

Applications des transistors

- **Amplificateur**
- **Oscillateur**
- **Mélangeur**

1/ Amplificateurs

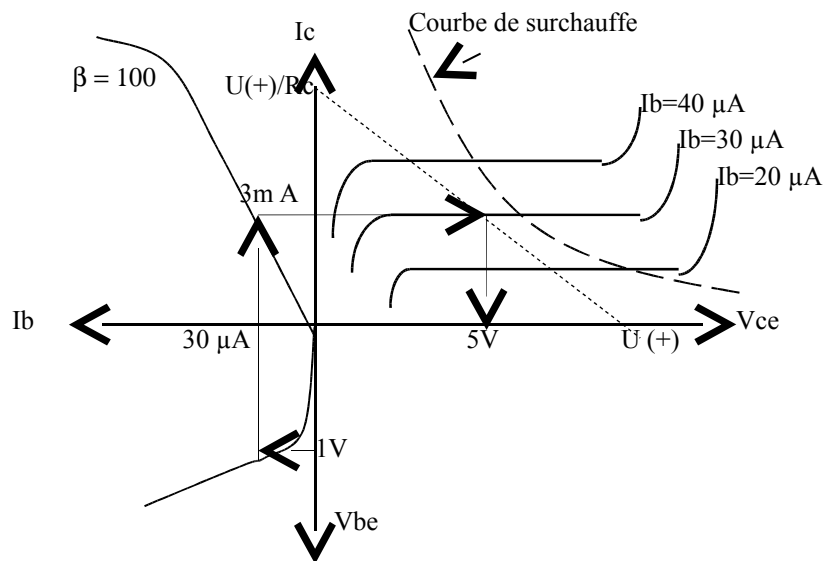
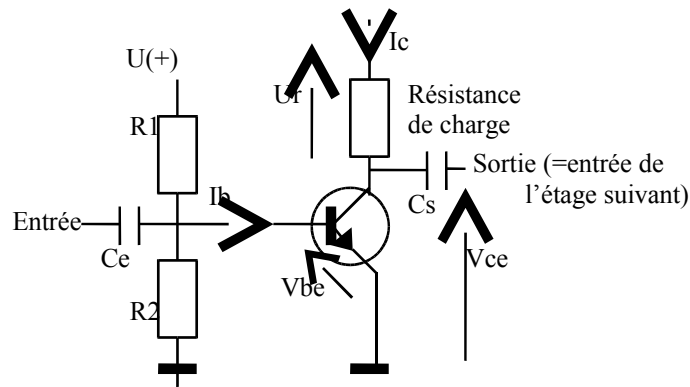
1.1/ Les classes d'amplification

Trois montages fondamentaux existent et qui diffèrent selon la valeur de la tension de repos (en l'absence de signal). En **classe A**, le montage le plus répandu, la tension de repos est centrée par rapport au signal d'entrée. En **classe C**, la polarisation du signal fait que seule une partie du signal est amplifiée, le reste du signal est restitué par le circuit oscillant de sortie accordé sur la fréquence du signal d'entrée. La **classe B** utilise deux transistors qui amplifient chacun une alternance du signal. Ce montage est difficile à régler et nécessite des transformateurs et des transistors appariés. Il existe aussi la **classe AB**, très répandue et s'apparentant à la classe A, dans laquelle la tension de repos est inférieure à la tension de repos de la classe A, ce qui augmente le rendement sans trop détériorer la linéarité.

Schéma	Classe A	Classe B	Classe C
Forme du signal amplifié			
V est la tension de repos (sans signal en entrée)	La tension de repos est centrée par rapport au signal	est amplifié par T1	est restitué par le
circuit LC		est amplifié par T2	accordé sur la fréquence
d'entrée			
Déphasage	180°	pas de déphasage	pas de déphasage
Commentaire (CW)	Montage classique	2 transistors, 2 transfos	montage peu courant
Rendement	Génère peu d'harmoniques car très linéaire 30 à 50 % maximum	peut générer des harmoniques impaires (3F, 5F, 7F, ...) 50% à 60%	génère des harmoniques (2F, 3F, 4F, ...) 70 à 80% et +

1.2/ La résistance de charge

(Rc) est le dispositif normalement utilisé en classe A pour récupérer les variations de tension aux bornes du transistor. Le pont de résistances constitué de R1 et R2 fixe la tension de repos de l'amplificateur. Les variations de tension de la tension d'entrée passent à travers le condensateur d'entrée, Ce, et créent les variations de Ib (effet diode de la jonction base-émetteur). Les variations d'Ib créent les variations d'Ic ($I_c = \beta \cdot I_b$) quelle que soit la tension Vce. Ic est traduit en tension sur Rc ($U = R \cdot I$), puis récupérée sur le condensateur de sortie, Cs, pour transmettre le signal à l'étage suivant. La résistance de charge détermine la **droite de charge** de l'amplificateur dont la pente est négative. Quand Ib est nul, Ic est nul, Ur est nul; la sortie est au potentiel d'alimentation (+). D'autre part, le courant maximum dans Rc est $U(+)/Rc$.



Le graphique est composé de 3 quadrants. Celui du bas représente la variation du courant de base en fonction de la tension entre base et émetteur : c'est une courbe qui ressemble à celle de la diode en sens passant. Le quadrant en haut à gauche représente le rapport I_c / I_b , c'est-à-dire le gain (β) du transistor. Le quadrant de droite représente les valeurs de I_c en fonction de V_{ce} pour des courants de base fixés. La droite de charge, marquée en pointillé, indique les points de fonctionnement de l'amplificateur. Cette droite passe par la tension d'alimentation, $U(+)$, et par l'intensité maximale parcourue par cette résistance, c'est-à-dire $U(+)/R_c$. Quand on a $I_b = 30 \mu A$, on a $I_c = 3 mA$ (puisque $\beta = 100$) et $V_{ce} = 5 V$ et pour avoir $I_b = 30 \mu A$, il faut une tension V_{be} de $1 V$. Les courbes sont données par le constructeur du transistor et la droite de charge (en pointillé) est déterminée par le montage (la tension d'alimentation du transistor, $U(+)$, et la valeur de la résistance de charge, R_c). Pour que l'amplificateur soit linéaire, il faut que la partie utilisée de la droite de charge soit dans la zone où les courbes I_b sont plates. Enfin, la droite de charge ne doit pas dépasser la courbe de surchauffe donnée par le constructeur. Au delà de cette courbe, la chaleur dégagée par le transistor ($P = V_{ce} \times I_c$) peut conduire à sa destruction.

En lisant ce graphique, on voit bien que si V_{be} est augmenté, V_{ce} sera plus faible, ce qui explique le déphasage de 180° que génère le montage. Dans cet exemple, l'impédance d'entrée est $1 V / 30 \mu A = 33 k\Omega$ et l'impédance de sortie est $5 V / 3 mA = 1666 \Omega$. Si la tension d'alimentation du circuit, $U(+)$, est $12 V$, la résistance de charge aura pour valeur $(12 V - 5 V) / 3 mA = 2333 \Omega$ (une résistance de 2200Ω sera utilisée).

1.3/ Liaisons entre les étages

Les différents étages d'un montage peuvent être liés de différentes manières. En **direct**, le collecteur est relié à la base du transistor de l'étage suivant. Pour éviter des problèmes de niveau de tension, on peut rajouter une ou plusieurs **diodes** en série dans le cas d'une liaison en courant continu ou un

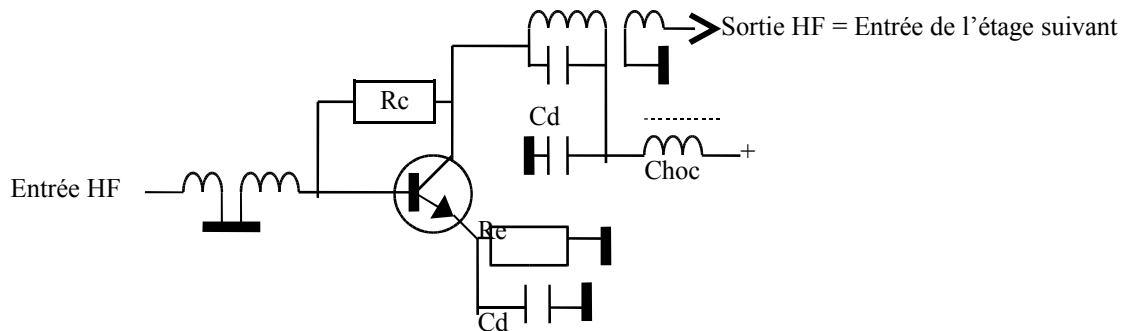
condensateur dans le cas de courant alternatif. Toujours dans ce cas et pour adapter des impédances, la liaison par **transformateur** est utilisée.

1.4/ Amplificateur R.F. (Radio Fréquence)

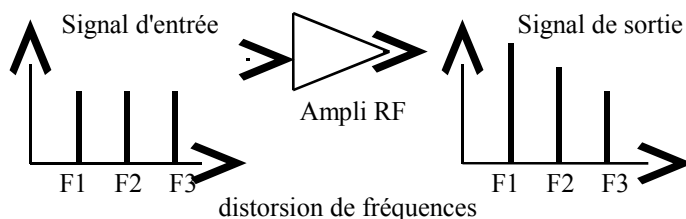
Cet amplificateur est constitué de circuits spécifiques, en particulier de **lignes de découplages** (condensateur à la masse (Cd) et bobine de choc sur l'alimentation) pour éviter les auto-oscillations, de filtres H.F. (circuit bouchon) et de transformateurs pour adapter les impédances entre les étages.

Rc est une **résistance de contre-réaction** pour limiter les **auto-oscillations** du circuit. Les capacités parasites du circuit (capacité entre les pistes du circuit imprimé par exemple) ou la mutuelle-induction entre les transformateurs peuvent transformer un amplificateur en oscillateur (voir § 7.5). La résistance de contre-réaction, en réinjectant une partie du signal amplifié en opposition de phase sur l'entrée, empêche l'amplificateur d'osciller.

La résistance présente dans le circuit de l'émetteur (notée Re) protège le circuit de **l'emballement thermique** : lorsque la température du transistor augmente, son gain augmente, ce qui augmente encore sa température. Ceci peut conduire à la destruction du transistor ; la résistance Re fait augmenter la tension d'émetteur lorsque le courant augmente et réduit la tension base-émetteur, réduisant ainsi le courant de base.

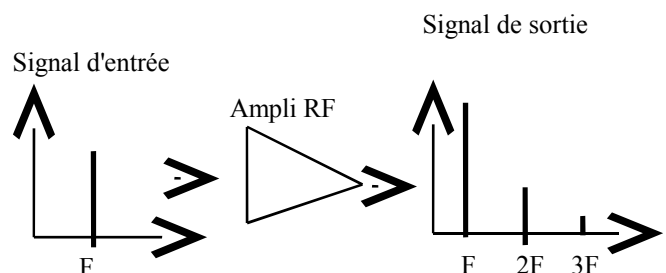


Il arrive souvent qu'un amplificateur RF ne soit pas linéaire. Il y a dans ce cas des distorsions qui peuvent être de deux types : **distorsions de fréquences** ou **distorsions harmoniques (ou distorsions d'amplitude)**. Les deux distorsions sont souvent combinées. Ces distorsions sont plus facilement lisibles avec des graphiques ayant pour abscisse la fréquence (à la manière d'un analyseur de spectre).



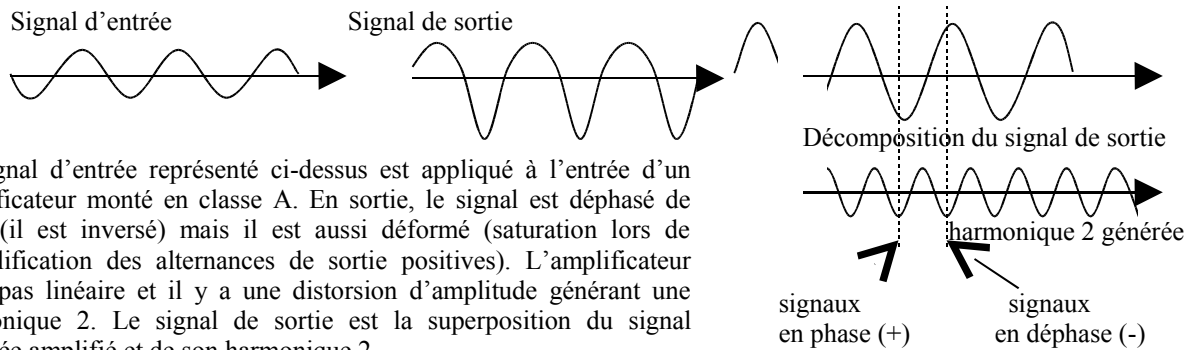
Lorsqu'il y a distorsion de fréquences, le signal de sortie n'est pas proportionnel au signal d'entrée : dans notre exemple, les fréquences élevées sont atténuées par rapport aux fréquences basses (mais ce peut être l'inverse ou encore le cas où une bande de fréquence est plus amplifiée que les autres).

Dans le cas d'un amplificateur ayant une distorsion harmonique, s'il n'existe qu'une fréquence en entrée, plusieurs signaux harmoniques (en général 2F et 3F, et parfois plus) seront présents en sortie, à des niveaux plus faibles. Le **taux d'harmonique** (en % ou en dB) est le rapport de la puissance du signal (ou des signaux) parasite sur le signal désiré. Ces signaux



parasites sont produits par la déformation du signal d'entrée après son passage dans l'amplificateur (non-linéarité).

distorsion harmonique (ou d'amplitude)



Le signal d'entrée représenté ci-dessus est appliqué à l'entrée d'un amplificateur monté en classe A. En sortie, le signal est déphasé de 180° (il est inversé) mais il est aussi déformé (saturation lors de l'amplification des alternances de sortie positives). L'amplificateur n'est pas linéaire et il y a une distorsion d'amplitude générant une harmonique 2. Le signal de sortie est la superposition du signal d'entrée amplifié et de son harmonique 2.

2/Oscillateur

2.1/ Introduction

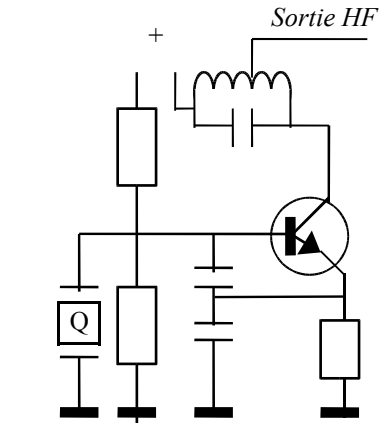
Un oscillateur est un circuit générateur de signaux sinusoïdaux de fréquence calculée. Il existe des oscillateurs à fréquence fixe (à quartz) (**VXO**) et à fréquence variable. Ces derniers peuvent être commandés mécaniquement avec un CV (**VFO**), électriquement avec une diode Varicap (**VCO**) ou électroniquement avec un synthétiseur **PLL** (Bouclage de Phase) ou **DDS** (Synthèse Digitale Directe de fréquence). Le **fréquence-mètre** mesure la fréquence d'un signal en comptant les périodes pendant une durée déterminée. Plus cette durée est longue, meilleure sera la précision de l'instrument de mesure.

Les quartz utilisent l'effet piézo-électrique pour fonctionner. Lorsqu'une pression est exercée sur les faces d'une lame de quartz, des charges électriques y apparaissent. Inversement, si une tension est appliquée à ses faces, la lame se dilate ou se contracte selon la polarité appliquée. Le quartz est composé d'une lame de roche de quartz coincée entre les deux plaques d'un condensateur. La vitesse de propagation du courant dans la masse du quartz est d'environ 5700 m/s. Lorsque la fréquence de la tension coïncide avec la fréquence propre du quartz, fréquence liée à ses dimensions, il y a résonance. Par exemple, une lame de quartz de 0,3mm d'épaisseur (e), résonne en demi-onde (l'onde fait un aller-retour dans le quartz) sur 9,5 MHz :

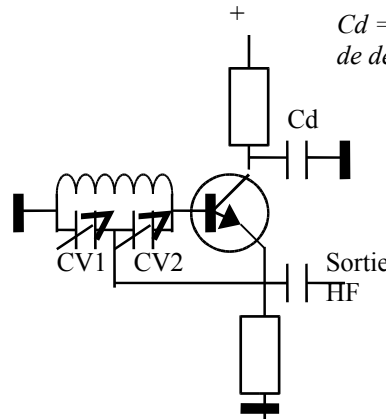
$$F \text{ (MHz)} = \frac{5.7}{2 \cdot e \text{ (mm)}} = \frac{5.7}{2 \cdot 0,3} = 9,5 \text{ MHz}$$

2.2/Principe de fonctionnement

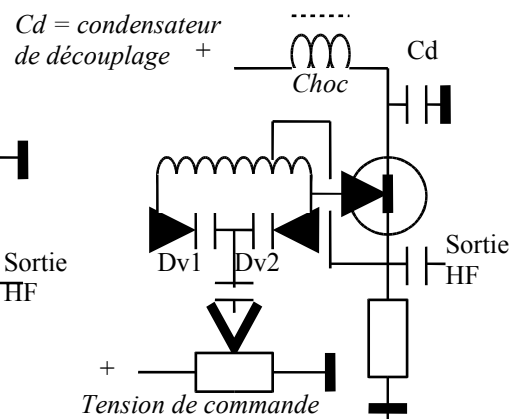
Le principe de fonctionnement d'un oscillateur repose sur la **réinjection en phase** d'une partie du signal amplifié sur l'entrée du circuit. La connaissance des schémas présentés ci-dessous n'est pas au programme de l'examen. Les **facteurs affectant les conditions de stabilité** des oscillateurs sont les variations de la tension d'alimentation, les variations de température des composants (en particulier des transistors et des quartz) et les défauts de blindage des boîtiers contenant le montage (effet de main).



Oscillateur à Quartz (VXO), système Colpitts fréquemment utilisé avec les quartz. Très stable et facile à mettre au point, il offre la possibilité d'utiliser le circuit LC de sortie en multiplicateur de fréquence (§7-6).



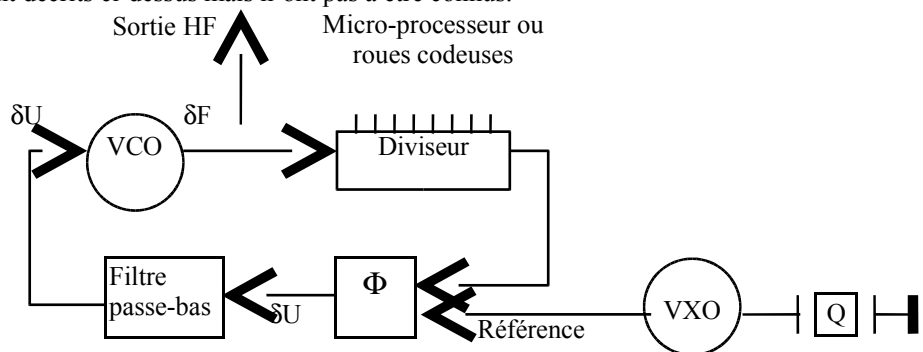
VFO système Clapp, la HF est réinjectée par le point milieu du CV. CV1 et CV2 sont les deux cages d'un condensateur variable mécaniquement liées



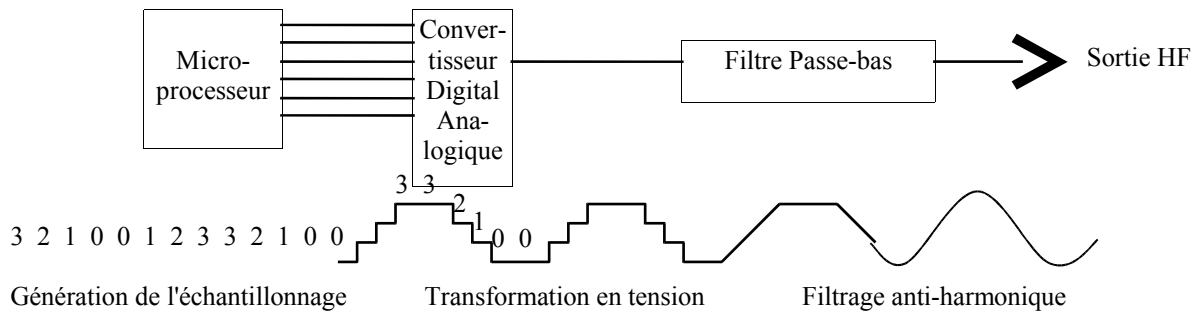
VCO à Varicap système Hartley construit autour d'un transistor FET. La HF est réinjectée par la bobine. La bobine de choc et le condensateur de découplage, Cd, évitent que la H.F. "remonte" dans l'alimentation

2.3/Boucle à verouillage de phase (PLL)

Le schéma synoptique (principe de fonctionnement) d'un PLL (de l'anglais : Phase Lock Loop : boucle à verouillage de phase) est représenté ci-dessous. Un VCO génère le signal HF dont la fréquence dépend de la tension d'entrée du VCO. Une partie du signal HF passe par un diviseur logique (sortie en 0 ou 1) qui ne peut diviser que par un nombre entier : il envoie une impulsion en sortie quand il a compté le nombre de période déterminé par les roues codeuses ou le microprocesseur. Ce signal est comparé à un signal de référence (VXO) dont le fréquence est très stable. En cas de déphasage, c'est-à-dire si les deux signaux n'apparaissent pas en même temps sur les deux entrées du comparateur (noté Φ), celui-ci génère une tension de sortie qui corrige la fréquence du VCO. Le filtre passe bas (généralement un filtre RC) évite les à-coups et stabilise le système. On rappelle que, pour l'examen, seuls les synoptiques sont à connaître. Le diviseur et le comparateur sont des circuits intégrés dont le fonctionnement interne n'a pas à être connu. Les schémas d'un VCO et d'un VXO sont décrits ci-dessus mais n'ont pas à être connus.



Un DDS (de l'anglais : Direct Digital Synthesis : synthèse digitale directe) fonctionne autour d'un microprocesseur et d'un convertisseur Digital/Analogique. Le synoptique d'un DDS est représenté ci-dessous. Avec un programme adapté (algorithme), le microprocesseur génère la fréquence par "échantillonnage". En sortie du microprocesseur, un convertisseur Digital/Analogique (appelé aussi CNA, convertisseur numérique / analogique) transforme les chiffres issus du microprocesseur en tension. Le signal est ensuite filtré énergiquement pour éliminer les harmoniques (signaux "carrés") générées par le convertisseur.



2.3/Multiplicateur

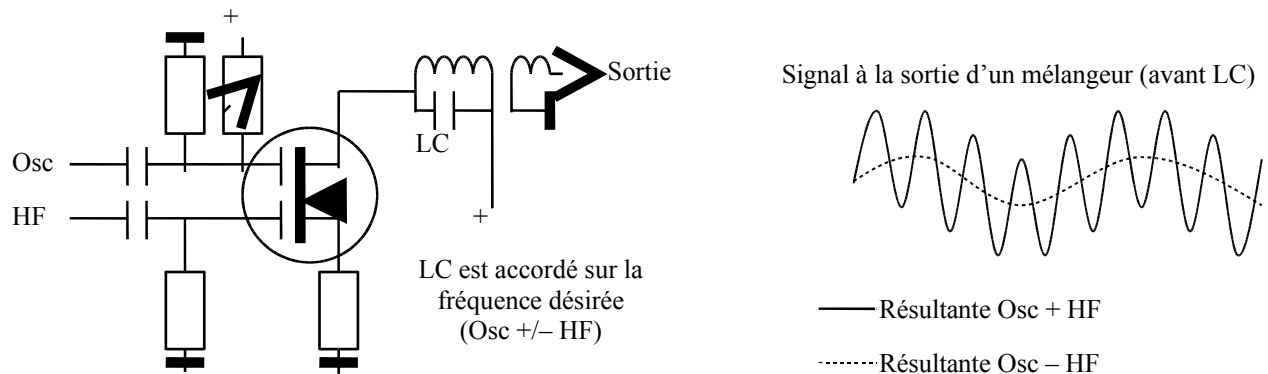
Un multiplicateur est un circuit amplificateur RF monté en classe C (générateur d'harmoniques à cause de sa non-linéarité intrinsèque) dont le filtre de sortie est accordé sur une des fréquences harmoniques de la fréquence d'entrée (x2, x3 ou x5 maximum). Si on souhaite multiplier une fréquence par 9, deux multiplicateurs par 3 seront montés à la suite l'un de l'autre.

Il faut noter que le spectre d'un signal passant par un multiplicateur est modifié. Par exemple, un signal FM d'excursion de 3 kHz passant dans un doubleur de fréquence aura une excursion de 6 kHz (3x2) à la sortie du circuit. Ce signal sera encore exploitable par le démodulateur FM ; ce qui n'est pas le cas d'un signal AM ou BLU passant par un multiplicateur de fréquences : le phénomène d'étirement du spectre audible rend le signal de sortie inexploitable car très déformé et la non-linéarité de l'amplificateur écrête le signal.

3/Le mélangeur

Un mélangeur est un circuit multiplicateur de tension (amplificateur non linéaire). Si F1 et F2 sont les deux fréquences à mélanger, à la sortie du circuit, on obtient la somme et la différence des fréquences, soit $F1+F2$ et $F1-F2$. Un filtre à la sortie du mélangeur permet de sélectionner une des deux fréquences générées. Les tensions des signaux F1 et F2 ne sont pas superposées (addition) mais multipliées.

Dans le schéma ci-dessous, les deux fréquences présentes à l'entrée du mélangeur sont HF et Osc. Le graphique à droite montre le signal à la sortie du mélangeur : il y a superposition des signaux de fréquences $Osc+HF$ (trait plein) et $Osc-HF$ (en pointillé). Le filtre LC, s'il est calculé pour la fréquence $Osc+HF$, éliminera la fréquence $Osc-HF$.



Exemple : A l'entrée d'un mélangeur, on a deux fréquences : 5 MHz et 8 MHz. Quelles fréquences trouve-t-on à la sortie du mélangeur ?

1) $5 + 8 \text{ MHz} = 13 \text{ MHz}$;

2) $5 - 8 \text{ MHz} = 8 - 5 \text{ MHz} = 3 \text{ MHz}$.

Mathématiquement, la relation est : $\sin(A).\sin(B) = 1/2.(\sin(A+B)+\sin(A-B))$. Si le mélangeur ne multiplie pas exactement les tensions présentes à son entrée, on trouvera en sortie les mélanges « classiques » $F1+F2$ et $F1-F2$ mais aussi les fréquences F1 et F2 ainsi que d'autres combinaisons comme par exemple $(2xF1)+F2$ ou $(2xF1)-F2$ (mélange du 3^{ème} ordre), ce qui peut provoquer des perturbations si le niveau de ces signaux parasites est élevé.