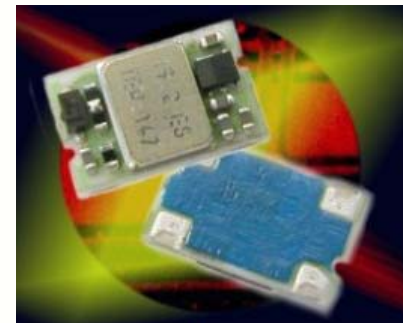
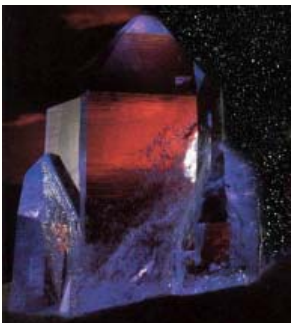
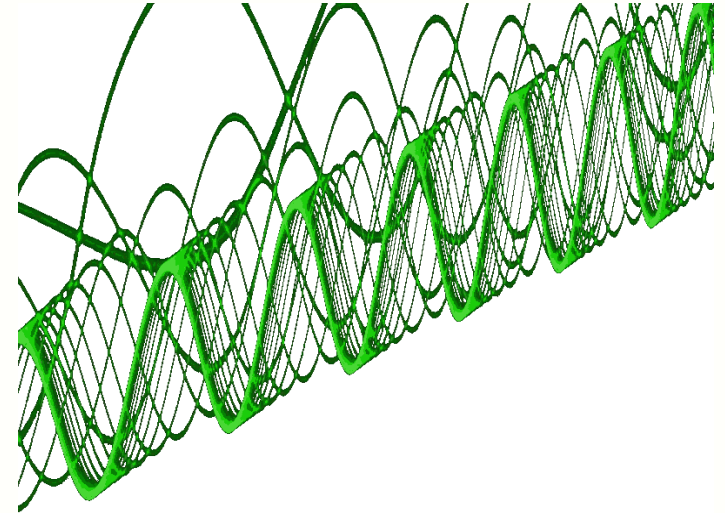




Les oscillateurs





- 1- Structure générale d'un oscillateur
- 2- Les applications des oscillateurs
- 3- Condition d'entretien des oscillations
- 4- Démarrage de l'oscillateur
- 5- Oscillogramme du démarrage de l'oscillateur
- 6- La stabilisation de l'amplitude
- 7- Circuits de stabilisation de l'amplitude
- 8- Pureté spectrale d'un oscillateur
- 9- Bruit de phase d'un oscillateur
- 10- L'oscillateur à pont de Wien
- 11- L'oscillateur à réseau déphaseur
- 12- L'oscillateur LC de Pierce
- 13- L'oscillateur LC de Collpits
- 14- L'oscillateur LC de Clapp
- 15- L'oscillateur LC de Hartley
- 16- L'oscillateur à résistance négative
- 17- Un autre point de vue sur le Collpits
- 18- Principe de la stabilisation en fréquence
- 19- Stabilisation de la fréquence par résonateur
- 20- Le quartz et le résonateur céramique
- 21- Courbe d'impédance des résonateurs
- 22- Exemples d'oscillateurs à quartz
- 23- Réalisations commerciales d'oscillateurs à quartz
- 24- Résonateur à onde de surface
- 25- Oscillateur à résonateur à onde de surface
- 26- Exemple d'oscillateur à résonateur SAW
- 27- Le résonateur céramique coaxial
- 28- Oscillateur à résonateur céramique coaxial
- 29- Le résonateur diélectrique
- 30- Oscillateur à résonateur diélectrique
- 31- Oscillateur à 9,9 GHz d'un radar Doppler
- 32- Oscillateur à 10 GHz d'une tête TV-satellite



Fluorite octaédrique sur un cristal de quartz



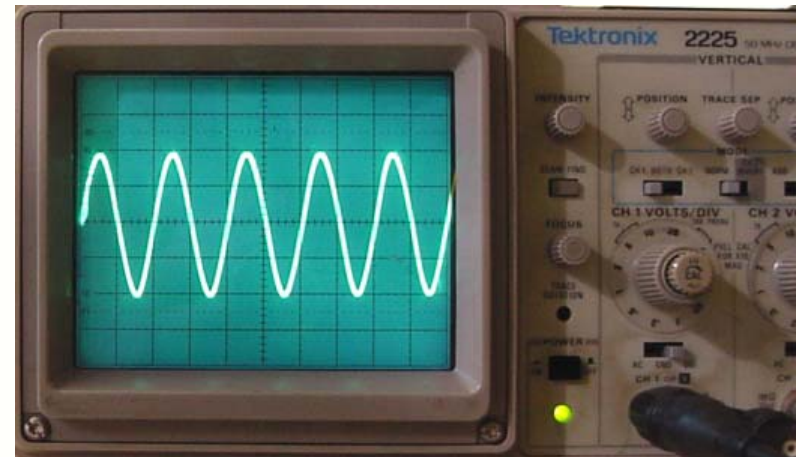
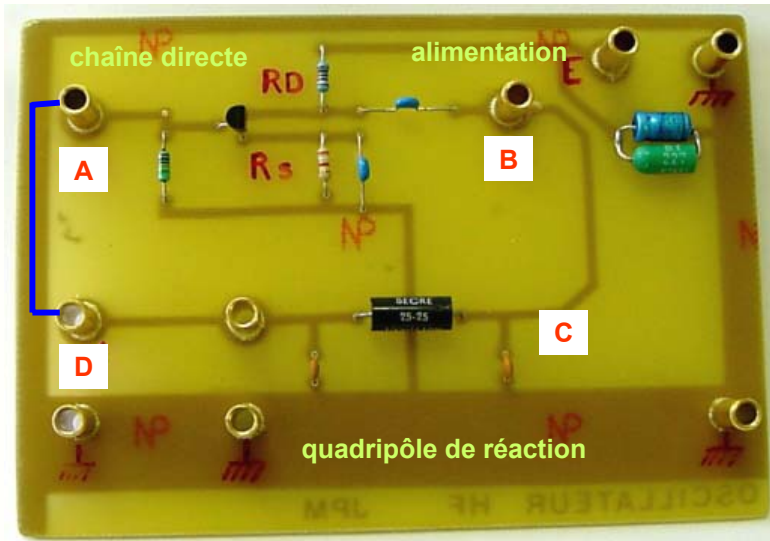
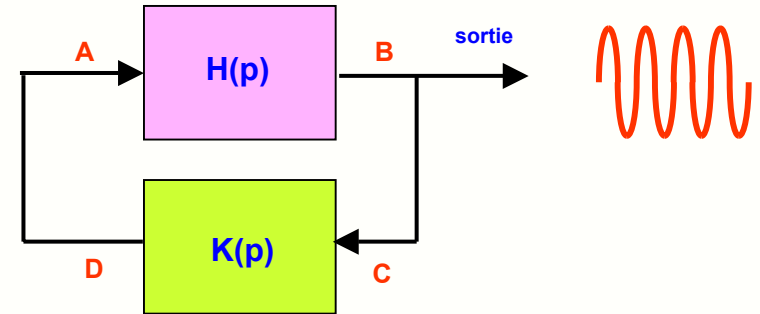
1- Structure générale d'un oscillateur



Un oscillateur sinusoïdal est un système bouclé placé délibérément dans un état d'instabilité qui comporte :

- une chaîne directe qui est un amplificateur à Aop ou à transistor selon la fréquence de travail
- un quadripôle de réaction qui réinjecte à l'entrée de l'amplificateur une fraction du signal de sortie
- il possède une sortie mais pas d'entrée à part l'alimentation

- chaîne directe : $H(p)$
- chaîne de retour : $K(p)$
- transmittance de boucle : $T(p) = H(p).K(p)$



Maquette didactique d'un oscillateur 2 MHz



2- Les applications des oscillateurs

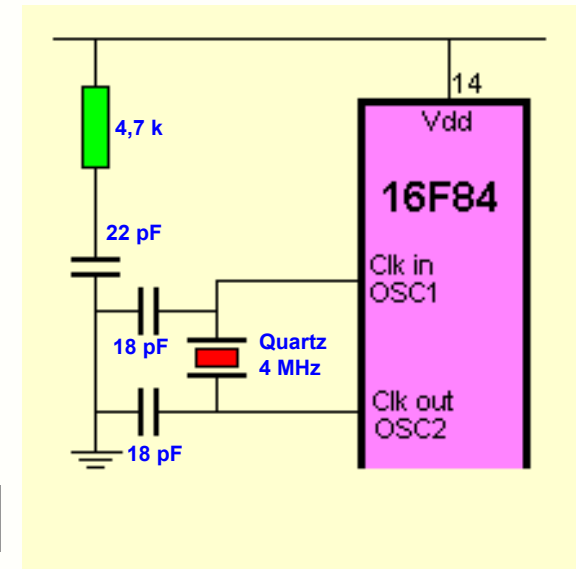


Les oscillateurs sont des dispositifs essentiels dans les équipements électroniques puisqu'ils assurent la **production** et la **stabilité en fréquence** des **signaux alternatifs** nécessaires au fonctionnement comme :

- la fréquence de la porteuse d'un émetteur
- la fréquence de l'oscillateur local de réception dans le récepteur
- le signal d'horloge de tous les systèmes numériques etc...

Dans les équipements actuels, les oscillateurs se présentent sous deux formes :

- l'électronique se trouve avec d'autres fonctions dans un circuit intégré, les composants fixant la fréquence d'oscillation étant extérieurs
- l'oscillateur avec les composants fixant la fréquence sont intégrés dans un boîtier indépendant



Oscillateur 4 MHz d'un circuit numérique



Oscillateur 1,6 GHz stabilisé par résonateur diélectrique



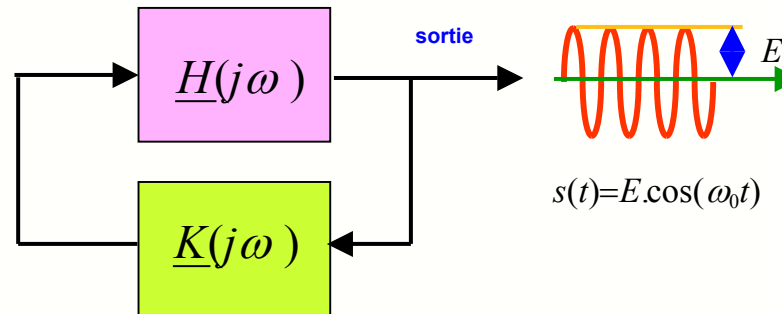
Oscillateur 1 MHz stabilisé par quartz



3- Condition d'entretien des oscillations



Lorsque le système oscille, il existe à sa sortie un signal sinusoïdal $s(t)$ de fréquence f_0 et d'amplitude E :



Pour que le système bouclé puisse osciller, il faut qu'il existe une fréquence f_0 telle que :

$$\underline{H}(j\omega_0) \underline{K}(j\omega_0) = 1$$

condition d'entretien des oscillations
ou condition de Barkausen

Cette condition se traduit en pratique par deux relations :

- sur le module : $|\underline{T}(j\omega_0)| = |\underline{H}(j\omega_0)| \cdot |\underline{K}(j\omega_0)| = 1$ ou $|\underline{H}(j\omega_0)| = 1 / |\underline{K}(j\omega_0)|$

Règle : à la fréquence d'oscillation, l'amplification de la chaîne directe compense l'atténuation du quadripôle de réaction.

- sur la phase : $\arg(\underline{T}(j\omega_0)) = \arg(\underline{H}(j\omega_0)) + \arg(\underline{K}(j\omega_0)) = 0$ ou $\arg(\underline{H}(j\omega_0)) = -\arg(\underline{K}(j\omega_0))$

Règle : à la fréquence d'oscillation, le déphasage introduit par la chaîne directe compense le déphasage du quadripôle de réaction.

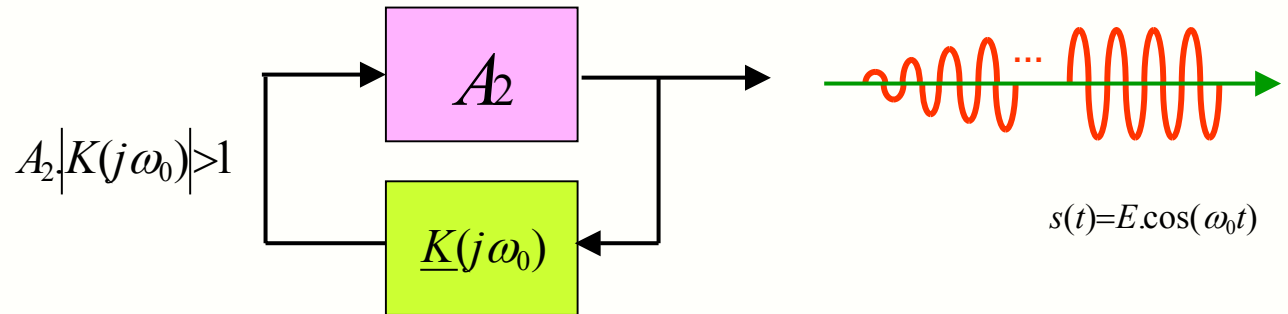
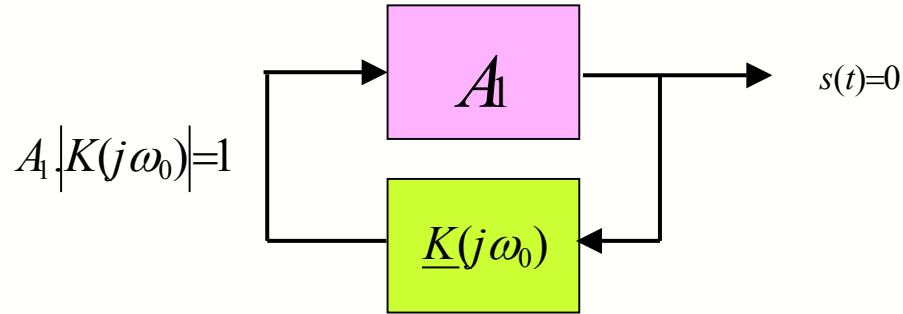
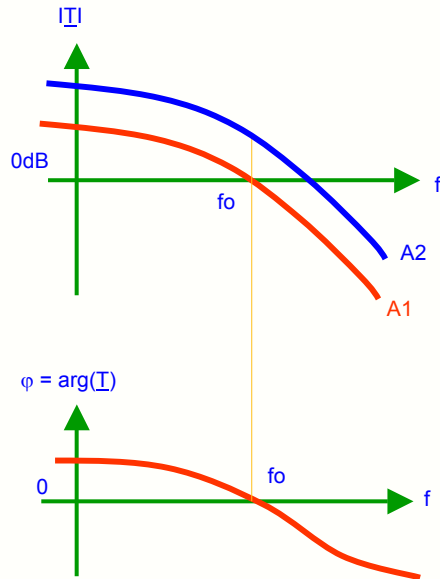


4- Démarrage de l'oscillateur



Soit un système bouclé possédant une fréquence f_0 à laquelle la condition de Barkausen est vérifiée :

- à la mise sous tension de ce dispositif, l'oscillation ne démarre pas
- si on augmente un peu le gain de la chaîne directe, une sinusoïde d'amplitude croissante apparaît en sortie
- lorsque le régime transitoire est terminé, son amplitude finit par se stabiliser



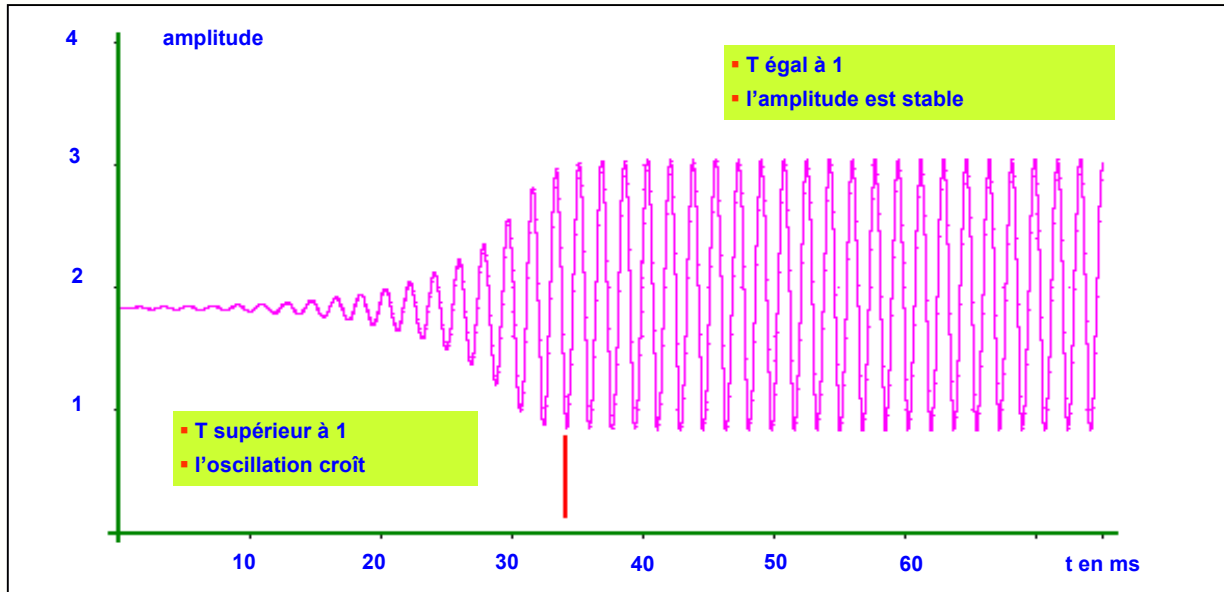
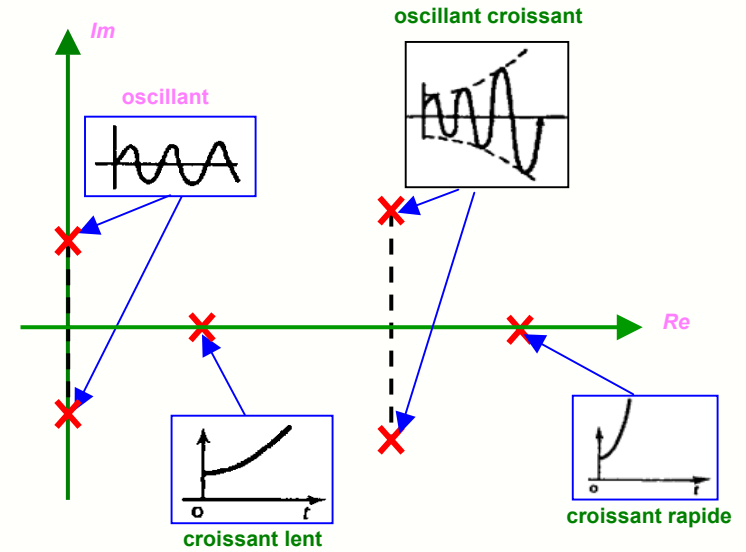
Règle : pour qu'un oscillateur démarre, il faut que le module de la transmittance de boucle à la fréquence f_0 soit plus grand que 1.

5- Oscillogramme du démarrage de l'oscillateur



Lorsqu'on applique une perturbation à l'entrée d'un système linéaire, le comportement de ce système dépend de la **position des pôles** dans le plan complexe :

- on démontre qu'un système linéaire est **instable** s'il a au moins **un pôle à partie réelle positive**
- si on veut construire un oscillateur, il faut se placer délibérément en instabilité et s'assurer de la présence d'au moins **deux pôles complexes conjugués à partie réelle positive**
- c'est pour arriver facilement à cette instabilité qu'on utilise un **système bouclé** dans lequel une fraction du signal de sortie est réinjecté à l'entrée de la chaîne directe par le quadripôle de réaction



Oscillogramme du démarrage d'un oscillateur (simulation)

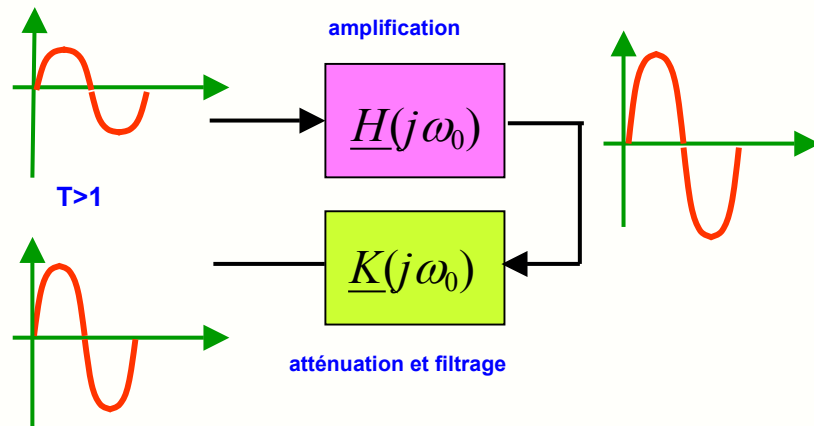


6- La stabilisation de l'amplitude



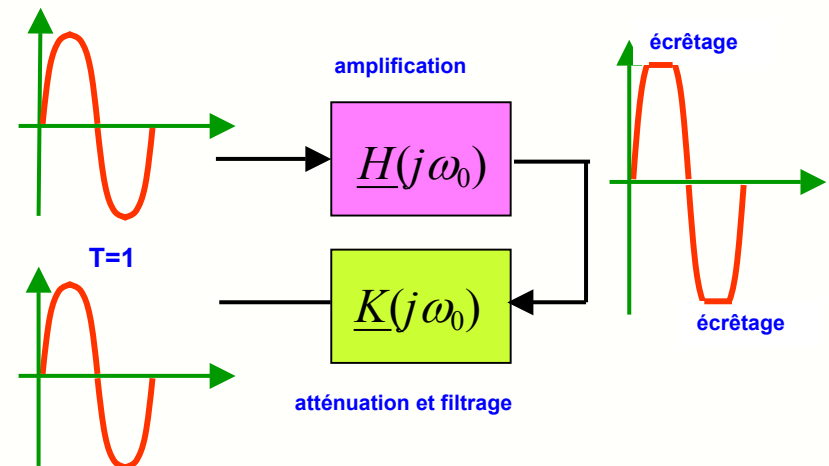
Question : comment avoir à la fois un gain de boucle supérieur à 1 pour le démarrage et égal à 1 pour l'entretien des oscillations ?

- à la mise sous tension de l'oscillateur, les fluctuations dues à l'agitation thermique des électrons provoquent le démarrage de l'oscillation à condition qu'il existe une fréquence f_0 à laquelle le déphasage total soit nul et l'amplification de la chaîne supérieure à 1.
- lorsque l'amplitude augmente, l'amplificateur sort de son domaine linéaire et le signal est forcément écrêté par l'étage d'amplification, ce qui conduit automatiquement à une diminution de l'amplification qui sera ainsi ramenée à 1.



En **petits signaux**, l'amplification de boucle est supérieure à 1, ce qui permet le démarrage de l'oscillateur

Aux **fortes amplitudes**, l'amplification de boucle est ramenée à 1 par l'écrêtage, ce qui permet l'entretien des oscillations.

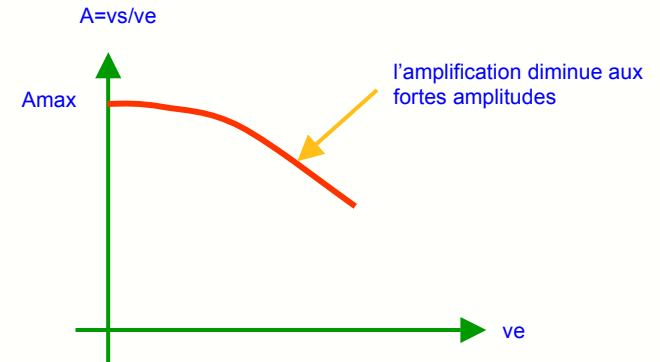




7- Circuits de stabilisation de l'amplitude



- si on compte sur l'écrêtage pour ramener le gain de boucle à 1, on obtient en sortie un signal sinusoïdal déformé et donc de mauvaise qualité
- pour éviter cette déformation, on peut utiliser un amplificateur équipé d'un contrôle de gain qui diminue l'amplification aux fortes amplitudes
- l'amplification de boucle sera alors ramenée à 1 sans écrêtage du signal, ce qui limite la déformation et l'amplitude des harmoniques
- l'amplitude de l'oscillation se stabilisera à la valeur correspondant à une amplification de boucle égale à 1



Exemple de réalisation d'amplificateur à gain contrôlé :

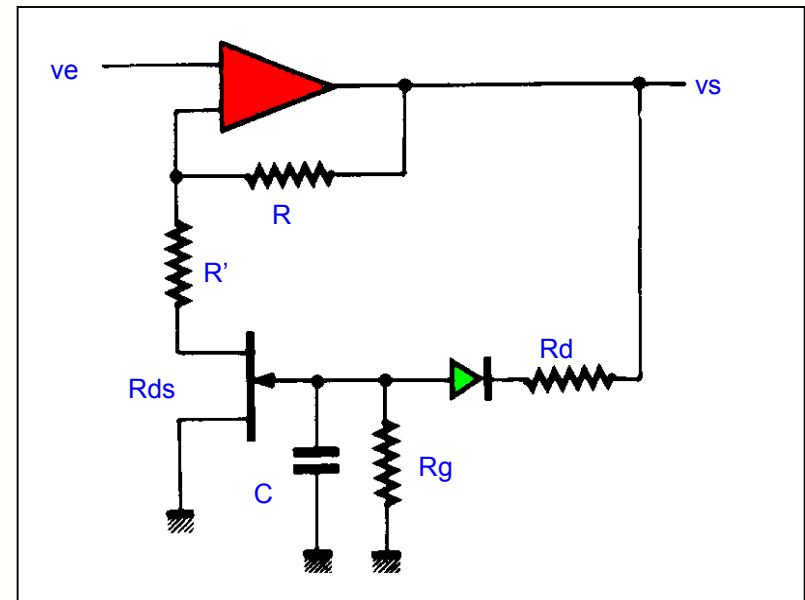
- la diode associée à R_d , R_g et C produit une tension grille négative qui augmente avec l'amplitude du signal de sortie : $V_{gs} = KV_s$
- la résistance Drain-Source du TEC dépend, dans la zone ohmique, de la tension grille V_{gs} et de la tension de pincement V_p selon la relation :

$$R_{ds} = \frac{R_{ds0}}{1 - \frac{V_{gs}}{V_p}}$$

▪ l'amplification s'écrit :

$$A_v = 1 + \frac{R}{R' + R_{ds}} = 1 + \frac{R}{R' + \frac{R_{ds0}}{1 - \frac{KV_s}{V_p}}}$$

- elle diminue si le niveau de la tension de sortie V_s augmente





8- Pureté spectrale d'un oscillateur

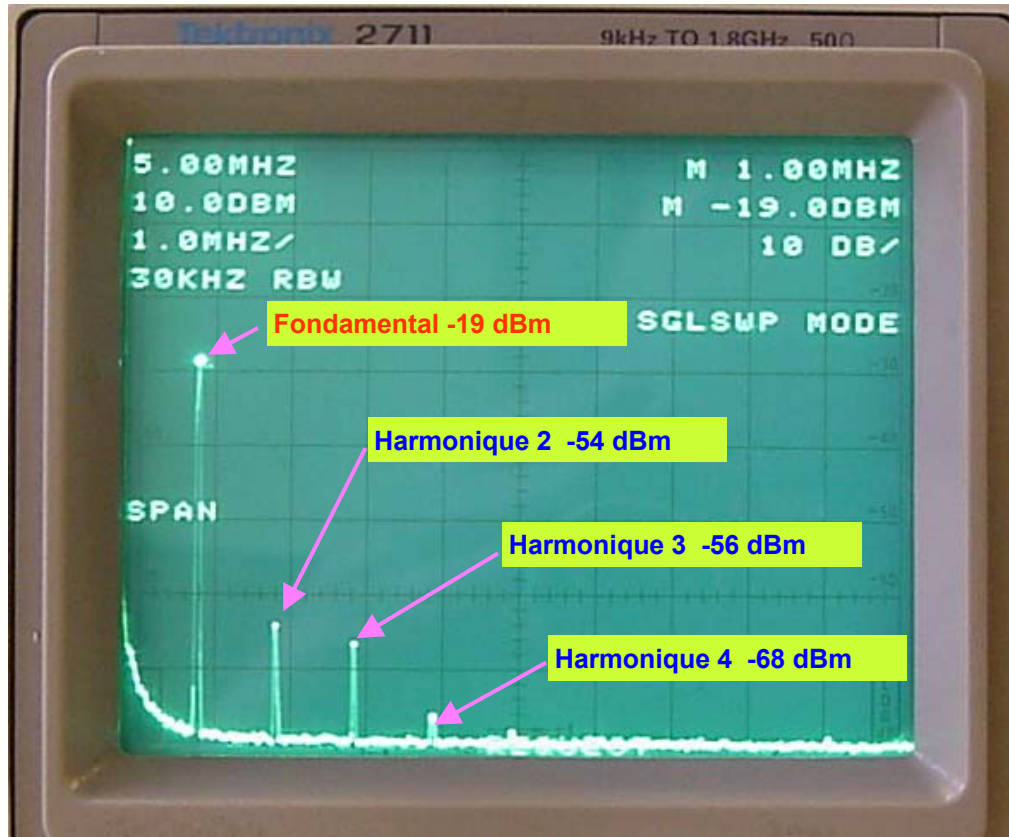


La qualité d'un oscillateur sinusoïdal est essentiellement évaluée par **analyse spectrale du signal** à sa sortie et mesure du **taux de distorsion**.

D'une façon générale, pour maintenir le taux de distorsion à une valeur faible, il faut :

- régler l'amplification à une valeur juste supérieure à la valeur minimale correspondant à un gain de boucle de 1 ou
- utiliser un dispositif de régulation du gain pour éviter l'écrêtage

Spectre en sortie d'un oscillateur 1MHz



Ce signal contient un **fondamental** et des **harmoniques** :

- F = - 19 dBm = 25,1 mV
- H2 = - 54 dBm = 0,45 mV
- H3 = - 56 dBm = 0,35 mV
- H4 = - 68 dBm = 0,09 mV

Le taux de distorsion harmonique s'écrit :

$$t_d = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + H_4^2}}{F}$$

$$t_d = \frac{\sqrt{0,45^2 + 0,35^2 + 0,09^2}}{25,1} = 0,023 = 2,3\%$$

Remarque : ce taux de distorsion peut toujours être amélioré en faisant suivre d'oscillateur d'un **filtre passe-bas** ou **passe-bande** qui va atténuer les harmoniques indésirables.

Règle : un bon oscillateur a un taux de distorsion faible, une valeur supérieure à 1% étant considérée comme médiocre .

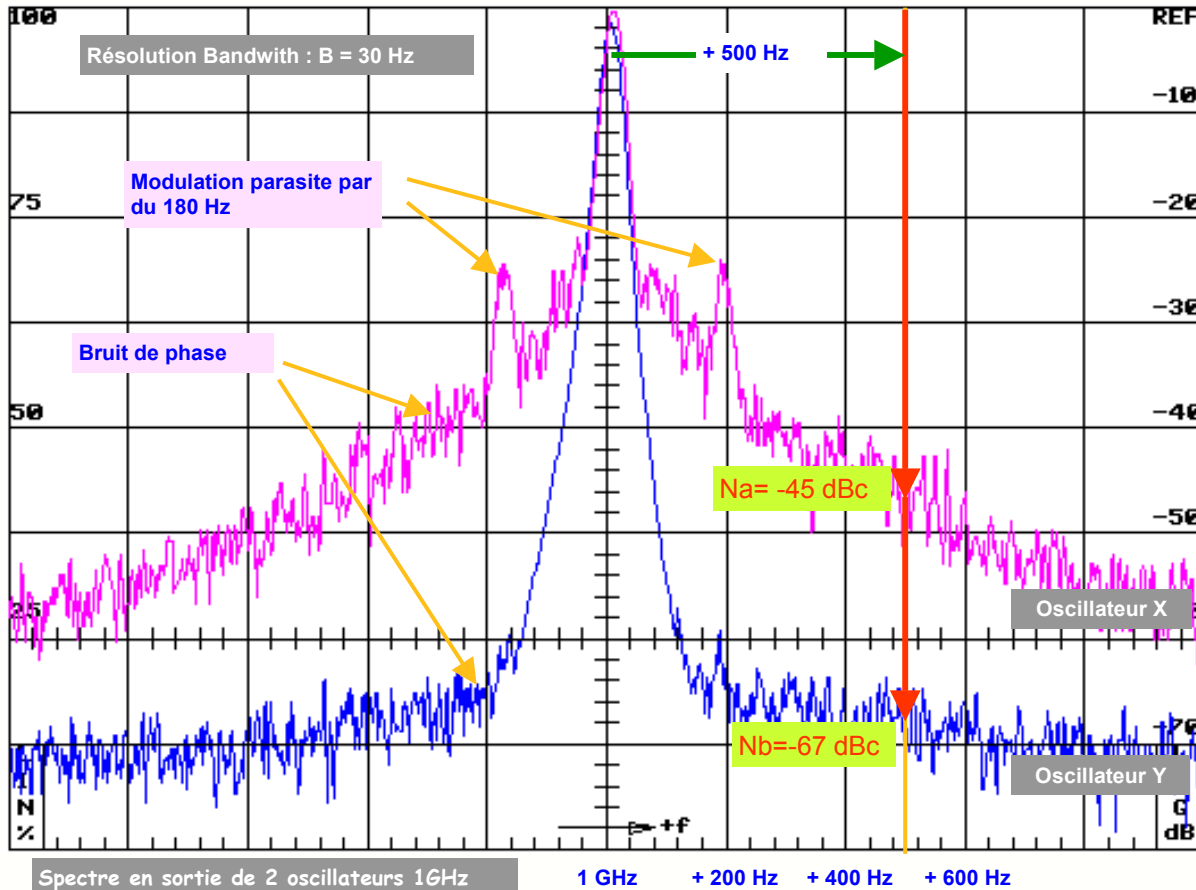


9- Bruit de phase d'un oscillateur



Hormis les harmoniques, le signal issu d'un oscillateur peut être affecté de deux défauts majeurs mis en évidence par l'analyseur de spectre :

- une modulation parasite (FM en général), due par exemple au 50 Hz suite à un blindage insuffisant
- une instabilité aléatoire inévitable due à l'agitation thermique et appelée bruit de phase



- le bruit de phase est mesuré à une certaine distance de la porteuse
- pour un écart de 500 Hz, le niveau est de $N_x = -45$ dB sous la porteuse pour X et $N_y = -67$ dB pour Y
- le bruit de phase BP est défini pour une bande de 1 Hz, soit :

$$BP = N - 10 \log B$$

- le bruit de phase BP est exprimé en dBc/Hz
- dBc = dB sous la porteuse (carrier)

L'oscillateur X présente un bruit de phase à 500 Hz de la porteuse de :

$$BP_x = -45 - 10 \log(30) = -60 \text{ dBc/Hz}$$

L'oscillateur Y est plus performant puisqu'il présente un bruit de phase à 500 Hz de la porteuse de :

$$BP_y = -67 - 10 \log(30) = -82 \text{ dBc/Hz}$$

Règle : un bon oscillateur a un bruit de phase faible, une valeur supérieure à -40dBc/Hz à +100 Hz étant considérée comme médiocre .



10- L'oscillateur à pont de Wien



Pour le **filtre de Wien**, on montre que la tension de sortie est en phase avec la tension d'entrée pour la fréquence :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

La transmittance de ce filtre vaut alors :

$$K(f_0) = \frac{1}{1 + \frac{R_1 + C_2}{R_2 + C_1}} = K_0$$

En associant ce filtre à un amplificateur non inverseur ayant une amplification $H_0 = 1/K_0$, on obtient un oscillateur sinusoïdal produisant une sinusoïde de fréquence f_0 .

Exemple : on veut réaliser un oscillateur à $f_0 = 1 \text{ kHz}$

▪ on choisit de prendre $R_1=R_2=R$ et $C_1=C_2=C$

▪ la fréquence d'oscillation s'écrit alors : $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

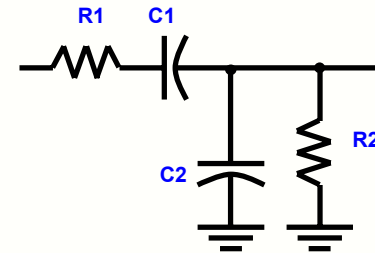
▪ $f_0 = 1 \text{ kHz}$ est obtenue pour $C = 10 \text{ nF}$ et $R = 15,9 \text{ kohms}$

▪ l'atténuation du filtre vaut $K_0 = 1/3$

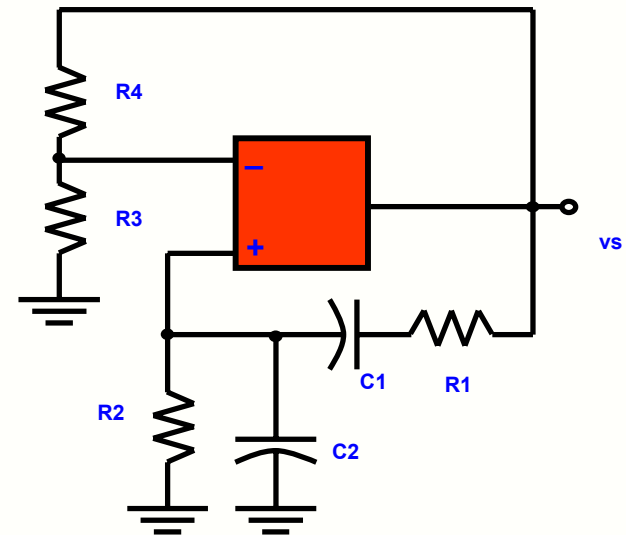
▪ l'amplification minimale devra donc être $A_{min} = 3$

▪ pour assurer le démarrage, on prend par exemple $A = 3,2$

▪ ce qui correspond à $R_4 = 22 \text{ kohms}$ et $R_3 = 10 \text{ kohms}$



Filtre de Wien



Oscillateur à pont de Wien



11- L'oscillateur à réseau déphaseur

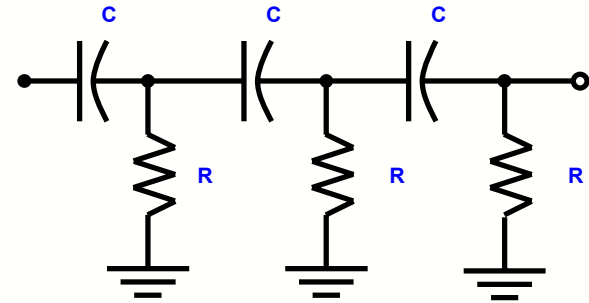


Le **réseau déphaseur** constitué de 3 cellules RC introduit un déphasage de 180° entre l'entrée et la sortie à la fréquence :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$$

L'atténuation du filtre vaut alors :

$$K(f) = \frac{1}{29}$$

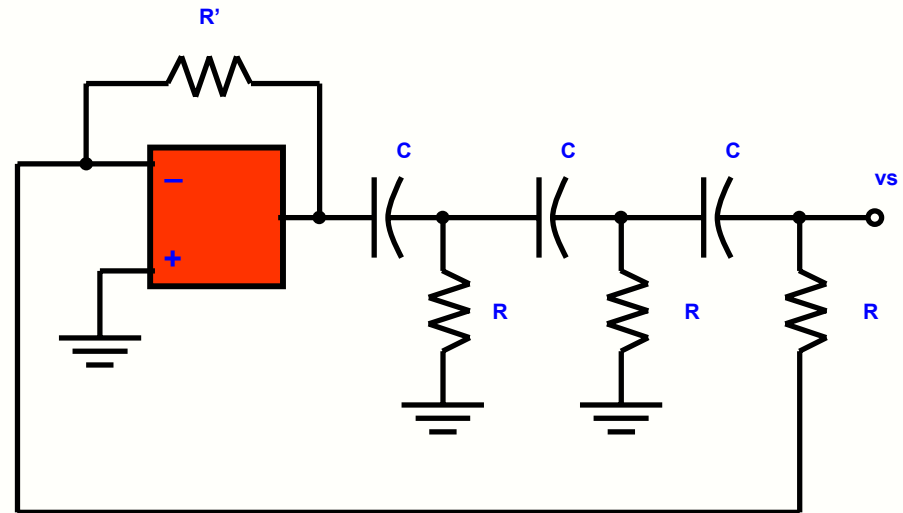


Réseau déphaseur

On pourra donc réaliser un oscillateur (d) en associant ce réseau déphaseur à un amplificateur inverseur.

Exemple : on veut réaliser un oscillateur à **fo = 50 kHz**

- fo = 50 kHz est obtenue pour C = 1 nF et R = 1,3 kohms
- l'atténuation du filtre vaut Ko = 1/29
- l'amplification minimale devra donc être Amin = 29
- pour assurer le démarrage, on prend par exemple A = 36
- ce qui correspond à R = 1,3 kohms et R' = 47 kohms



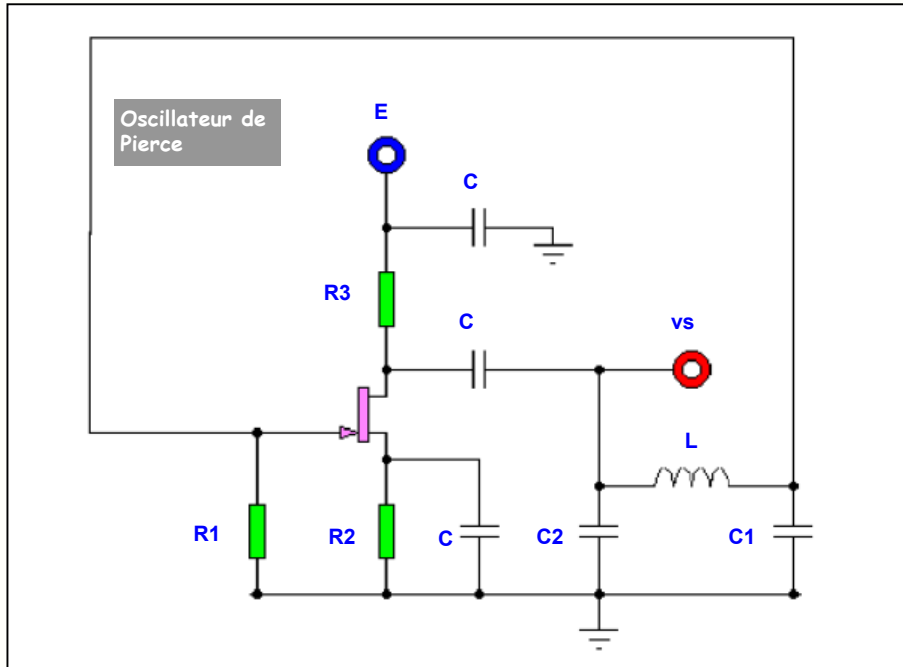
Oscillateur à réseau déphaseur



12- L'oscillateur LC de Pierce



Lorsque la fréquence d'oscillation est supérieure à quelques MHz, le quadripôle de réaction est construit autour d'un circuit résonant LC série ou parallèle, les variantes étant nombreuses.



Dans l'oscillateur Pierce, on distingue bien l'amplificateur à TEC du quadripôle de réaction constitué de L, C1 et C2 :

- R1 = 100 k R2 = 3,9 k R3 = 10 k
- C = 1 à 100 μF C1 = 220 pF C2 = 100 pF
- L = 100 μH
- s : pente du TEC
- la fréquence d'oscillation vaut fo = 1,8 MHz

La transmittance en boucle ouverte s'écrit :

$$T(j\omega) = -s \cdot R_3 \frac{1}{1 - LC_1\omega^2 + j\omega R(C_1 + C_2) \cdot (1 - L \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \omega^2)}$$

La condition d'entretien des oscillations impose :

$$\underline{T(j\omega)} = -s \cdot R_3 \frac{1}{1 - LC_1\omega^2 + j\omega R(C_1 + C_2) \cdot (1 - L \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \omega^2)} = -sR \frac{1}{a + jb} = 1$$

▪ on en déduit la pulsation d'oscillation : $b=0$ soit

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}$$

▪ et une condition sur le gain : $\underline{T(j\omega_0)} = -s \cdot R_3 \frac{1}{1 - LC_1\omega_0^2} = sR_3 \frac{C_2}{C_1} = |A_v| \frac{C_2}{C_1} > 1$

Une amplification supérieure à 2,2 assurera le démarrage de l'oscillateur.



13- L'oscillateur LC de Collpits



Un montage d'oscillateur très utilisé en pratique est l'oscillateur Collpits qui est constitué :

- d'un circuit oscillant LC, la bobine ayant une résistance parallèle R
- d'un diviseur de tension capacitif C1 et C2 aux bornes du circuit oscillant
- d'un amplificateur à transistor en collecteur commun

On montre que la **fréquence d'oscillation** est définie par la résonance de L en parallèle avec la capacité équivalente à C, C₁ et C₂ soit :

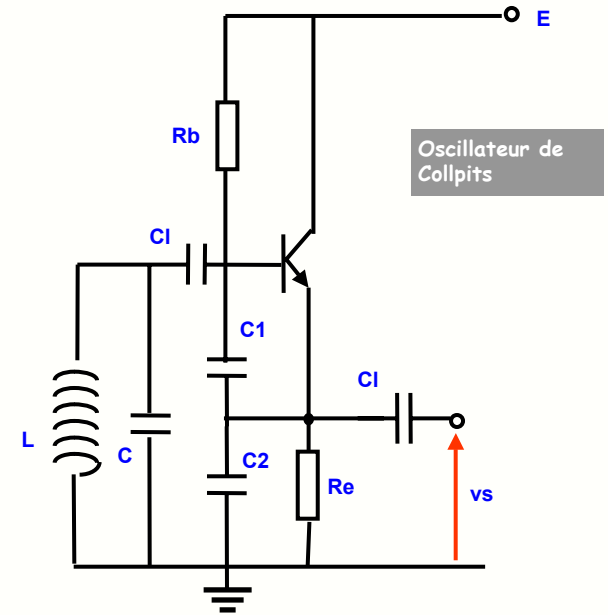
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2})}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{si } C_1 \text{ et } C_2 < C$$

L'étude théorique complète de cet oscillateur donne des calculs assez lourds qui, moyennant quelques approximations légitimes dans la plupart des applications, aboutissent à la condition de démarrage suivante :

$$C_1 \geq \frac{s}{RC_2 \omega_0^2}$$

Exemple : on souhaite réaliser un oscillateur Collpits à fo = 100 MHz.

- si on fixe le point de fonctionnement à Ic = 5 mA, la pente vaut : s = 35.Ic = 0,175 A/V
- le montage est alimenté sous E = 12V, on aura donc Vce = 6V et Re = 6/0.005 = 1,2 kΩ
- avec un gain en courant β = 50, il faut un courant base Ib = 0,1 mA, soit Rb = 5,4/0,1 = 54 kΩ
- l'inductance de la bobine vaut L = 80 nH et sa résistance parallèle R = 2,5 kΩ
- pour un accord à 100 MHz en négligeant l'influence de C1 et C2 , il faudra C = 33 pF
- on choisit alors arbitrairement C2 = 27 pF (< C) et on en déduit C1 = 37 pF
- on pourra par exemple prendre C1 = 47 pF
- la fréquence exacte d'oscillation pourra être ajustée en jouant sur L ou C



- les résistances de polarisation Rb et Re sont choisies pour polariser le transistor à Vce = E/2
- les condensateurs de liaison C1 de valeur assez élevée pour être des courts-circuits à la fréquence d'oscillation
- le transistor a une pente s en A/V



14- L'oscillateur LC de Clapp



Le montage est dérivé du Collpits par ajout d'un condensateur C3 en série avec la bobine :

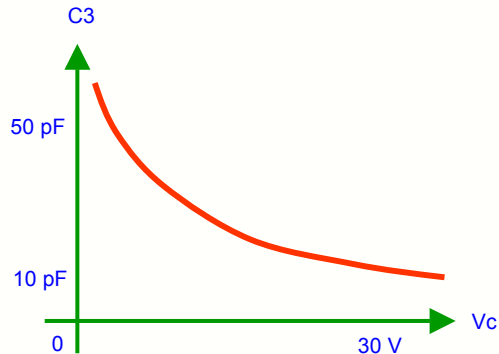
- lorsque le montage oscille, la branche L, C3 se comporte comme une bobine de valeur L' :

$$L' = L \left[1 - \frac{1}{LC_3 \omega_0^2} \right] < L$$

- la fréquence d'oscillation est un peu plus élevée que sans le condensateur C3 :

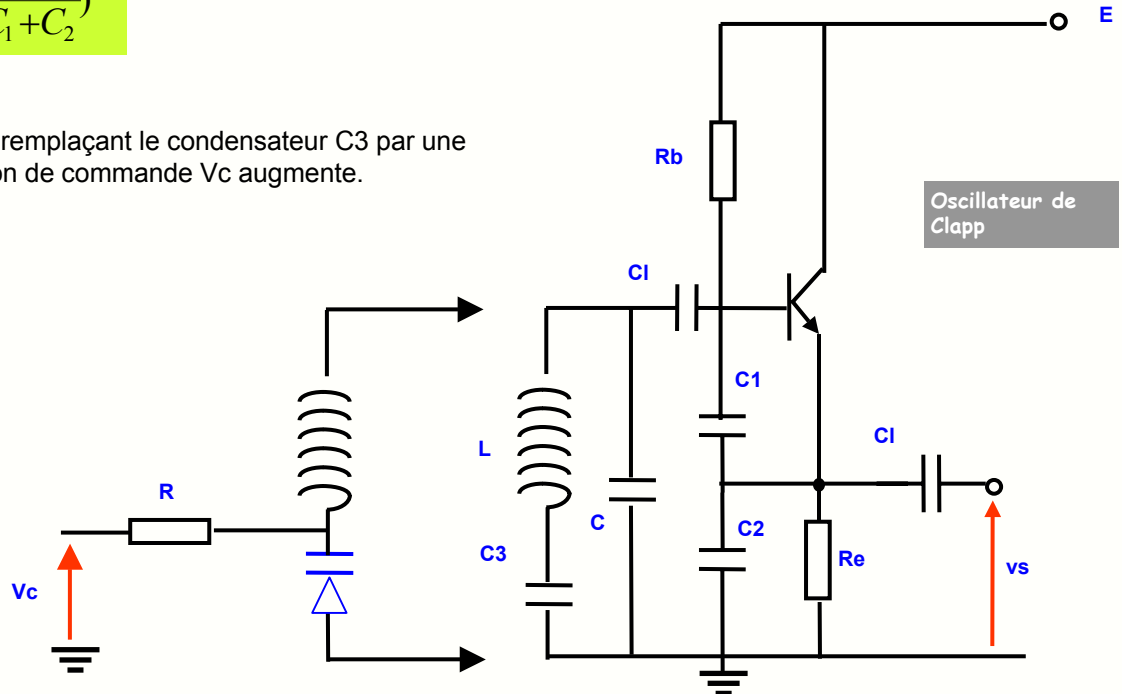
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L' \left(C + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)}}$$

- ce montage est souvent transformé en VCO en remplaçant le condensateur C3 par une diode varicap dont la capacité diminue si la tension de commande Vc augmente.



Exemple :

- C1 = 100 nF C2 = 4,7 nF
- L = 1 mH C = 6,8 nF
- si C3 = 10 nF alors fo = 66 kHz
- si C3 = 22 nF alors fo = 60 kHz
- si C3 = 47 nF alors fo = 72,5 kHz
- si C3 = 1000 nF alors fo = 55,2 kHz





15- L'oscillateur LC de Hartley

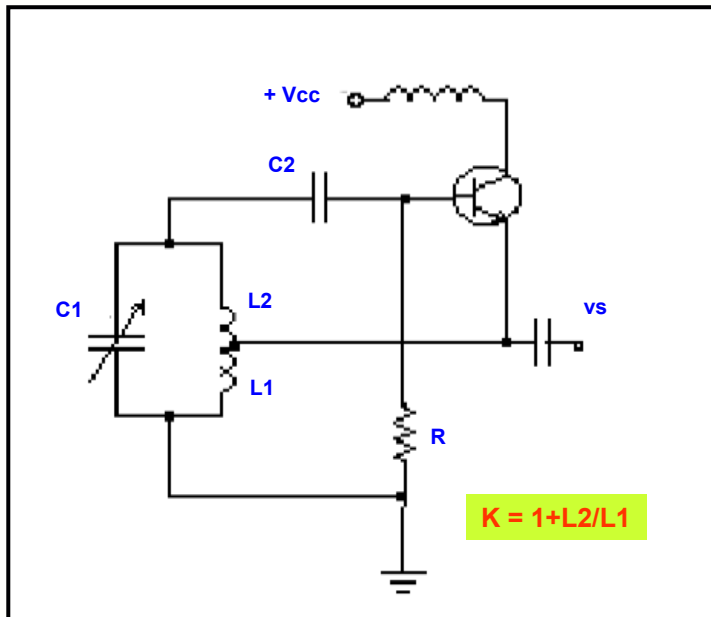


Le montage est dérivé du Collpits en remplaçant le diviseur capacitif par un **diviseur inductif** :

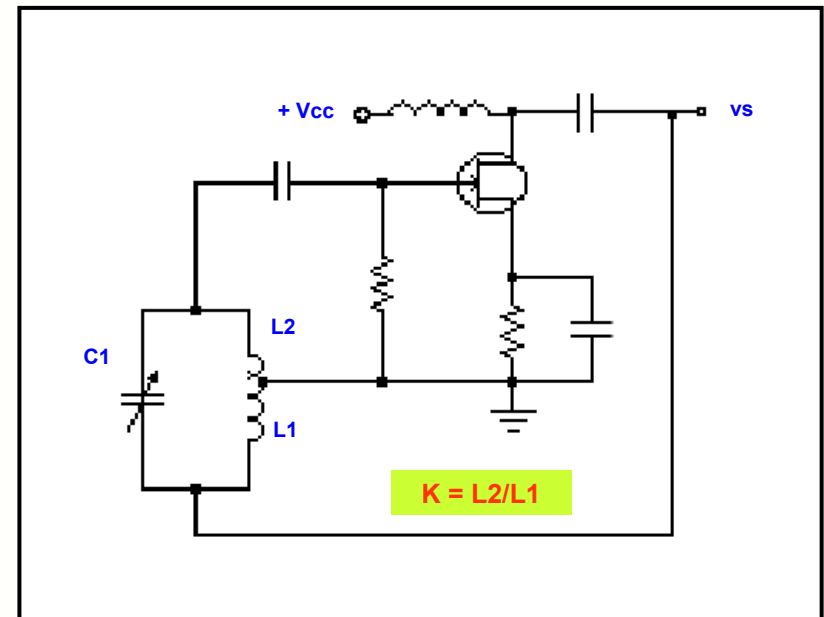
- lorsque le montage oscille, la fréquence est déterminée par C1 et $L_t = L_1 + L_2$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_1}}$$

- le quadripole de réaction a une transmittance K qui dépend des valeurs des inductances L1 et L2 selon le montage utilisé
- le transistor apporte l'**amplification en tension ou en courant** nécessaire à l'entretien de l'oscillation



Oscillateur Hartley à transistor



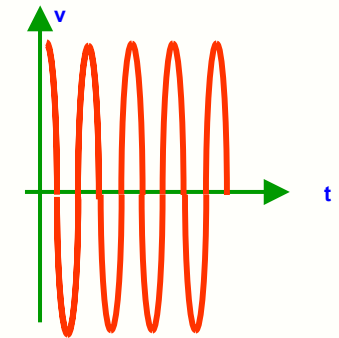
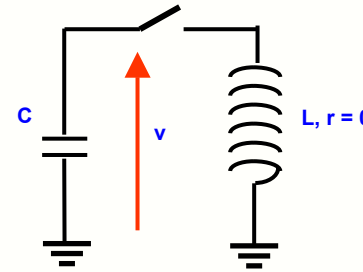
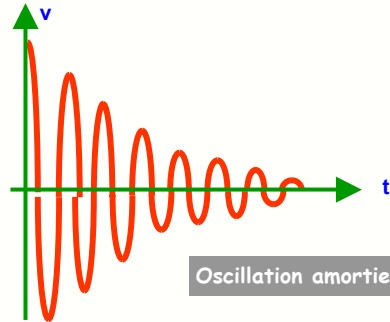
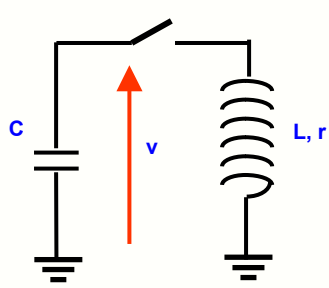
Oscillateur Hartley à TEC



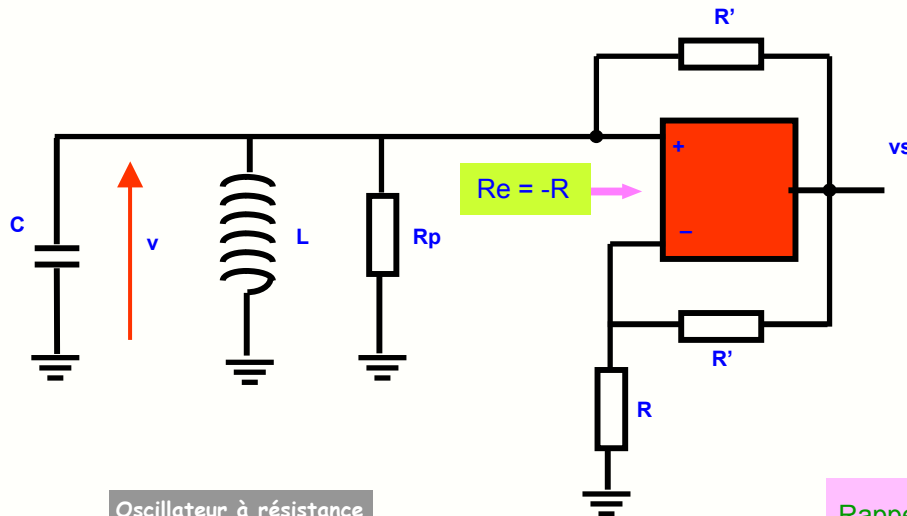
16- L'oscillateur à résistance négative



En déchargeant un condensateur dans une bobine L de résistance r faible, la tension à ses bornes est une **sinusoïde amortie** :



Si on annule la résistance r de la bobine, l'oscillation est alors **entretenu**e et permanente.



Oscillateur à résistance négative

- Exemple : pour réaliser un oscillateur à $f_0 = 100 \text{ kHz}$
- la bobine est caractérisée par $L = 1 \text{ mH}$ et $r = 25 \text{ ohms}$
 - la résonance à 100 kHz est obtenue avec $C = 2,53 \text{ nF}$
 - à cette fréquence, le Q de la bobine vaut : $Q = 25,1$
 - résistance parallèle de la bobine $R_p = 6,31 \text{ k}$
 - il faut donc une résistance négative de $R_e = -6,31 \text{ k}$
 - pour assurer le démarrage, on prendra $R_e = R = 8,2 \text{ k}$

Rappels :

coefficient de qualité d'une bobine :

$$Q_0 = \frac{L\omega_0}{r} = \frac{R_p}{L\omega_0}$$

résistance parallèle R_p d'une bobine et résistance série r :

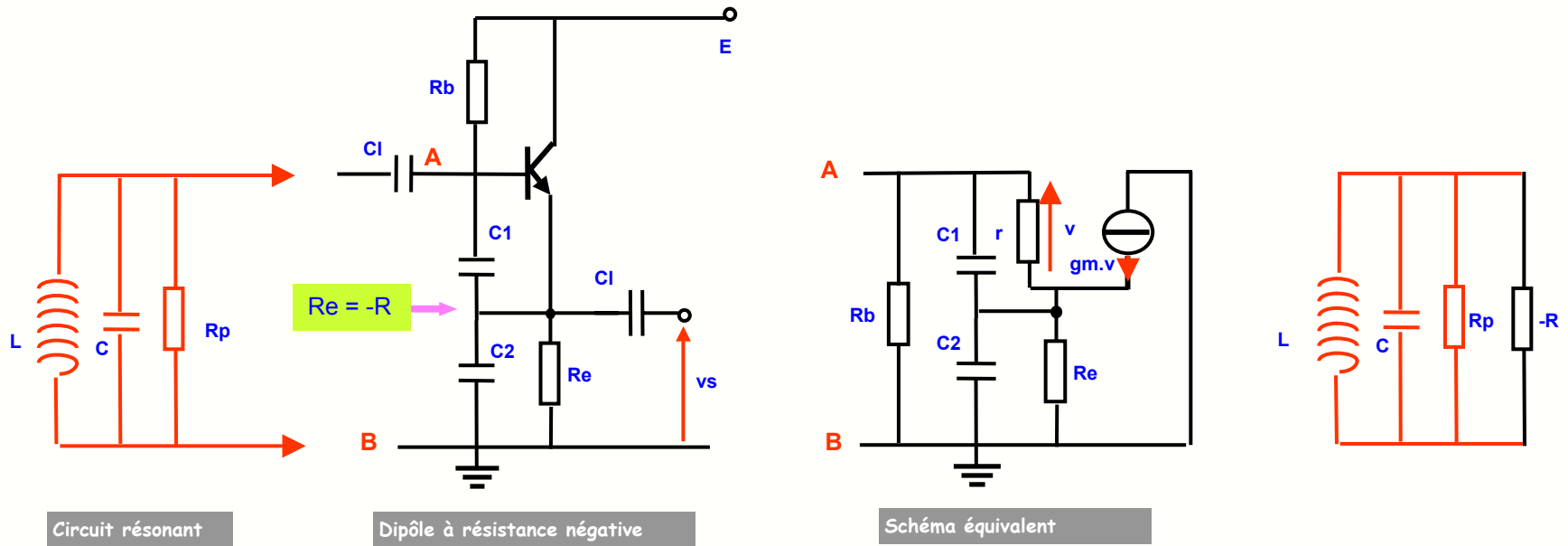
$$R_p = r \cdot Q_0^2$$



17- Un autre point de vue sur le Collpits



Les oscillateurs LC peuvent pour la plupart être étudiés comme un circuit résonant LC associé à un **dipôle à résistance négative** permettant de **supprimer la résistance d'amortissement** du circuit accordé.



- si on calcule l'impédance entre A et B en négligeant R_b , on trouve :
$$\underline{Z_e} = \frac{1}{jC_1\omega} + \frac{1}{jC_2\omega} \frac{\beta}{rC_1C_2\omega^2} \quad \text{si } rC_1\omega_0 \gg 1$$
- elle comporte bien une partie réelle négative en série avec les 2 condensateurs C1 et C2
- avec les données du Collpits à $f_0 = 100 \text{ MHz}$ vu précédemment, on trouve pour Z_e : **-332 ohms** en série avec **17 pF**, soit **-360 ohms//1,2pF**
- si la résistance parallèle de la bobine vaut $R_p = 2,5 \text{ k}$, la résistance résultante vaut : **$R_{eq} = R_p // -R = -420 \text{ ohms}$**
- le circuit accordé est amorti par une résistance négative, il sera donc le siège **d'oscillations sinusoïdales**

18- Principe de la stabilisation en fréquence



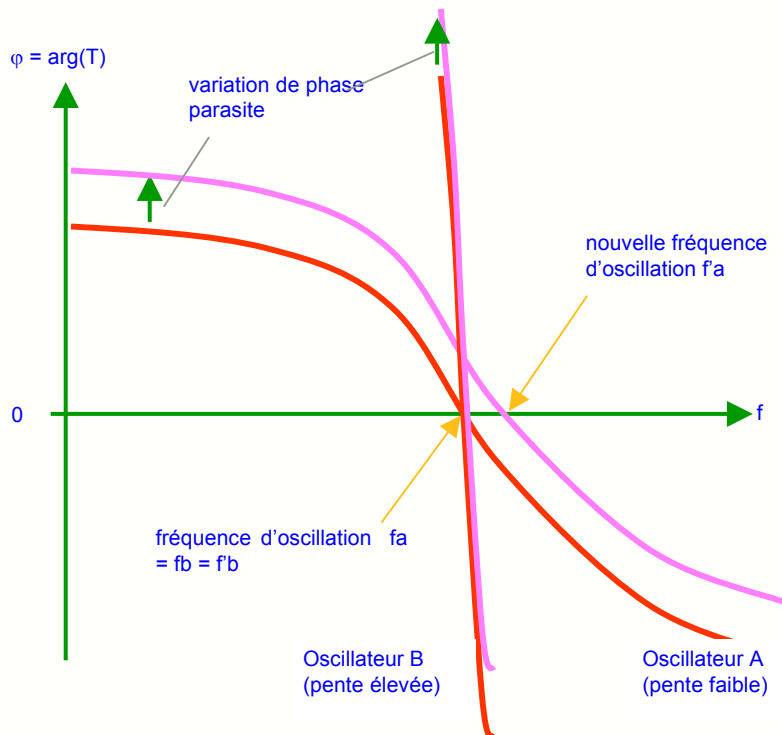
La fréquence d'oscillation f_0 est la fréquence où l'argument de la transmittance de boucle est nul :

$$\arg(T(j\omega_0)) = \arg(H(j\omega_0)) + \arg(K(j\omega_0)) = 0$$

Dans la pratique, les déphasages introduits par H et K peuvent varier légèrement sous l'influence de différents facteurs :

- main qui s'approche du montage et introduit des **capacités parasites**
- **variation de température** qui modifie les épaisseurs de jonctions et donc leur capacité parasite
- **vieillessement** des condensateurs et modification de leur valeur

Toute variation de déphasage parasite sera alors compensée par une variation de la fréquence f_0 pour que la condition de Barkhausen sur la phase reste vérifiée.



- la variation de fréquence sera d'autant plus faible que la rotation de phase est rapide au voisinage de f_0 .
- on caractérise la stabilité en fréquence par le coefficient S :

$$S = \omega_0 \frac{d\varphi(\omega_0)}{d\omega}$$

- S est d'autant plus grand que la pente de la courbe de phase est élevée autour de f_0
- une variation de phase parasite fait augmenter la fréquence de l'oscillateur A de f_a à f'_a
- la même variation de phase ne fait pratiquement pas varier la fréquence de l'oscillateur B

Règle : un oscillateur qui a une bonne stabilité en fréquence sera caractérisé par une pente importante, et donc un coefficient S de valeur élevée.



19- Stabilisation de la fréquence par résonateur



Si le quadripôle de réaction est un filtre LC passe-bande, le déphasage au voisinage de f_0 s'écrit :

$$\varphi = \arctg \left[\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} \right] \approx \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

Le coefficient de stabilité s'écrit alors :

$$S = \omega_0 \frac{d\varphi(\omega_0)}{d\omega} = -\frac{2}{RC\omega_0^2} = 2 \frac{Q}{\omega_0}$$

La stabilité en fréquence est directement liée au coefficient de qualité du filtre déphaseur utilisé dans le quadripôle de réaction ou quelquefois dans la chaîne directe.

Règle : pour une bonne stabilité en fréquence, l'oscillateur doit être construit autour de filtres déphaseurs à fort coefficient de qualité.

- avec un **circuit résonant LC**, le coefficient de qualité ne dépasse guère $Q_0 = 80$ à cause des pertes dans la bobine
- les **résonateurs**, mettant à profit des résonances mécaniques ou électromagnétiques, permettent d'atteindre des valeurs $Q_0 = 500$ et plus



Résonateur céramique

de 32 kHz à 10 MHz



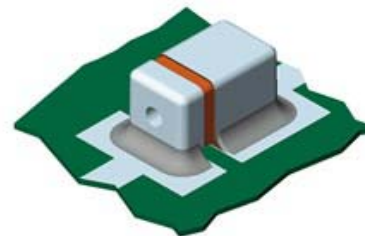
Quartz piézoélectrique

de 1 MHz à 100 MHz



Résonateur à onde de surface

de 100 MHz à 1 GHz



Résonateur céramique coaxial

de 500 MHz à 5 GHz



Résonateurs diélectriques

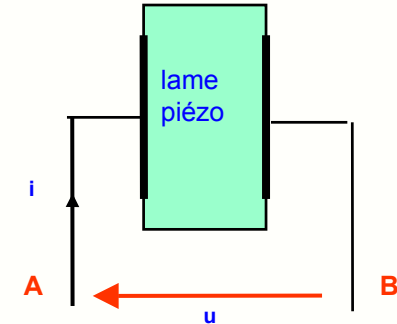
au delà de 1 GHz

20- Le quartz et le résonateur céramique

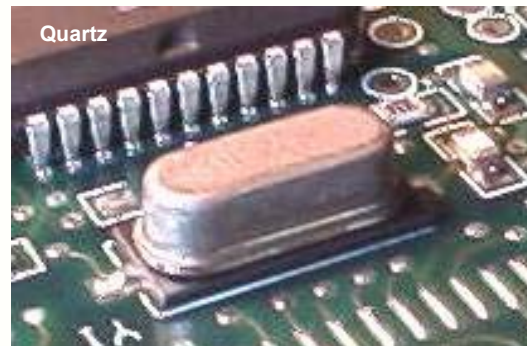


Les résonateurs céramique et les quartz sont constitués d'une lame de matériau piézoélectrique prise entre deux électrodes :

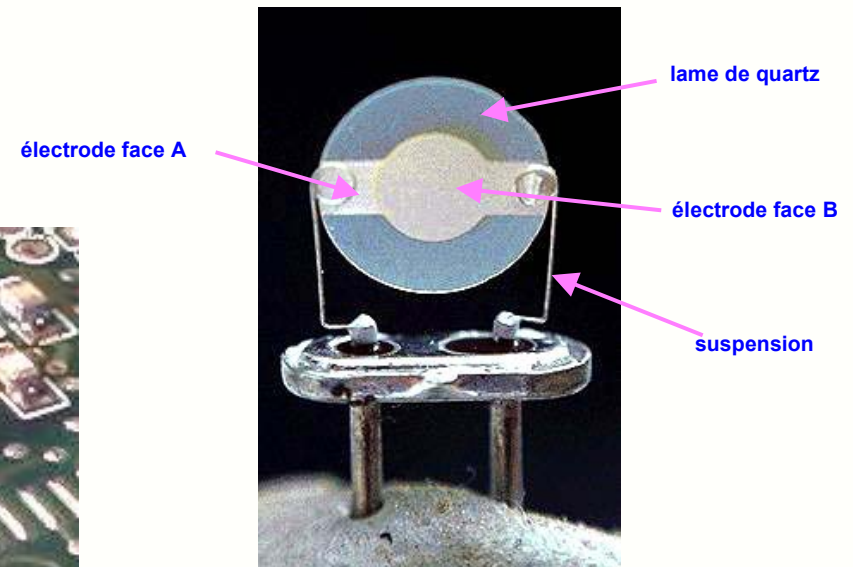
- sous l'action de la tension alternative u , la lame vibre à la même fréquence
- comme tout système mécanique, la lame possède des **fréquences de vibrations propres**
- les propriétés électriques du dipôle sont liées aux vibrations de la lame
- au voisinage de la fréquence de résonance propre de la lame, **l'impédance du dipôle subit des variations importantes, en module et en phase**
- la fréquence de résonance dépend un peu de la **température**, et le choix de la taille du quartz permet de minimiser cette influence
- ces résonateurs sont aussi sensibles aux **vibrations**, un montage soigné et une bonne suspension sont donc indispensables



Résonateur céramique



Quartz

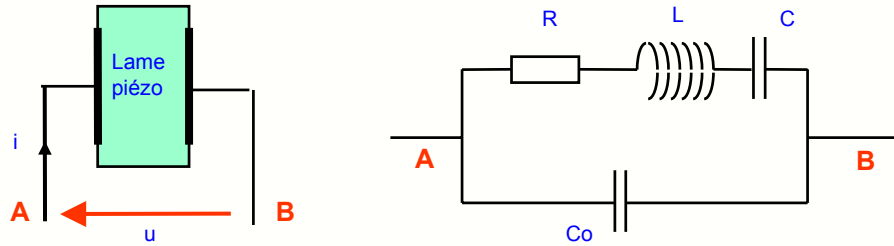




21 - Courbe d'impédance des résonateurs



La résonance mécanique des résonateurs céramique et à quartz se traduit par une variation de l'impédance entre les deux électrodes qui peut être modélisée par le schéma suivant :



- C_0 : capacité entre les électrodes (de 10 pF à 200 pF)
- R vient des pertes dans le cristal (0,01 à 1 kohms)
- L traduit l'existence de l'inertie mécanique (10 mH à 10 H)
- C traduit l'existence des forces de rappel (0,01 à 1 pF)

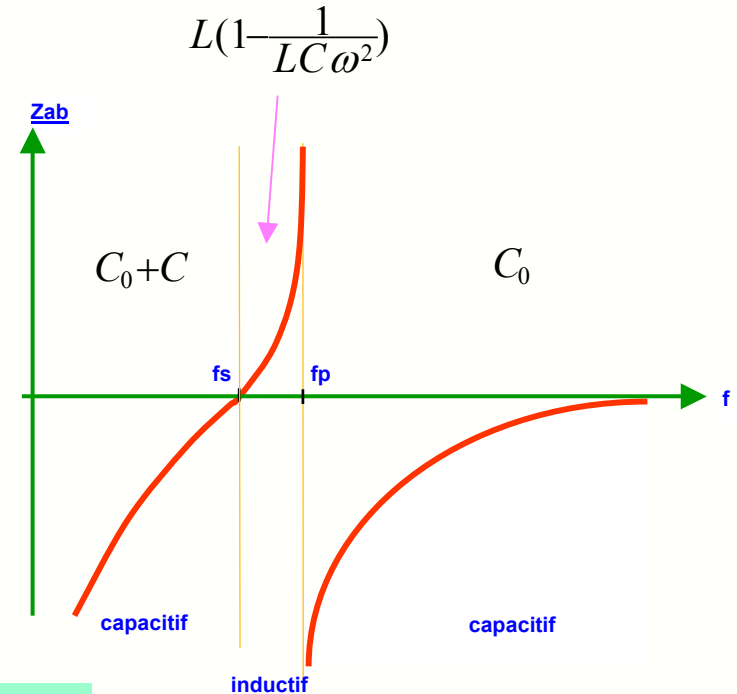
Ces composants sont caractérisés par les pulsations de résonance série et parallèle appelées aussi résonance et antirésonance, très proches l'une de l'autre :

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \frac{CC_0}{C+C_0}}} = \omega_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

Si on néglige l'influence de R, l'impédance du composant s'écrit :

$$Z = \frac{1}{j(C+C_0)\omega} \cdot \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_s^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}}$$



AN : si $L = 9,2$ mH, $C = 0,028$ pF et $C = 20$ pF on a $f_s = 9,916$ MHz et $f_p = 9,923$ MHz.

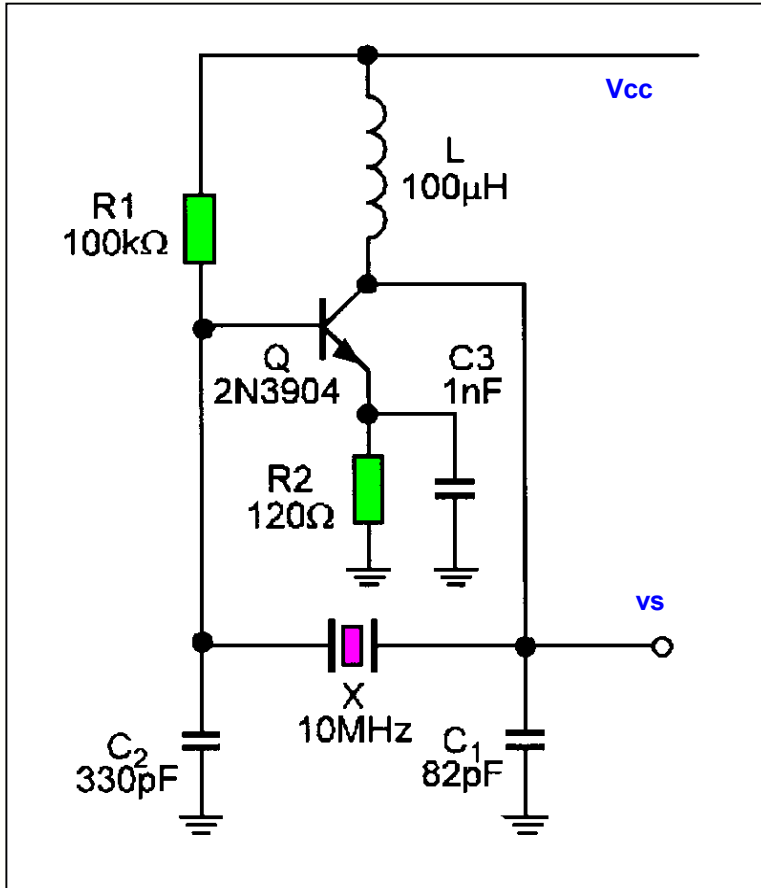


22- Exemples d'oscillateurs à quartz

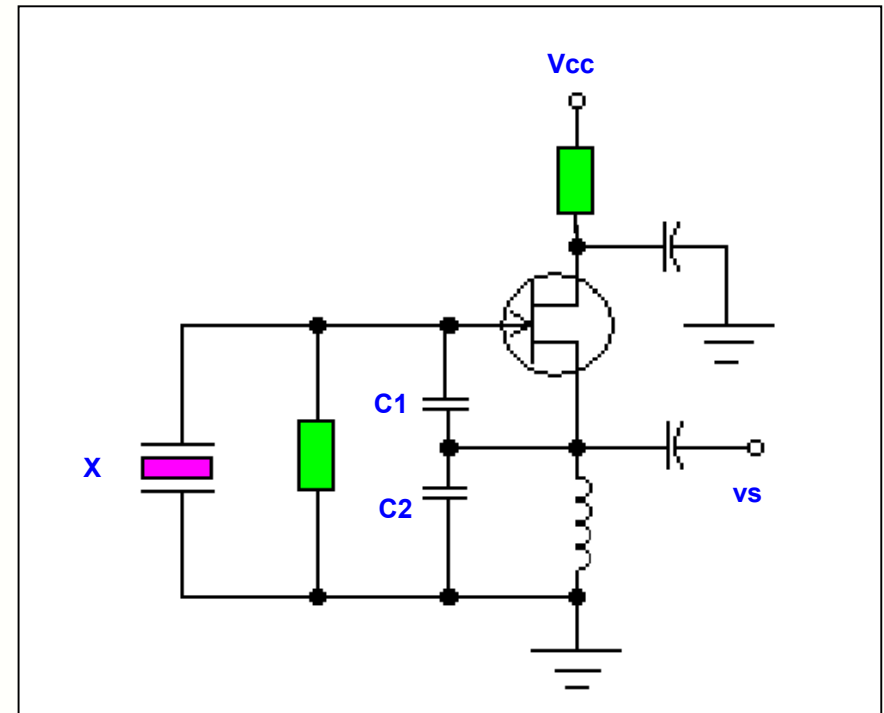


Dans la plage de fréquence comprise entre f_s et f_p , le **résonateur est équivalent à une inductance** et peut donc remplacer la bobine dans un oscillateur LC.

On retrouve donc pour les oscillateurs à quartz des structures voisines de celles utilisées pour les oscillateurs à circuit résonant LC.



Oscillateur Pierce à quartz



Oscillateur Collpits à quartz

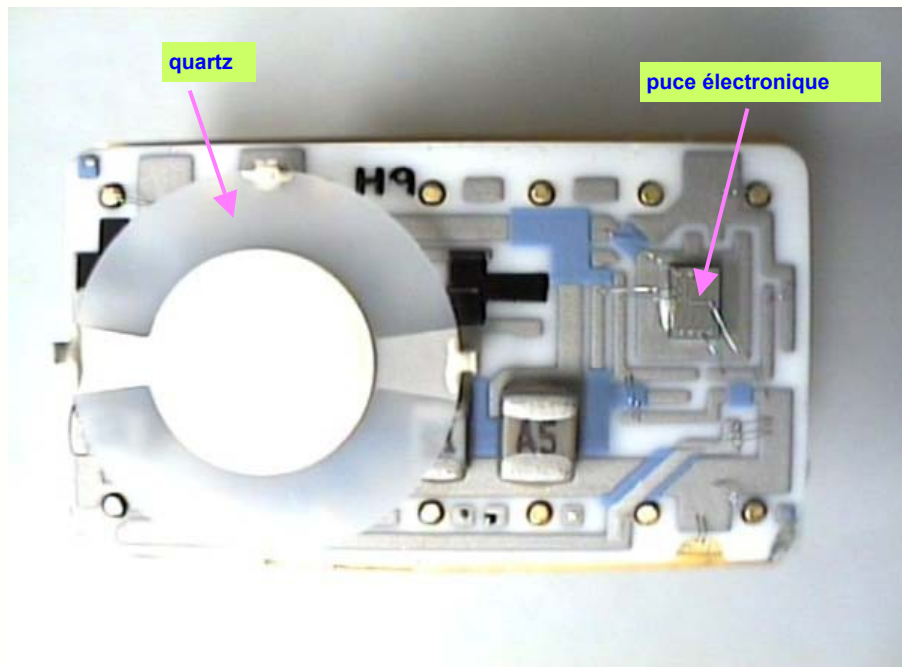


23- Réalisations commerciales d'oscillateurs à quartz

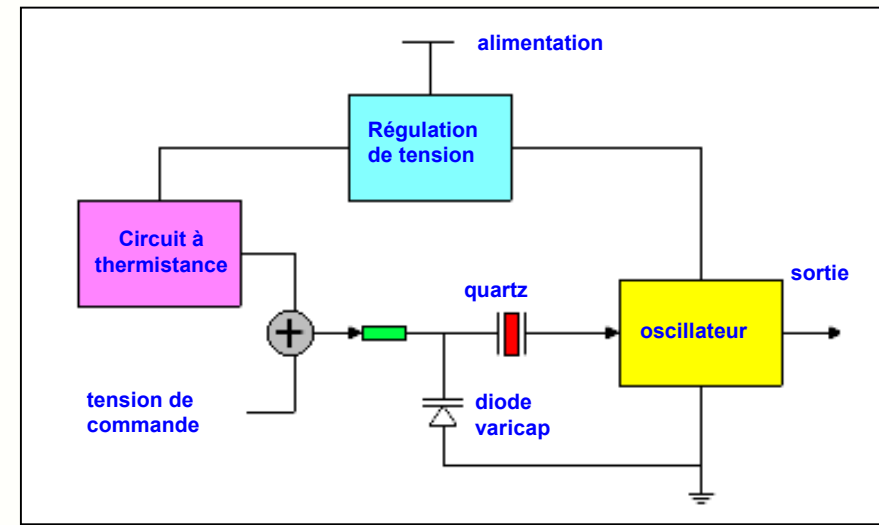


Les oscillateurs à quartz sont disponibles dans le commerce sous plusieurs versions selon l'application envisagée :

- l'oscillateur à quartz simple ou **CXO** (clock crystal oscillator)
- l'oscillateur à quartz thermostaté pour éviter les dérives en température ou **OCXO** (oven controlled crystal oscillator)
- l'oscillateur à quartz compensé en température par un capteur de température ou **TCXO** (thermally compensated crystal oscillator) assurant une meilleure stabilité que le CXO avec une consommation plus faible que le OCXO
- l'oscillateur à quartz commandé en tension ou **VCXO** (voltage commanded crystal oscillator), la tension de commande permettant de corriger la fréquence par un dispositif extérieur ou d'utiliser l'oscillateur dans une boucle à verrouillage de phase
- l'oscillateur à quartz commandé en tension et compensé en température ou **TCVCXO**



L'intérieur d'un oscillateur à quartz



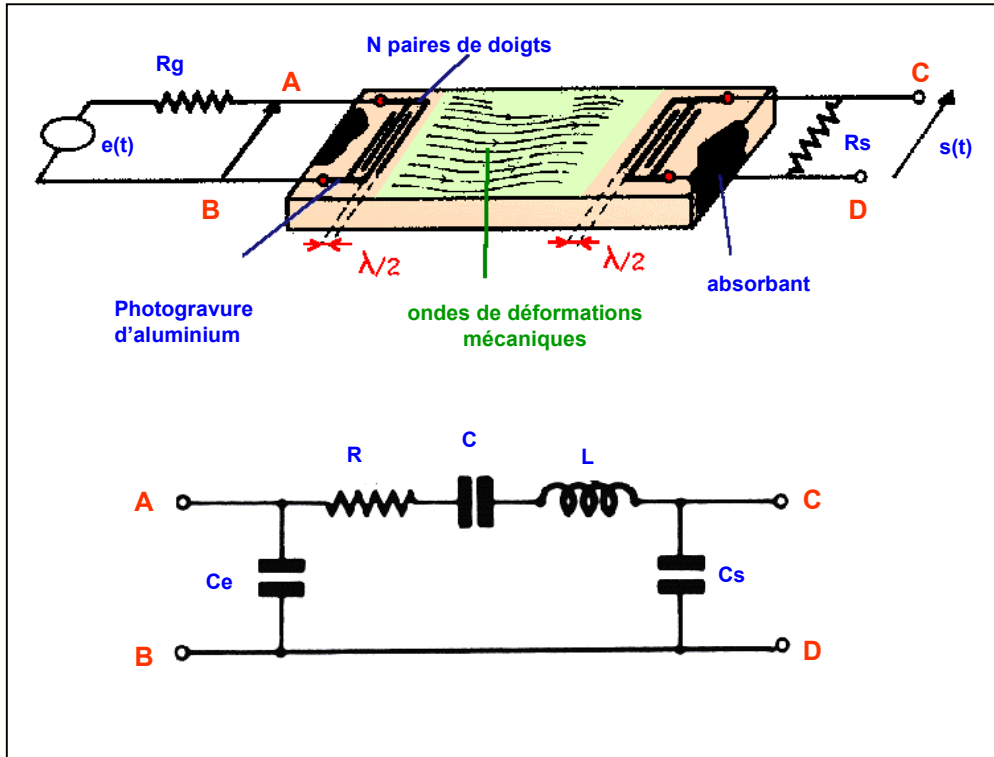
Structure d'un VCTXO



24- Résonateur à onde de surface

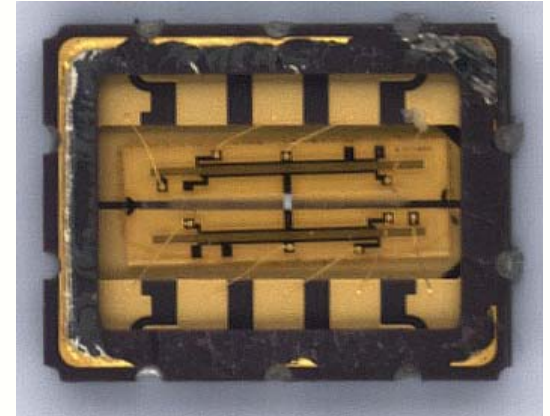


- pour des fréquences supérieures à 100 MHz, l'épaisseur de la lame de quartz devient très faible ce qui la rend trop fragile
- aux fréquences élevées, on utilise alors la propagation d'une **déformation mécanique à la surface** d'un matériau piézoélectrique
- la déformation en surface est créée par des électrodes imbriquées ou **doigts** et transformée en tension par les électrodes de sortie
- en jouant sur le nombre, l'écartement et la position des doigts on peut favoriser une fréquence et créer ainsi un résonateur
- c'est la famille des composants **SAW** (surface acoustic wave)



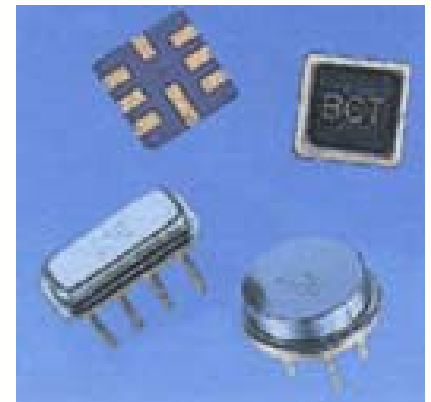
Structure d'un résonateur et schéma équivalent

Exemple de valeurs : $Q = 6500$
 ▪ $C_e = C_s = 1,3 \text{ pF}$ $R = 487 \text{ ohms}$ $L = 0,88 \text{ mH}$ $C = 0,09 \text{ fF}$



L'intérieur d'un résonateur double

Exemples de résonateurs



25- Oscillateur à résonateur à onde de surface



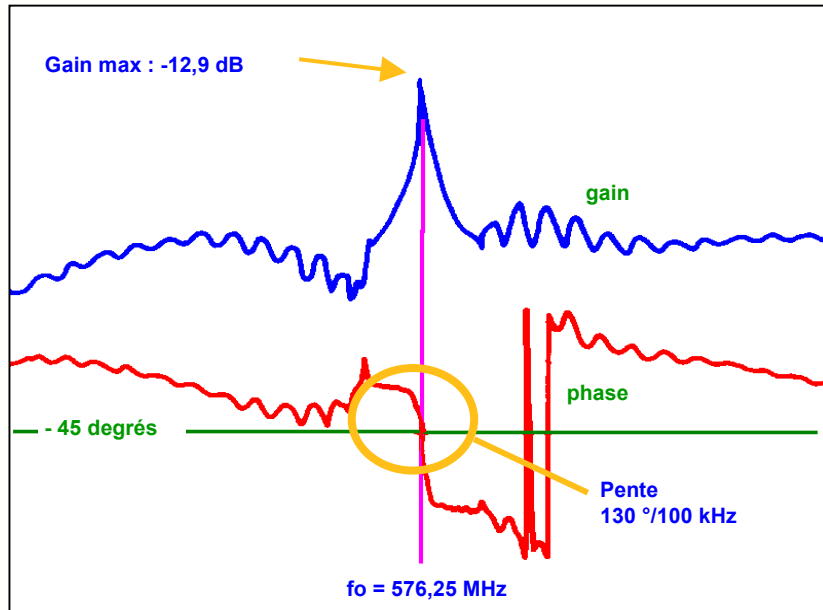
La courbe de réponse d'un résonateur à onde de surface montre qu'à la fréquence de résonance f_0 :

- le gain passe par un **maximum** (-12,9 dB pour le composant de l'exemple)
- la **phase tourne très rapidement** autour de -45 degrés

En associant ce résonateur à deux inductances et à un amplificateur émetteur commun, on peut satisfaire la condition de phase et réaliser un oscillateur dont la stabilité sera très bonne.

Ce type d'oscillateur est très utilisé dans les télécommandes de portes de voitures et de garages.

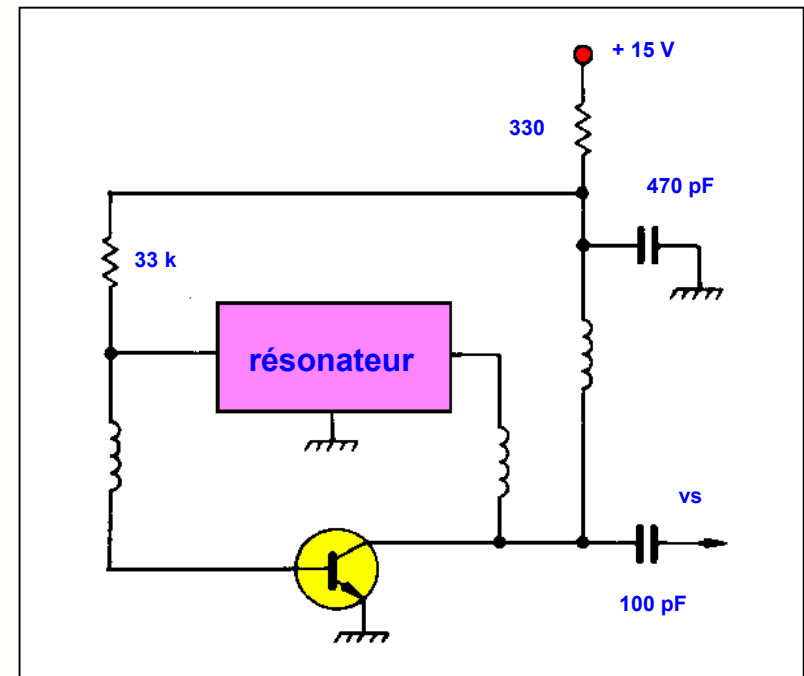
Exemple de réponse d'un résonateur



Application :

- si un déphasage parasite de 13° s'introduit dans le gain de boucle
- la fréquence de l'oscillateur varie alors de 10 kHz

Exemple d'oscillateur stabilisé par résonateur

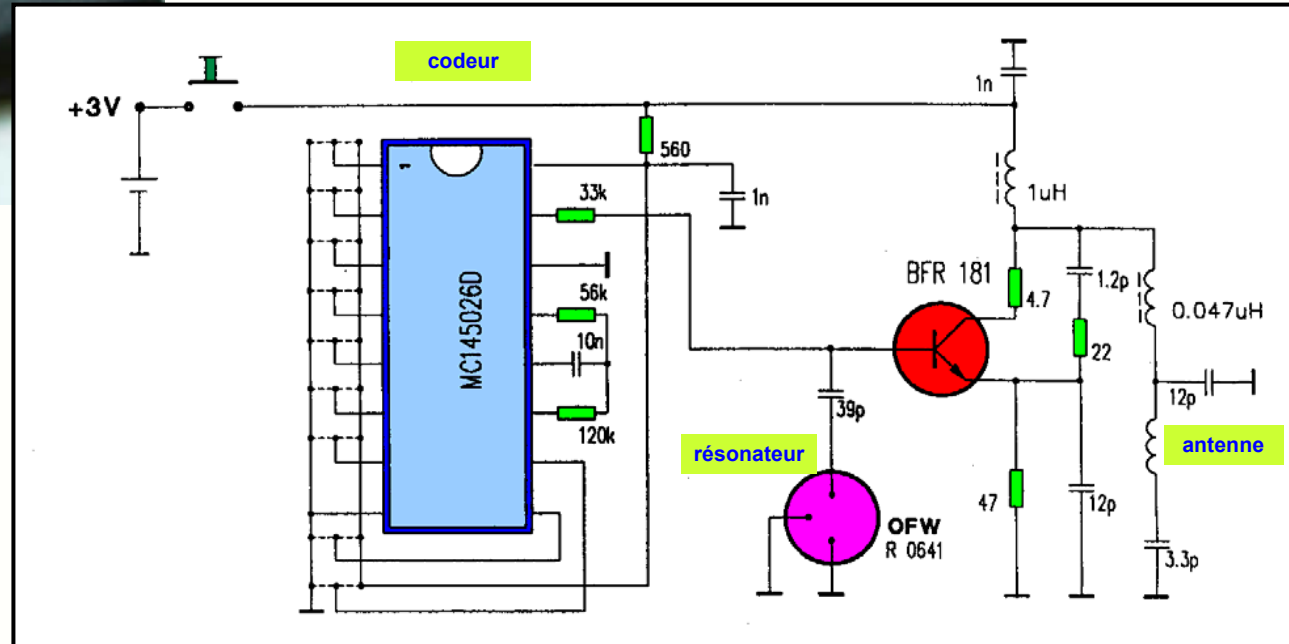
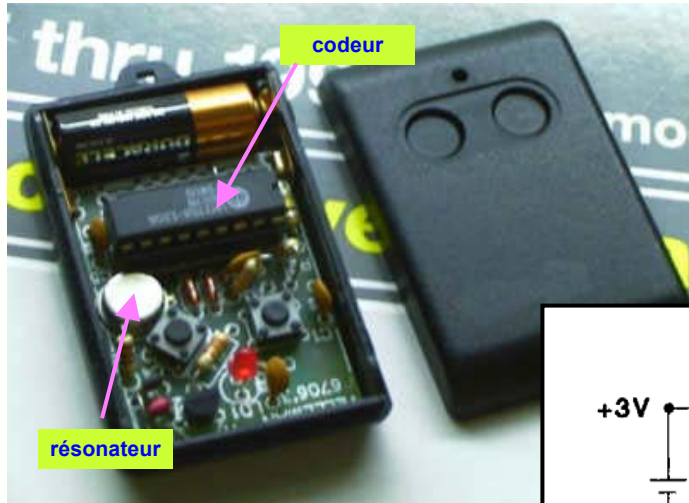


26- Exemple d'émetteur à résonateur SAW



Les résonateurs SAW sont très utilisés dans les systèmes de **télécommande** et **d'ouverture de porte** fonctionnant à **433,92 MHz** :

- un oscillateur stabilisé par résonateur produit la **porteuse**
- un codeur produit un **code binaire** sur 8 bits, 12 bits voire plus
- le code binaire **module la porteuse** en « tout-ou-rien » ou **OOK** en interrompant le fonctionnement de l'oscillateur



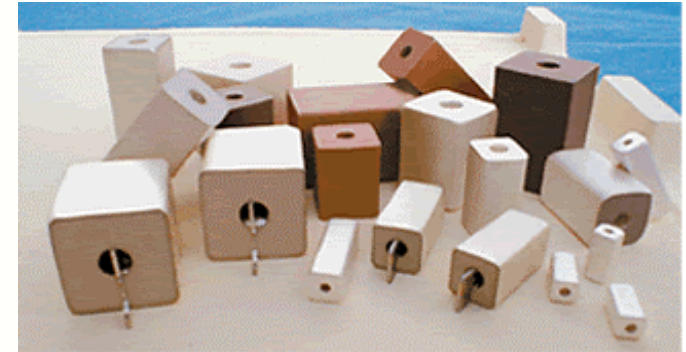
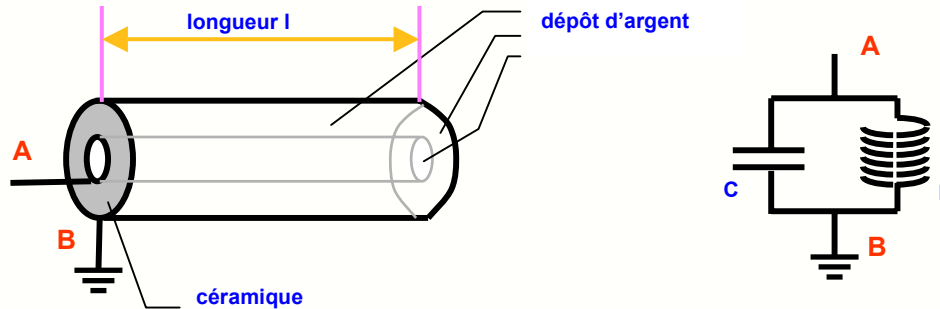


27- Le résonateur céramique coaxial



Dans la gamme de fréquence allant de 1 à 4 GHz, on utilise pour stabiliser les oscillateurs des **résonateurs diélectriques** constitués d'un tube de céramique au titanate de zirconium-étain, caractérisé par une permittivité relative très élevée (8 -20 -36 - 98 selon la composition)

Ces tubes sont argentés sur les faces intérieures et extérieures et ont donc la structure d'un tronçon de **ligne coaxiale en court-circuit**.



Lorsque la longueur l de ce résonateur est égale au quart de la longueur d'onde, ce tronçon est équivalent à un circuit LC bouchon résonant à la fréquence f_0 :

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f_0} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} 4f_0}$$

soit

$$f_0 = \frac{c}{4l\sqrt{\epsilon_r}}$$

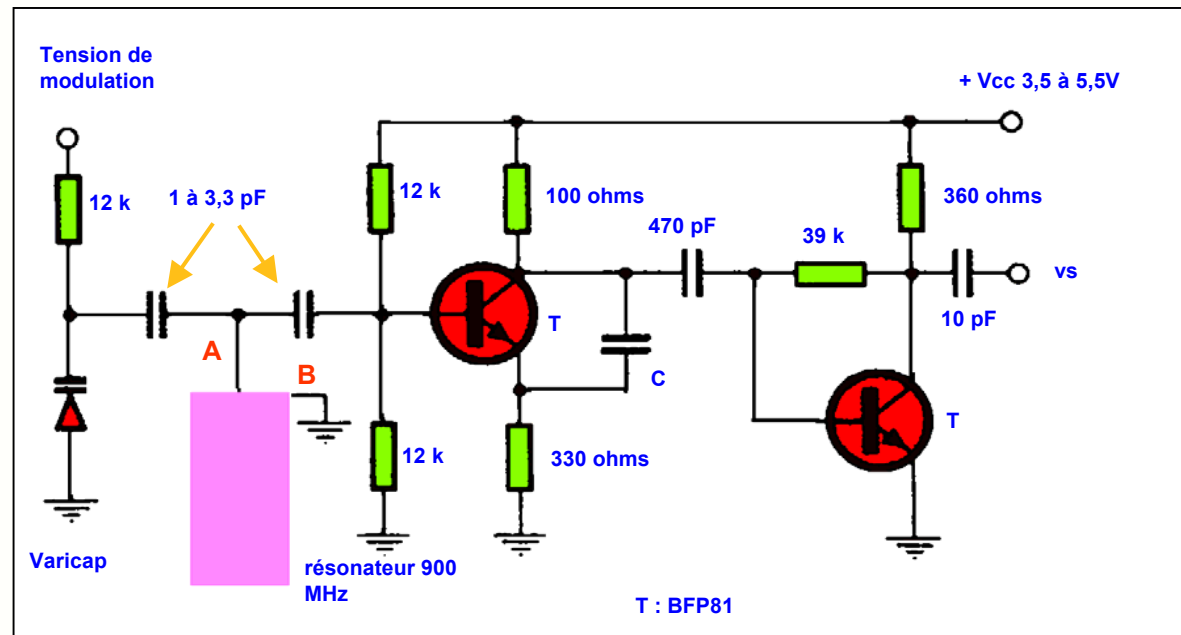
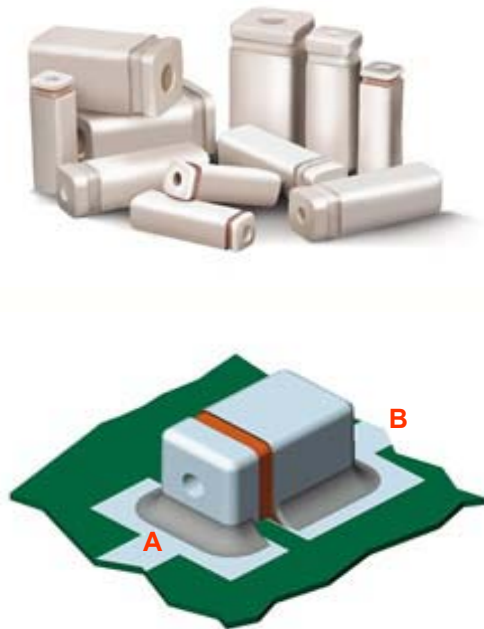
Par exemple, un résonateur de longueur $l = 8,8$ mm et fabriqué en céramique de permittivité relative 38 a une résonance à $f_0 = 1,38$ GHz.

- le **coefficient de qualité** de ce circuit résonant est de l'ordre de $Q = 500$ et bien plus élevé que celui d'un circuit accordé réalisé avec une bobine et un condensateur.
- le résonateur céramique coaxial remplace un circuit LC parallèle lorsque les valeurs de L et C deviennent tellement faibles qu'elles sont difficiles à réaliser dans la pratique.

28- Oscillateur à résonateur céramique coaxial



- l'utilisation d'un résonateur céramique coaxial est simple et ne nécessite aucun bobinage
- le résonateur, équivalent à un circuit LC accordé sur 900 MHz, est couplé au premier transistor par deux condensateurs de 1 à 3,3 pF
- la diode varicap BB111 en parallèle avec le résonateur permet de faire varier la fréquence d'oscillation d'environ 10 %
- le condensateur C assure la réaction sortie-entrée nécessaire à la mise en oscillation
- le niveau de sortie est compris entre -2 et +5 dBm
- le premier transistor équipé de son condensateur de réaction C présente vu de l'entrée une résistance négative R_n
- cette résistance négative permet de compenser la résistance équivalente parallèle du résonateur et de faire osciller l'ensemble
- le second transistor sert simplement d'amplificateur tampon pour éviter que la charge ne vienne modifier la fréquence



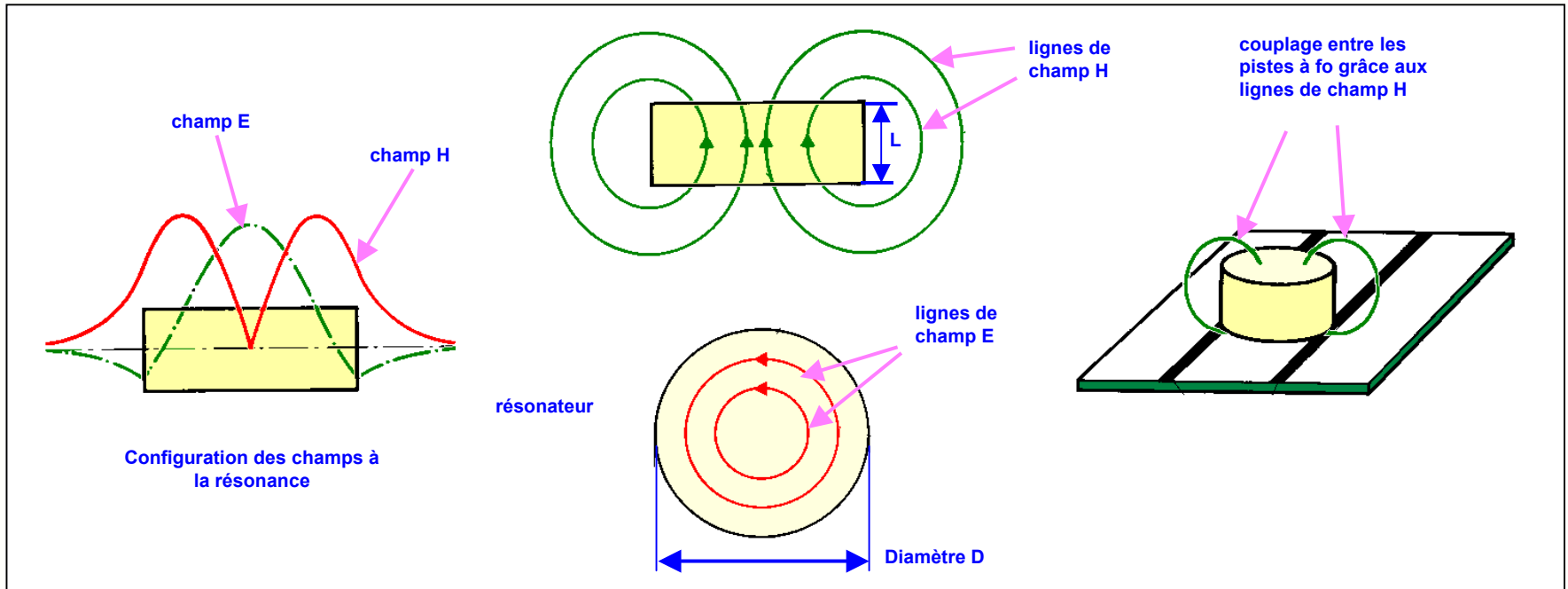
Exemple de VCO 900 MHz stabilisé par résonateur



29- Le résonateur diélectrique



Pour les fréquences plus élevées, les oscillateurs sont stabilisés en fréquence à l'aide de résonateurs diélectriques constitués d'un disque en céramique au titanate de zirconium-étain.



La résonance de ce disque est obtenue lorsque la longueur d'onde du signal dans la céramique est égale au diamètre du résonateur :

$$D = \lambda_{\text{céram}} = \frac{\lambda_{\text{air}}}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

d'où

$$f_0 = \frac{c}{D \sqrt{\epsilon_r}}$$

avec une épaisseur du disque optimale : $L = 0,4 \cdot D$

Application numérique : pour un diamètre $D = 5 \text{ mm}$, la résonance est à $f_0 = 9,73 \text{ GHz}$ et $L = 2 \text{ mm}$.

Ce résonateur permet un **couplage sélectif** entre la sortie et l'entrée d'un amplificateur à transistor ou à TEC et joue ainsi le rôle de quadripôle de réaction.



30- Oscillateur à résonateur diélectrique

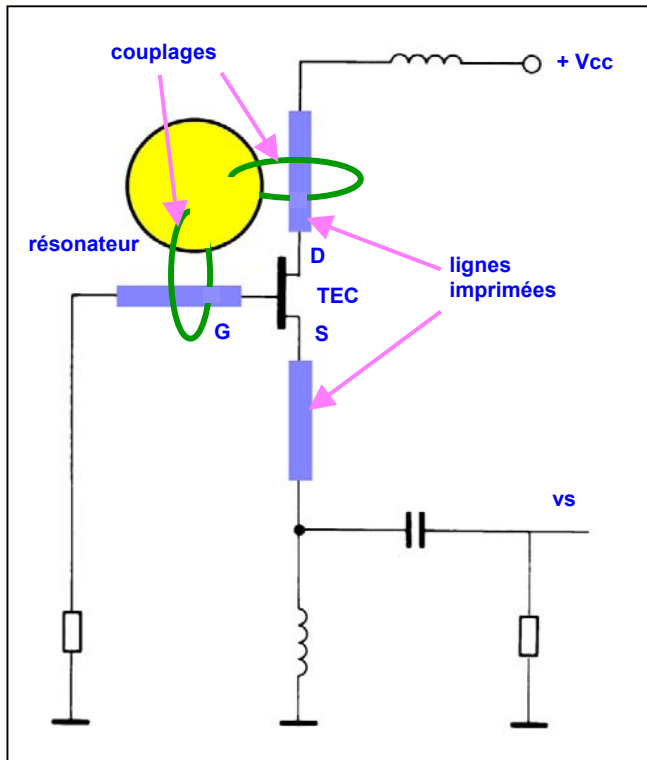


Un oscillateur dans la bande des 10 GHz est constitué :

- d'un amplificateur à TEC équipé de lignes imprimées résonantes dans le drain, la grille et la source
- d'un résonateur diélectrique placé au voisinage des lignes de drain et de grille qui assure un couplage magnétique sélectif

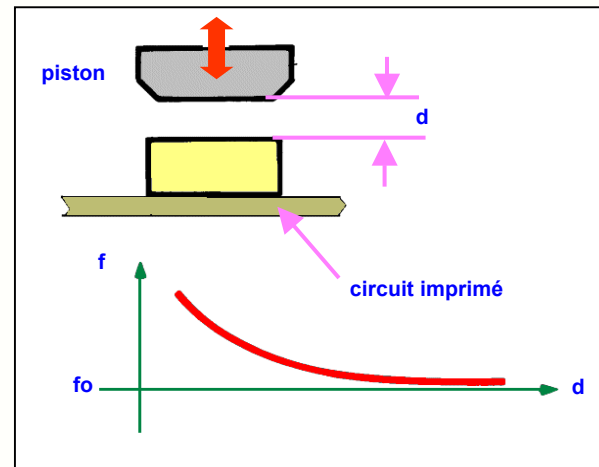
A la fréquence de résonance du résonateur, le signal passe par couplage magnétique du drain vers la grille, et le résonateur joue le rôle de **quadripôle de réaction** pour l'oscillateur.

Ce couplage se fait avec pertes, et le gain du TEC permet de compenser l'atténuation liée au couplage imparfait.



Oscillateur stabilisé par résonateur diélectrique

Remarque : la fréquence de l'oscillateur peut être ajustée en approchant du résonateur un piston métallique monté sur une vis de réglage



Ajustage de la fréquence

Ce type d'oscillateur est utilisé dans les radars Doppler à 9,9 GHz et les têtes de réception pour télévision par satellites (oscillateur local entre 10 et 11 GHz).

31 - Oscillateur à 9,9 GHz d'un 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.

- oscillateur à **TEC**
- seulement **3 composants**
- stabilisé par **résonateur diélectrique**

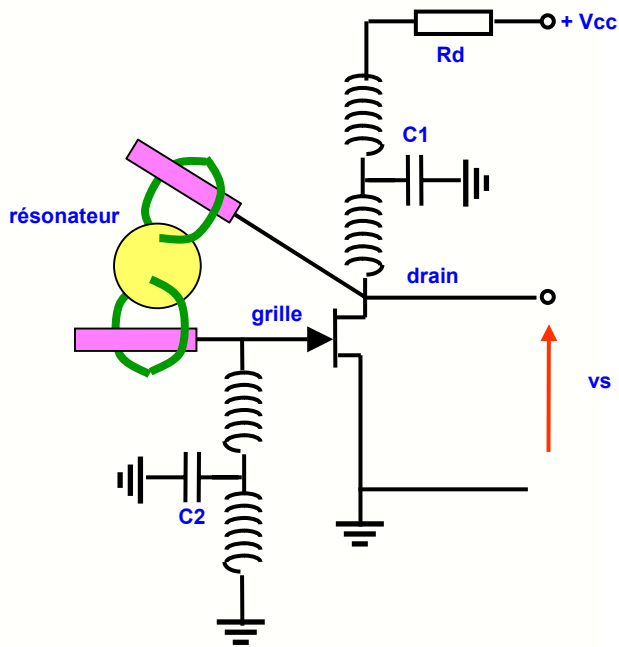
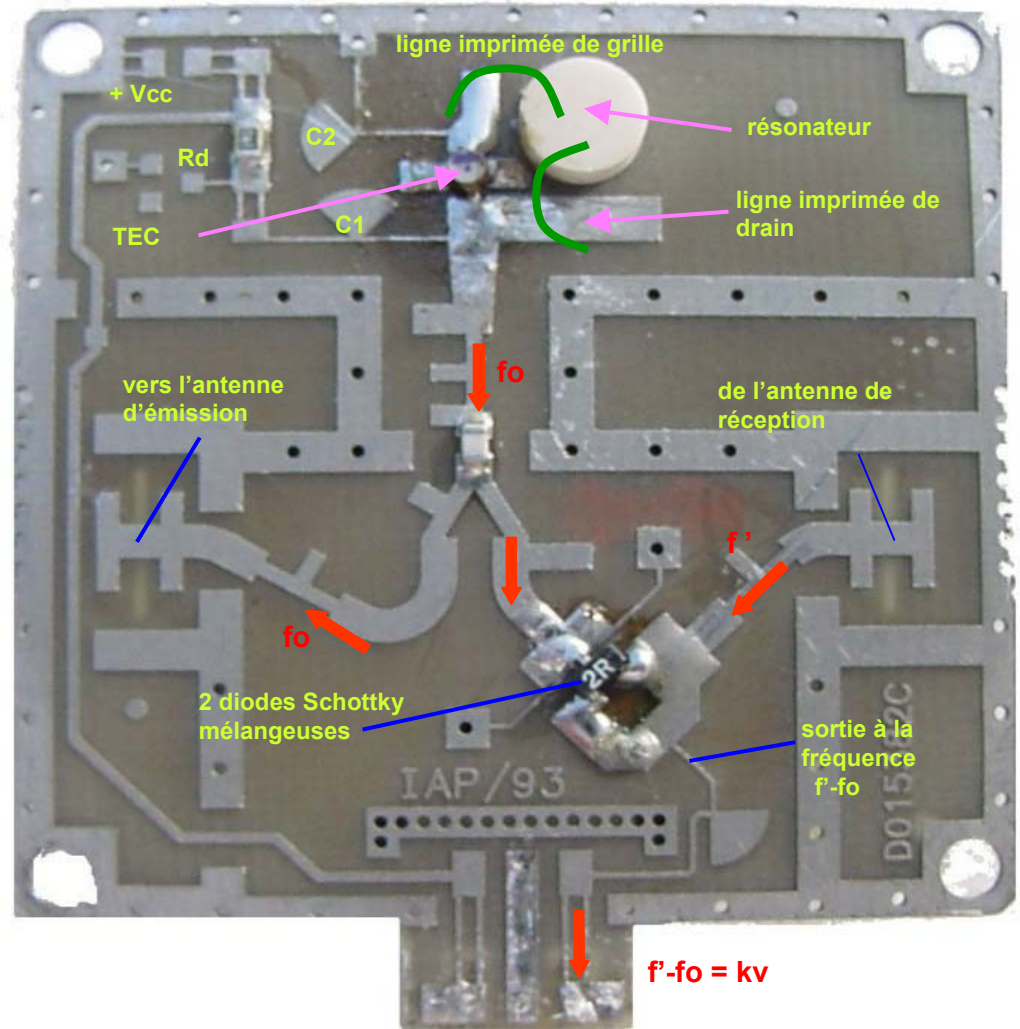


Schéma de l'oscillateur



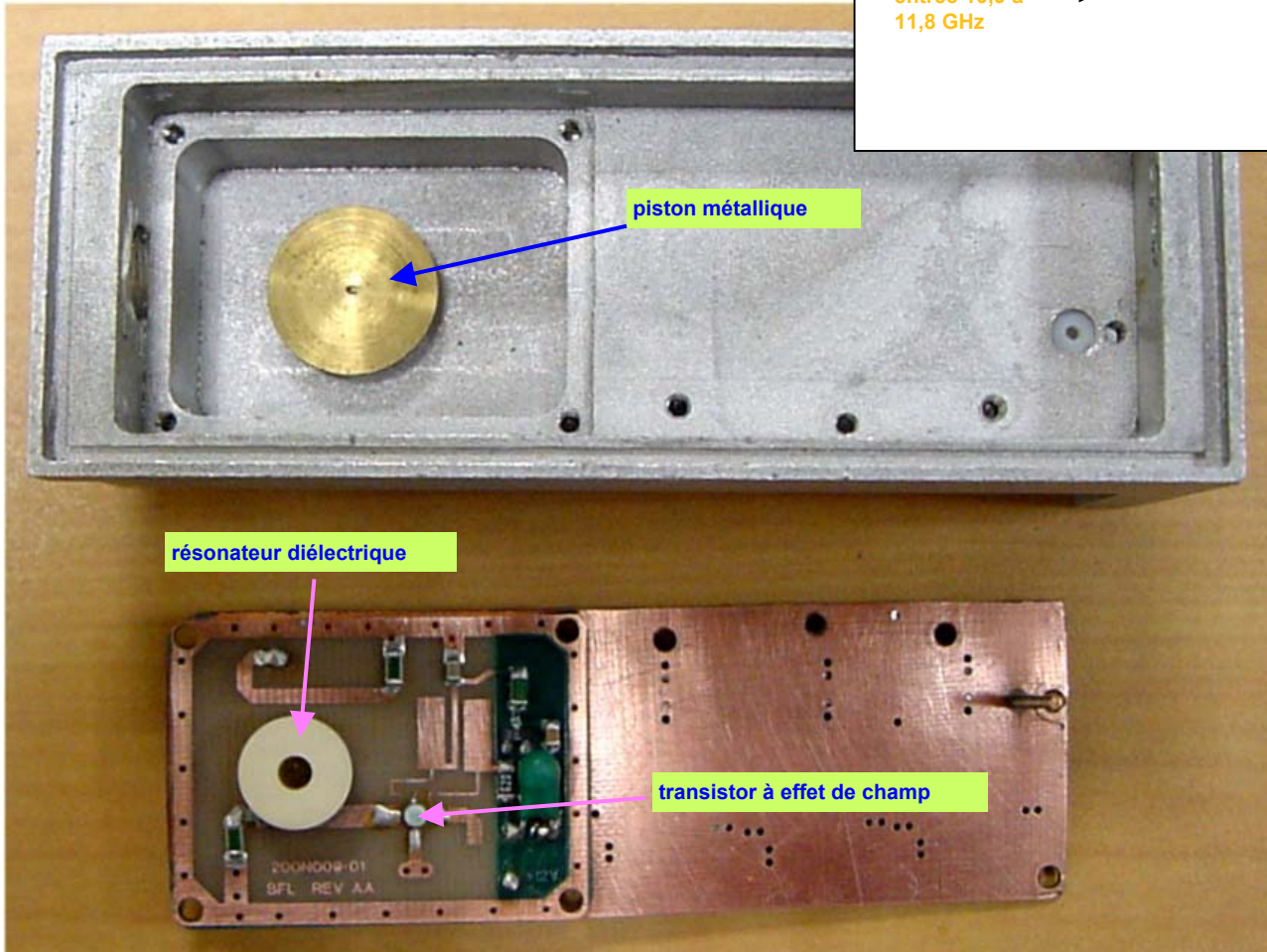
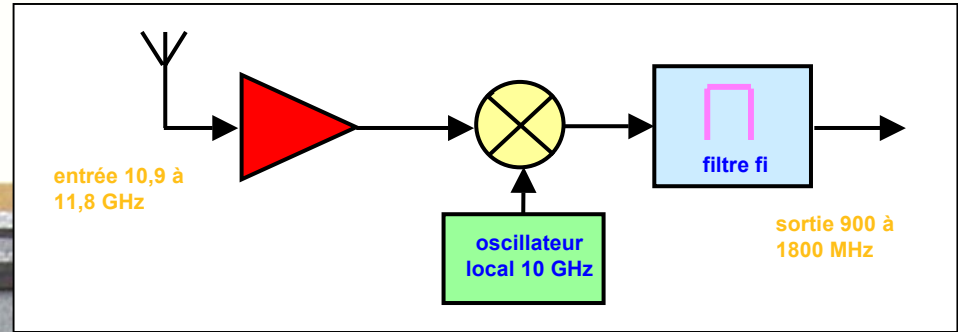


32- Oscillateur à 10 GHz d'une tête TV-satellite



Tête de réception pour la télévision satellite analogique :

- mono-bande 10,9 à 11,8 GHz
- oscillateur local stabilisé par résonateur diélectrique
- ajustage de la fréquence par piston

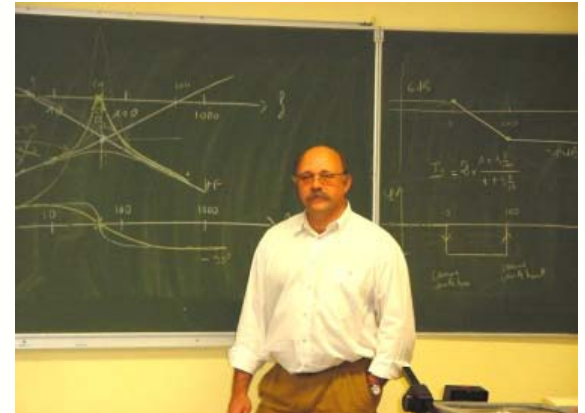




La plage de Zillisheim ...



euh...pour être honnête...St Gilles à La Réunion !



FIN