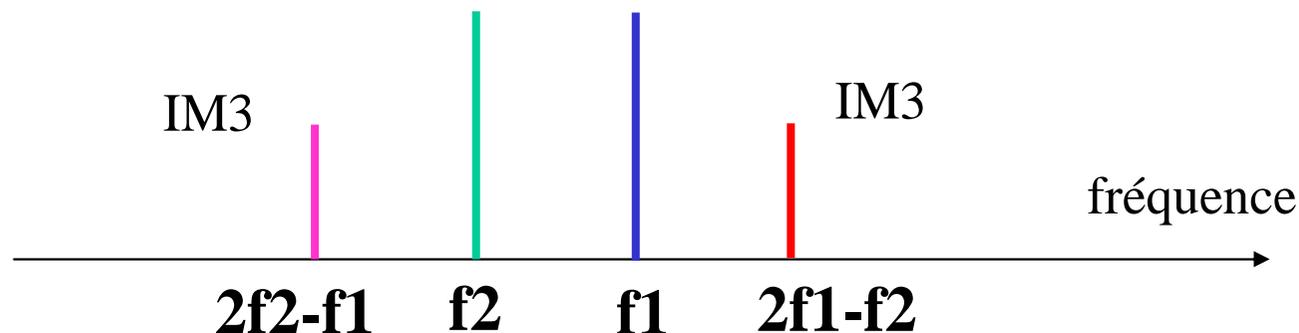
Si f_1 et f_2 sont proches, leurs produits d'intermodulation du troisième ordre $2f_1-f_2$ et $2f_2-f_1$ tombent souvent dans la bande utile, ce qui rend leur élimination difficile.

Exemple: Bande FM à Marseille (source www.csa.fr)

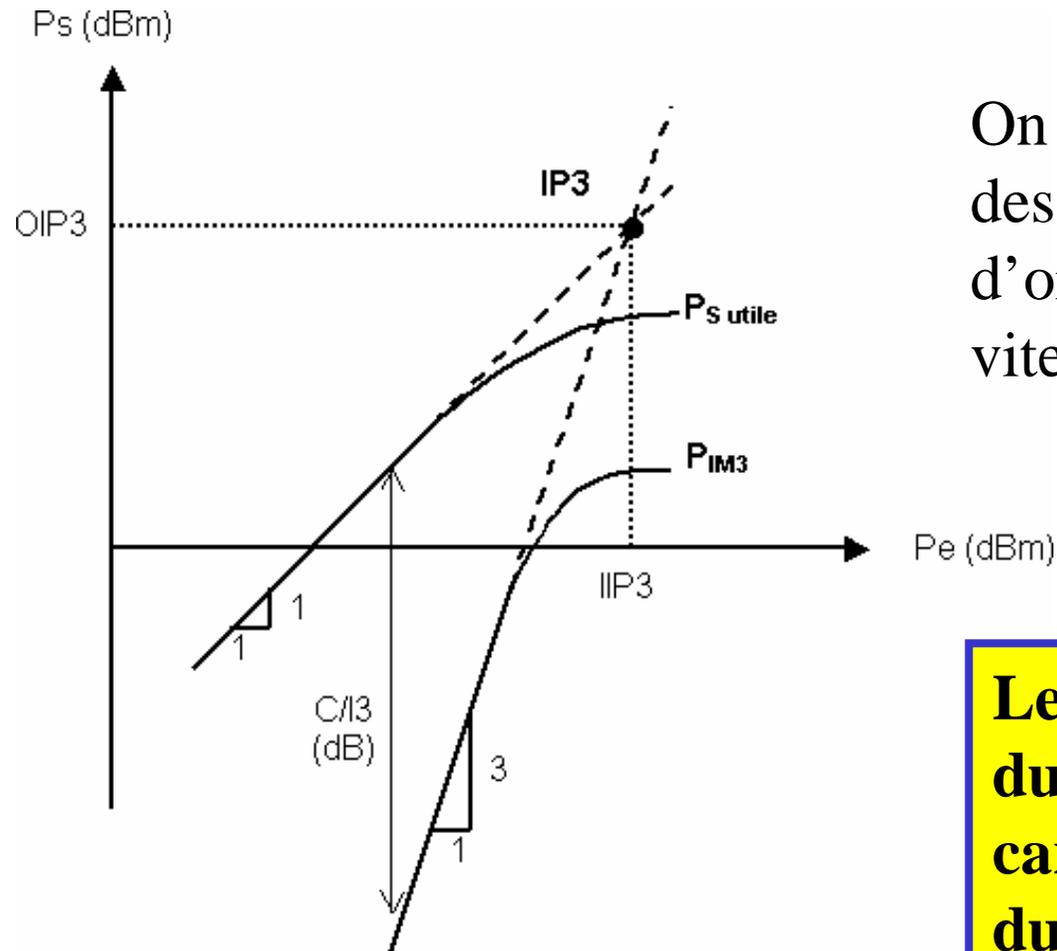
RTL: $f_1=101.4\text{MHz}$ Radio classique: $f_2=100.9\text{MHz}$

$2f_1-f_2= 101.9\text{MHz}$

$2f_2-f_1 = 100.4\text{MHz}$



Point d'interception du troisième ordre



On montre que l'amplitude des raies d'intermodulation d'ordre 3 croît 3 fois plus vite que le signal utile

Le point d'interception du troisième ordre $IP3$ caractérise la linéarité du dispositif.

Mélangeur en anneau vs Cellule de Gilbert

Mélangeur en anneau	Cellule de Gilbert
---------------------	--------------------

Avantages

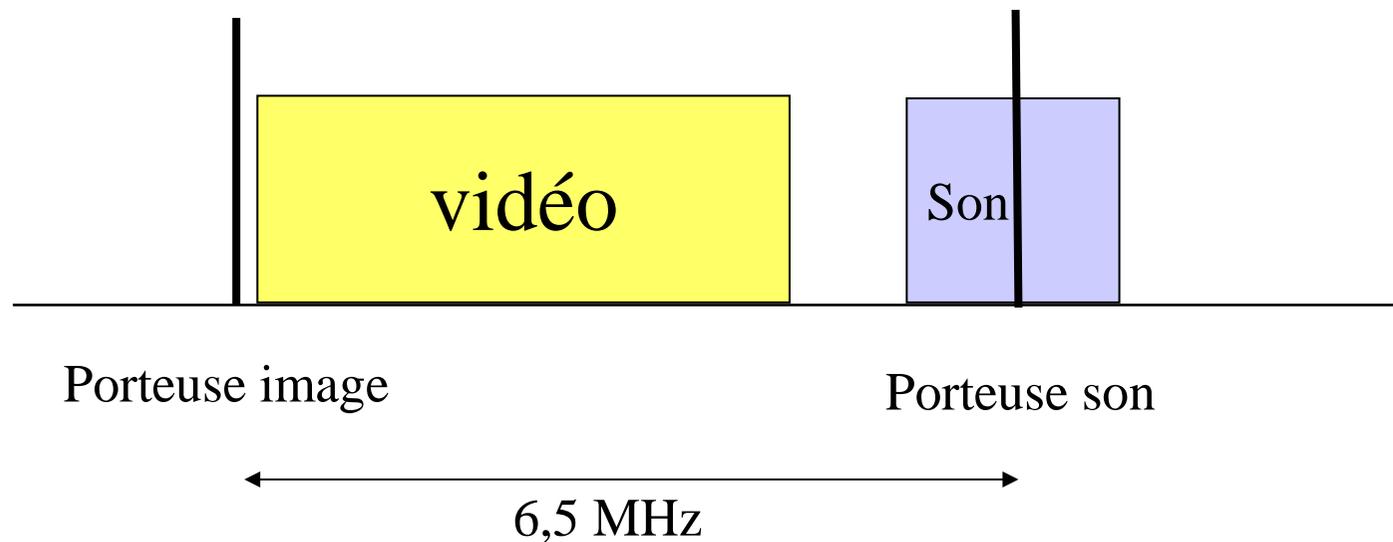
Très grande dynamique	Facilement intégrable
Bonne linéarité	Faible niveau d'OL
	Gain de conversion

Inconvénients

Fort niveau d'OL	Facteur de bruit
Perte de conversion	Faible dynamique
Non intégrable	Linéarité médiocre



Télévision hertzienne analogique

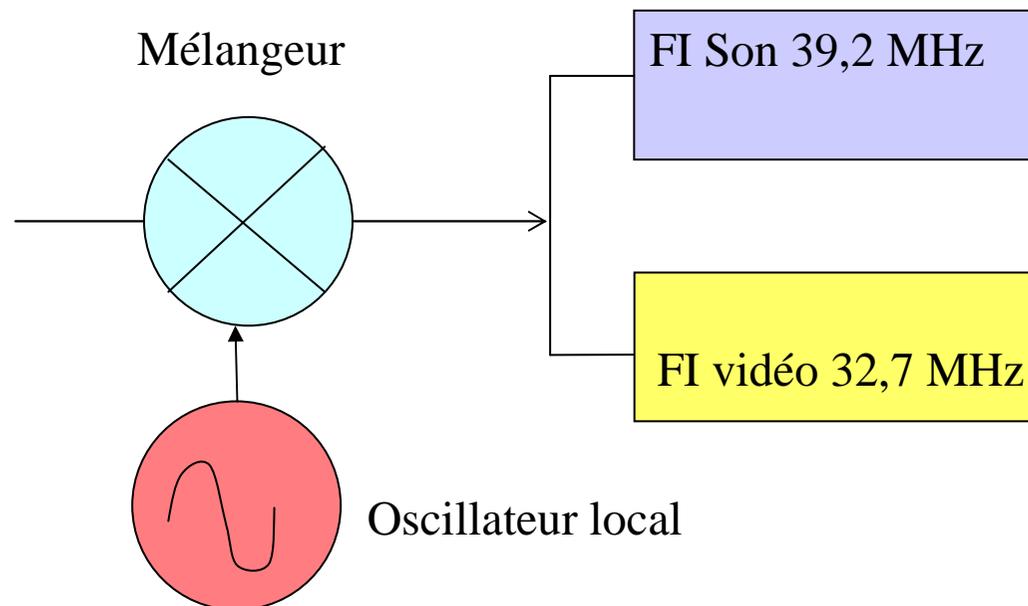


Exemple: canal 29 UHF (TF1)

Porteuse image: 535,25 MHz

Porteuse son : 541,75 MHz.

Récepteur de télévision



Réception de la télévision

Récepteur

FI Son 39,2 MHz

FI vidéo 32,7 MHz

	Marseille (TF1)	Cassis (Canal +)
canal	29 UHF	4 VHF
Porteuse vidéo:	535,25 MHz	63,75 MHz
Porteuse son	541,75 MHz	57,25 MHz

Fréquence de l'OL et fréquences images vidéo et son dans les deux cas ?

Emetteur de l'Etoile

