

OSCILLATEURS À QUARTZ OU RÉSONATEUR CÉRAMIQUE POUR HORLOGE DE $\mu\text{P}/\mu\text{C}$

1) INTRODUCTION

Les oscillateurs à quartz sont destinés à produire des signaux de fréquence de haute précision et de grande stabilité dans un intervalle de température donné et dans le temps. L'ordre de grandeur de la précision sur la fréquence d'oscillation avec un quartz courant de bonne qualité et dans des conditions déterminées (voir plus loin) est de +/- 30 ppm soit 0,003 % sans aucun ajustement.

Les résonateurs céramiques s'emploient comme les quartz. La précision et la stabilité sont moins bonnes, mais leur prix est sensiblement plus faible qu'un quartz. L'ordre de grandeur de la précision sur la fréquence d'oscillation est de 0,5%.

Les quartz ou résonateurs céramiques étudiés ici sont ceux fabriqués pour réaliser des oscillateurs pour $\mu\text{P}/\mu\text{C}$ (fréquence d'oscillation de qqs MHz jusqu'à une vingtaine de MHz) et pour leurs circuits périphériques. Ces oscillateurs sont faciles à réaliser à condition de bien connaître quelques notions essentielles. Pour la mise en œuvre d'un quartz, les notions théoriques nécessaires sur le fonctionnement sont très réduites ; seules quelques notions théoriques sont donc présentées ici. On approfondira par contre certains aspects souvent non mentionnés dans les ouvrages traitant uniquement de la théorie et indispensables pour une bonne utilisation.

2) GÉNÉRALITÉS

2.1) PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES REMARQUABLES DES QUARTZ ET RÉSONATEURS CÉRAMIQUES

Les quartz (composants) et résonateurs céramiques possèdent des propriétés piézo-électriques qui sont utilisées pour produire des oscillations électriques. Les parties actives de ces composants sont des plaquettes de petites dimensions munies de 2 électrodes (voir plus loin).

L'effet piézo-électrique direct crée une polarisation électrique en faisant apparaître des charges électriques sur les électrodes du composant lorsqu'on lui applique une contrainte mécanique (déformation). L'effet piézo-électrique peut se produire dans le cas de déformation de traction, de compression, de flexion ou de cisaillement selon la constitution de la plaquette (voir plus loin).

L'effet piézo-électrique inverse crée une déformation lorsqu'on applique une tension entre les électrodes métalliques de la plaquette.

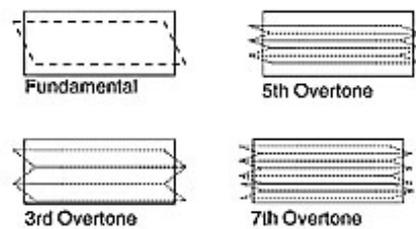
Les 2 effets piézo-électriques permettent d'obtenir des propriétés électriques remarquables.

Si on applique entre les électrodes d'un quartz (ou d'un résonateur céramique) une tension alternative u , l'effet piézo-électrique inverse y crée des contraintes mécaniques internes tendant à la déformation. Cette déformation est extrêmement faible, sauf lorsque la fréquence d'excitation devient proche ou égale à une fréquence propre de vibration de la plaquette, c'est-à-dire lorsqu'elle entre en résonance. L'effet piézo-électrique direct se manifeste alors par un mouvement de charges important, donnant lieu à un courant qui se superpose au courant capacitif d'excitation et le dépasse largement en amplitude.

En appliquant aux bornes des électrodes une tension d'amplitude constante et de fréquence variable, le courant passe par un maximum à chaque résonance de la plaquette. Les fréquences de résonances ne sont en général pas multiples les unes des autres. Le phénomène de résonance est plus marqué à une fréquence fondamentale et à des fréquences harmoniques de rang impair (overtone).

Lors de la fabrication du composant, on s'arrange pour privilégier une résonance particulière.

On voit sur la figure suivante 4 résonances en cisaillement d'épaisseur.



Pour les oscillateurs de fréquence < qqs dizaines de MHz, on utilise toujours la résonance de fréquence la plus basse.

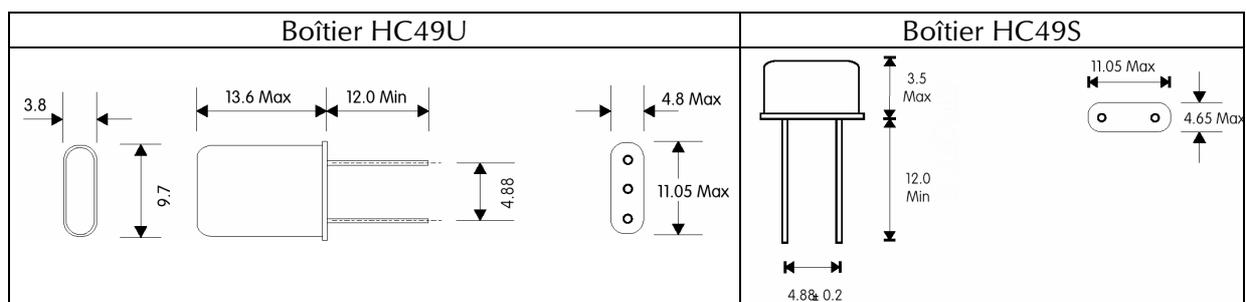
2.2) FABRICATION

2.2.1) QUARTZ

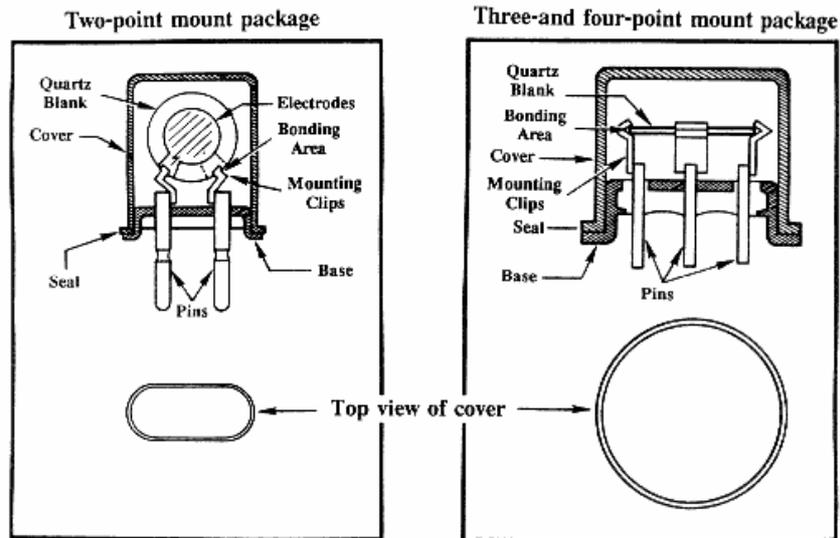
Les quartz (composants) sont obtenus en taillant un mono cristal de SiO_2 artificiellement produit. La fabrication du mono cristal nécessite des opérations délicates (croissance du cristal à partir d'un germe dans des conditions de température et de pression précises). Il en est de même pour la taille (angle par rapport aux axes cristallographiques, dimensions). Le bout de SiO_2 est recouvert d'électrodes sur 2 des ses faces et encapsulé dans un boîtier, en général métallique pour les quartz et en résine pour les résonateurs céramiques. Pour les quartz, un ressort permet de maintenir la plaquette au milieu du boîtier.

Du fait de son conditionnement, un quartz est assez sensible aux chocs (fortes accélérations ou décélérations).

Les boîtiers de quartz de quartz les plus courants sont les boîtiers métalliques références HC49U (standard) et HC49S (bas profil).



Le montage pour un quartz est représenté sur la figure suivante.

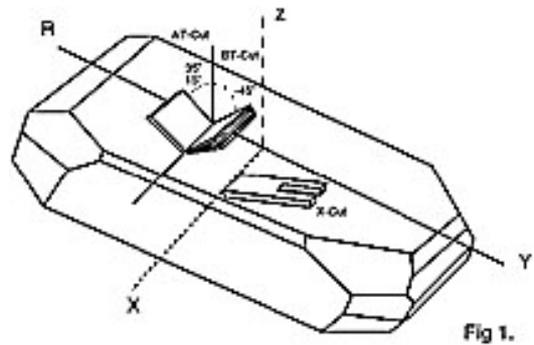


Le morceau de quartz est découpé selon une coupe parmi plusieurs possibles. Le nom des ces coupes est souvent donné dans les notices constructeurs.

La coupe la plus utilisée pour les oscillateurs d'horloge des $\mu P/\mu C$ **est la coupe AT**. Le quartz fonctionne en cisaillement d'épaisseur.

Pour les horloges / calendrier temps réels nécessitant une fréquence d'oscillation plus basse, on utilise une autre coupe.

Chaque coupe permet de fixer le mode de travail (flexion, cisaillement, ...) ainsi que certaines des propriétés du quartz (stabilité, ...)



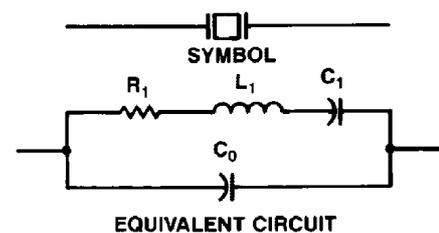
2.2.2) RÉSONATEUR CÉRAMIQUE

Les résonateurs céramiques sont fabriqués par moulage. Lors de la phase de refroidissement, la céramique est soumise à un fort champ électrique, ce qui lui confère ses propriétés piézo-électriques.

Les boîtiers des résonateurs sont en résine

3) COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE D'UN QUARTZ OU D'UN RÉSONATEUR CÉRAMIQUE

Autour d'une des fréquences de résonance de la plaquette, c'est-à-dire autour de la fréquence d'oscillation de l'oscillateur final, le quartz ou résonateur céramique peut se modéliser comme suit :

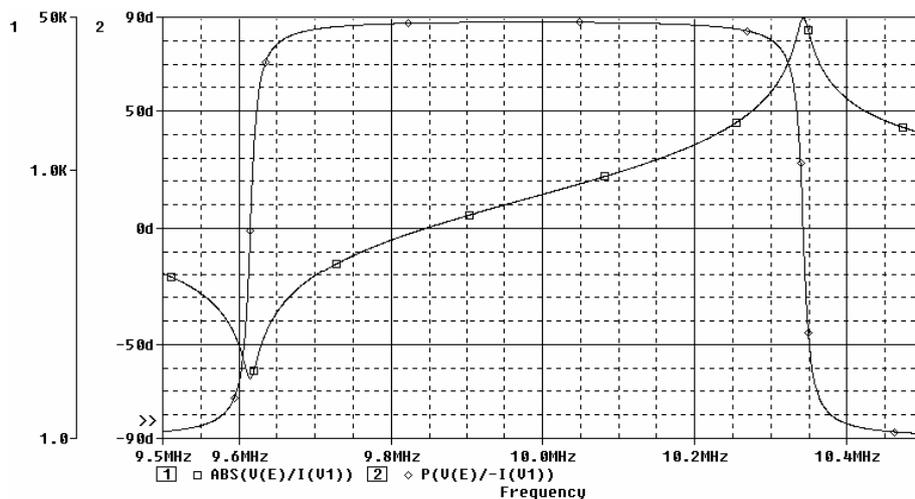


L'impédance du quartz ou du résonateur céramique varie rapidement autour de 2 fréquences caractéristiques :

- la fréquence de résonance série de la branche motionnelle ($R1, L1, C1$), F_s ,
- la fréquence de résonance parallèle (terme utilisé dans les ouvrages de physique) ou la fréquence "d'anti-résonance" (terme utilisé par les fabricants de quartz ou de résonateurs céramiques), F_a .

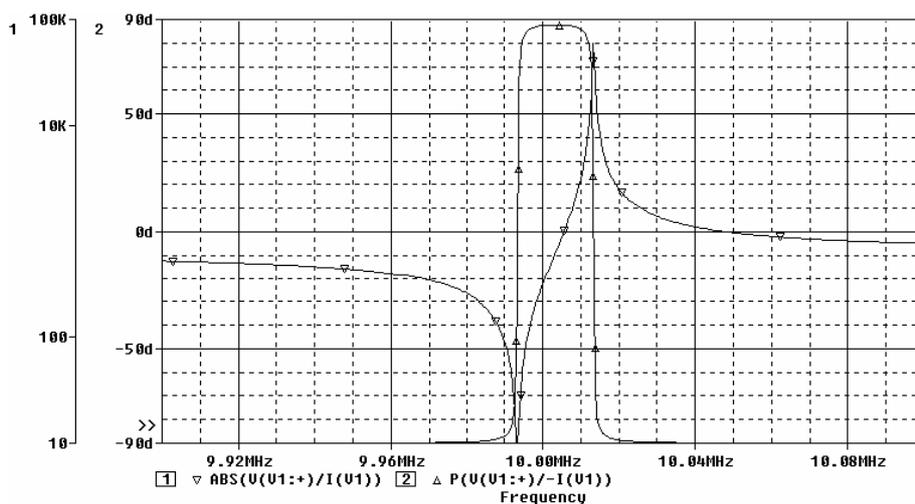
Les courbes ci-dessous montrent le module et l'argument de l'impédance en fonction de la fréquence. Ces courbes résultent de calculs obtenus en utilisant les paramètres fournis par des constructeurs.

module (1) et argument (2) de l'impédance d'un résonateur céramique 10 MHz



$$\Delta F = F_a - F_s = 530 \text{ kHz soit } 0.053 F_{osc} = 5,3\% F_{osc}$$

module (1) et argument (2) de l'impédance d'un quartz 10 MHz



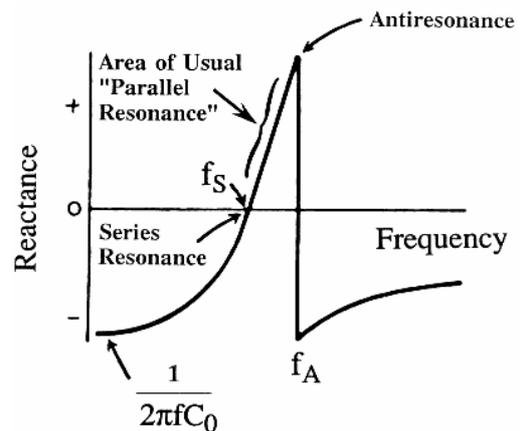
$$\Delta F = F_a - F_s = 20 \text{ kHz soit } 0.002 F_{osc} = 0,2\% F_{osc}$$

On voit sur les courbes ci-dessous que quartz et résonateurs céramiques ont un même comportement général, mais avec $\Delta F/F_{osc}$ beaucoup plus faible pour un quartz.

Souvent, les constructeurs ne donnent dans leurs notes d'information que la courbe de la réactance du quartz ou du résonateur céramique, en supposant que celui-ci peut se modéliser sous forme d'une réactance et d'une résistance en série. La résistance série équivalente est notée ESR (Equivalent Series Resistor) ; elle est différente de R1 du modèle équivalent (il faut passer par une transformation pour la calculer à partir de R1). Elle n'est pas constante sur toute la plage de validité du modèle.

$$Z = ESR + jX$$

Bien que la réactance soit X , certains constructeurs notent jX sur leurs documents.



Entre f_S et f_A (X positif, argument $Z \approx 90^\circ$), un quartz ou un résonateur céramique se comporte comme une bobine (inductance en série avec une résistance)

Avant f_S et après f_A (X négatif, argument $Z = -90^\circ$), il se comporte comme un condensateur (capacité en série avec une résistance).

$X=0$, module $Z = \min$ pour la résonance série à la fréquence f_S ; X est max ainsi que le module de Z pour la résonance parallèle ou "anti-résonance" à la fréquence f_A .

f_S et f_A sont très proches. L'intervalle de fréquence pour lequel le quartz ou le résonateur céramique se comporte comme une bobine est très limité. Cette bobine a un coefficient de qualité très grand.

Le quartz ou un résonateur céramique peut s'utiliser pour ses propriétés :

- d'un circuit série (R)LC résonant. On l'utilise alors dans un oscillateur de type série
- d'une bobine de fort coefficient de qualité entre f_S et f_A . On l'utilise alors dans un oscillateur de type Pierce (ou Colpitts, ce qui est la même chose)

Dans les applications comme oscillateurs pour $\mu P/\mu C$ on utilise toujours le quartz ou le résonateur céramique avec un oscillateur de type Pierce, dit à "résonance parallèle".

Un même quartz peut fonctionner dans une application ou une autre. Les constructeurs développent cependant des quartz différents pour les 2 types d'oscillateurs.

Les résonateurs céramiques sont tous développés pour fonctionner avec un oscillateur Pierce.

4) OSCILLATEURS POUR $\mu P/\mu C$ OU CIRCUIT PÉRIPHÉRIQUE

4.1) GÉNÉRALITÉS

Les oscillateurs pour $\mu P/\mu C$ sont des oscillateurs très souvent réalisés avec une porte logique intégrée (on-chip) et quelques composants externes, dont un quartz ou un résonateur céramique. L'oscillateur est suivi d'une mise en forme, elle aussi réalisée avec une porte logique, pour obtenir un signal carré.

La forme de la tension de sortie de l'oscillateur dépend de la porte logique utilisée, de la fréquence d'oscillation, etc. Elle peut être approximativement sinusoïdale ou se rapprocher d'un signal carré.

Dans quelques rares cas, on utilise un oscillateur réalisé uniquement avec des composants externes.

La conception d'un oscillateur, bien que guidée par la théorie est encore pour une partie empirique.

Les portes sont intrinsèquement non linéaires, les paramètres varient avec la valeur instantanée de la tension ; il existe des diodes de protections, des jonctions parasites, des retards, ...

Par conséquent, les calculs pour un oscillateur ne sont jamais précis. Ils sont utiles toutefois s'ils indiquent les effets des variations de certains paramètres sur les principales caractéristiques de l'oscillateur.

4.2) PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES D'UN OSCILLATEUR

FRÉQUENCE D'OSCILLATION NOMINALE ET PRÉCISION

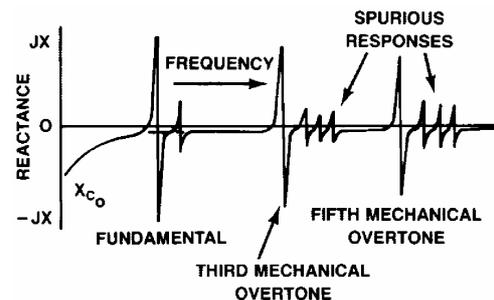
Les différentes fréquences d'oscillation possibles

Les oscillations peuvent se produire autour de la fréquence de résonance fondamentale ou à des fréquences harmoniques (overtone) ou sur des fréquences quelconques (spurious frequency). Ceci est dû aux caractéristiques du quartz et résonateur céramique qui ont plusieurs fréquences de résonances.

La réactance d'un quartz en fonction de la fréquence montre bien les différentes résonances.

Un résonateur céramique a le même comportement

La résonance la plus marquée, après le fondamental, est celle du 3^{ème} harmonique.



Pour les oscillateurs pour horloge de $\mu\text{P}/\mu\text{C}$, on utilise presque toujours la résonance fondamentale.

Si les composants externes au quartz ou au résonateur céramique sont mal choisis, l'oscillation ne se produit pas autour de la fréquence de résonance fondamentale. Une bonne conception doit prendre en compte ce risque pour l'interdire. Si aucune précaution n'est prise, un même oscillateur peut parfois démarrer sur la résonance fondamentale ou sur le 3^{ème} harmonique.

Les fréquences d'oscillation indésirables se produisent surtout avec des quartz ou résonateurs céramiques de fréquence nominale < 1 MHz.

Fréquence d'oscillation nominale

La fréquence d'oscillation nominale dépend essentiellement du quartz ou du résonateur céramique si les conditions spécifiées par le constructeur sont respectées, notamment la capacité de charge (pour plus de détail, voir plus loin).

La fréquence d'oscillation nominale est donnée par le constructeur du quartz ou résonateur céramique à une température donnée (25°C en général), avec une capacité de charge spécifiée et avec une tolérance.

La tolérance ou précision est exprimée en ppm pour un quartz et en % pour un résonateur céramique.

DÉRIVE EN TEMPÉRATURE (STABILITÉ EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE)

La dérive en température est essentiellement due au quartz ou à l'oscillateur céramique mais les condensateurs externes interviennent aussi un peu. Les constructeurs de quartz ou résonateurs céramiques donnent en général la variation max de la fréquence sur une plage de température. Elle est exprimée en ppm pour un quartz et en % pour un résonateur céramique.

VIEILLISSEMENT (STABILITÉ DANS LE TEMPS)

La stabilité dans le temps est due au quartz ou au résonateur céramique. Les constructeurs donnent la variation max de fréquence sur une période donnée, en général de 1 an à quelques années. Elle est exprimée en ppm pour un quartz et en % pour un résonateur céramique.

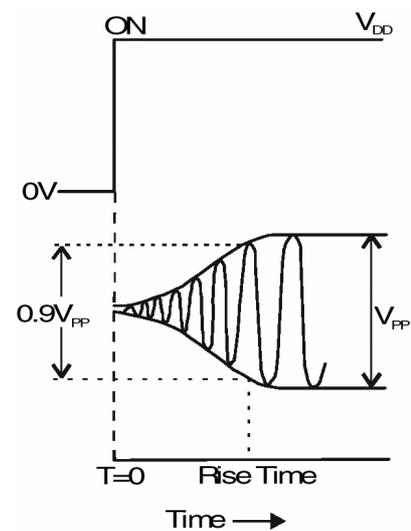
Pour un oscillateur à quartz, la stabilité dans le temps est d'autant meilleure que le niveau d'excitation du quartz, c'est-à-dire la puissance active dissipée, est plus faible. Il est donc important de toujours dissiper dans le quartz moins que la valeur max spécifiée par le constructeur.

TEMPS DE DÉMARRAGE

Le temps de démarrage (start-up ou rise time) est le temps pour que les oscillations se stabilisent, après la mise en service de l'oscillateur (alimentation du circuit ou validation de l'oscillateur).

Le temps de démarrage est beaucoup plus important pour un quartz que pour un résonateur céramique. On peut le faire sensiblement varier avec la valeur de composants externes¹.

Ce temps est une donnée importante dans certaines applications où le μC est "endormi" et doit se réveiller rapidement sur un signal externe. Lorsque le μP est endormi, il est toujours alimenté mais l'oscillateur est arrêté pour économiser au maximum l'énergie.



AJUSTAGE EN FRÉQUENCE

Les oscillateurs peuvent être prévus pour fonctionner avec une fréquence ajustable ou non. Si on souhaite une fréquence d'oscillation très précise, il faut utiliser un quartz de très grande précision dans les conditions imposées par le fabricant et éventuellement ajuster la fréquence par un condensateur ajustable. Il est aussi possible d'utiliser un quartz de moins grande précision et d'utiliser un condensateur ajustable de plus forte valeur.

La capacité d'un oscillateur d'être ajusté en fréquence s'appelle **pullability** ou **tunability** en anglais.

¹ Voir référence [2]

NIVEAU DES OSCILLATIONS

Le niveau des oscillations a peu d'importance en lui-même pour un oscillateur pour $\mu\text{P}/\mu\text{C}$ car un circuit met en forme le signal délivré par l'oscillateur pour obtenir un signal carré. **Le niveau des oscillations a une importance pour la puissance dissipée dans le quartz ou le résonateur céramique (drive level).** La plupart de ceux-ci sont prévus pour fonctionner des conditions standard, c'est-à-dire avec une tension dont l'amplitude à leurs bornes est sensiblement égale à la tension d'alimentation (voir plus loin pour la démonstration). Certains quartz, dont les quartz de petites dimensions, ne supportent pas une telle amplitude. Il faut alors réduire l'amplitude des oscillations.

4.3) COMPARAISON OSCILLATEURS À QUARTZ / OSCILLATEURS À RÉSONATEUR CÉRAMIQUE

	Ceramic Resonator	Quartz Crystal
Frequency Tolerance	$\pm 0.2 \sim \pm 0.5\%$	$\pm 0.005\%$
Temperature Characteristics	20 ~ 50 ppm/°C	0.5 ppm/°C
Static Capacitance	10 ~ 50pF	10pF max.
Q_m	$10^2 - 10^3$	$10^4 - 10^5$
ΔF	$0.05 \times F_{\text{osc}}$	$0.002 \times F_{\text{osc}}$
Rise Time	$10^{-5} - 10^{-4}$ Sec	$10^{-3} - 10^{-2}$ Sec
Height (lead)	7.5mm (Typ)	13.5mm (Typ)
Price Index	1	2

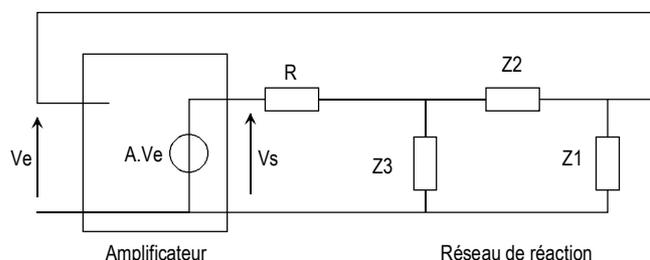
5) OSCILLATEUR PIERCE

5.1) GÉNÉRALITÉ / MODÉLISATION

L'oscillateur utilisé fait partie des oscillateurs qui peuvent se modéliser comme suit :

R peut être la résistance de sortie de l'amplificateur réel utilisé.

Z1, Z2 et Z3 sont les impédances d'éléments réactifs.



Un oscillateur Pierce est du type Colpitts. Z2 correspond à une inductance et Z1 Z3 correspondent à des capacités.

Ce type d'oscillateur est un oscillateur à réactance positive. C'est le quartz ou le résonateur céramique qui est utilisé pour réaliser l'inductance. **L'oscillation ne peut exister que lorsque le quartz ou le résonateur céramique se comporte comme une bobine**, c'est-à-dire entre F_s et F_a .

Le quartz ou résonateur céramique est utilisé dans la plage de fréquence qui correspond à la résonance "parallèle" (terme utilisé dans toutes les documentations constructeur). Voir la figure sur la réactance en fonction de la fréquence.

L'oscillation a lieu à la fréquence qui dépend des caractéristiques de l'amplificateur et du réseau de réaction mis en série (critère de Barkhausen) :

- argument égal à 0 (à $2k\pi rd$ près -ou à $k.360^\circ$ près-)
- module >1 (ou gain > 0 dB)

Pour une étude théorique plus détaillée, voir par exemple la référence [1] citée en fin de ce document.

5.2) OSCILLATEUR DE BASE

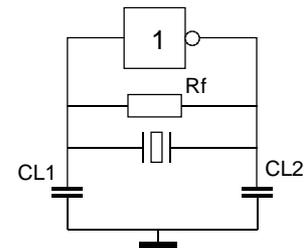
5.2.1) STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT SIMPLIFIÉ

Structure

Les oscillateurs utilisent comme élément actif une porte logique NON polarisée qui fonctionne au démarrage dans sa zone linéaire, en amplificateur inverseur. Le signal de sortie est ensuite mis en forme pour obtenir un signal proche d'un signal carré.

La structure d'un oscillateur Pierce est donnée sur la figure suivante :

La porte est presque toujours intégrée (on-chip) au $\mu P / \mu C$. Dans certains cas, il est possible de modifier ses caractéristiques en programmant des bits de configuration (ex : PIC de milieu de gamme).



En utilisant la modélisation des oscillateurs :

- la partie amplification est réalisée par la porte
- le réseau de réaction est constitué de la résistance de sortie de la porte, du quartz et des 2 condensateurs.

Amplification réalisée par la porte

L'amplification réalisée par la porte est à considérer dans 2 cas :

- oscillations de faible amplitude (au démarrage)
- oscillations de forte amplitude (en régime établi)

Dans tous les cas, Le déphasage apporté par la porte est de 180° . Le module de l'amplification est variable.

Pour la modélisation, on cherche à représenter la sortie de la porte sous forme d'une source de tension égale à k fois la tension d'entrée. La résistance de sortie de la porte est placée dans le réseau de réaction.

A la mise sous tension, lorsque les oscillations n'ont pas encore démarré, la résistance externe R_f de forte valeur permet de polariser la porte. Comme l'intensité du courant d'entrée est extrêmement faible, on peut considérer que R_f n'est traversée par aucun courant. $V_r = 0V$.
 $V_e = V_s$ avec V_e : tension d'entrée de la porte et V_s tension de sortie de la porte.
 La porte fonctionne alors dans la partie linéaire de sa caractéristique, ce qui correspond à une **amplification $\ll -1 \rightarrow$ module $\gg 1$, argument = 180°** . Les oscillations peuvent s'établir.

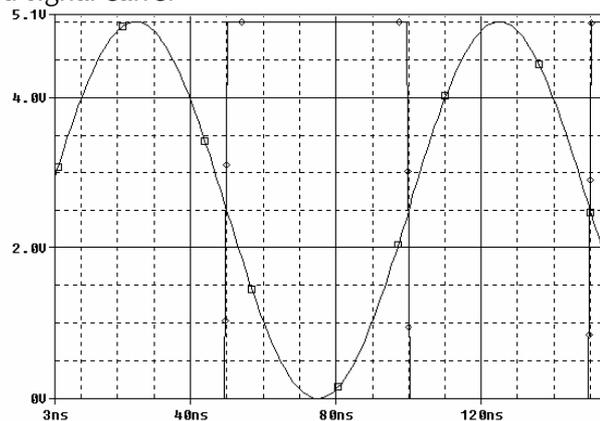
Avec certains PIC, il est possible de modifier l'allure de la caractéristique de transfert de la porte, donc l'amplification pour des signaux relativement faibles. Ceci permet d'avoir une relativement faible amplification et ainsi d'éviter des oscillations sur des harmoniques (voir plus haut)

Après la phase transitoire du démarrage, l'amplitude des oscillations est telle, que la porte fonctionne quasiment toujours dans sa zone non-linéaire. R_f permet d'obtenir une même valeur moyenne en sortie et en entrée de la porte². La sortie de la porte bascule d'un état à l'autre, selon que la tension passe d'un côté ou l'autre de la zone de transition de la caractéristique de transfert de la porte.

Pour trouver l'amplification équivalente, on peut utiliser la méthode du 1^{er} harmonique. Le signal en sortie de la source de tension du modèle équivalent de la porte (et non sur la sortie physique, puisqu'il existe une résistance de sortie) est approximativement carré. A cause du filtrage de la chaîne de réaction, il ne subsiste en sortie qu'une tension approximativement sinusoïdale proportionnelle à l'amplitude du fondamental (ou premier harmonique) du signal carré. On peut donc considérer uniquement le 1^{er} harmonique du signal carré.

Si on néglige le temps de propagation de la porte, l'argument de la fonction amplification est de 180° . Lorsque la tension d'entrée dépasse $V_{DD}/2$, la sortie passe à 0. Si on considère le 1^{er} harmonique, cela revient à un déphasage de 180° .

Sur la figure ci-contre, la tension sinusoïdale est la tension appliquée en entrée ; la tension carrée correspond à la source de tension du modèle équivalent de la sortie de la porte.



Pour déterminer le module de l'amplification équivalente de la porte, il faut effectuer le rapport de l'amplitude du 1^{er} harmonique de la sortie sur l'amplitude de l'entrée. L'amplification équivalente varie selon l'amplitude de l'entrée.

Avec une tension de la source de tension du modèle équivalent variant entre 0V et 5V, on obtient une amplitude du fondamental de $2,5V * 4/\pi = 3.18V$

Si on se place dans le cas d'une limite d'une tension d'entrée de la porte d'amplitude 0,7V autour de 2,5V (transition de la porte), on obtient une amplification de $3,18 / 0,7 = 4,54$ soit 13dB. Le réseau de réaction peut donc atténuer jusqu'à 13dB à la fréquence d'oscillation.

² Dans certains cas, si on ôte R_f après le démarrage des oscillations, l'oscillateur continue à fonctionner normalement.

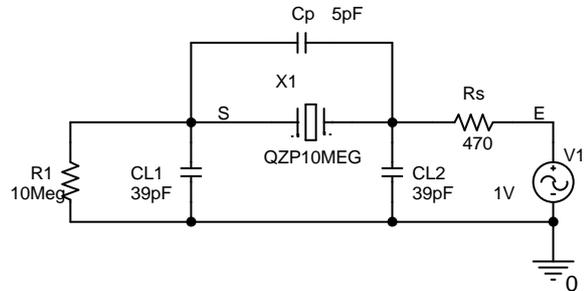
Réseau de réaction

La fréquence d'oscillation dépend du réseau de réaction et notamment de son argument. Les oscillations existent si l'argument du réseau de réaction est -180° avec un module supérieur à -13 dB (voir le module de l'amplification ci-dessus).

L'étude théorique précise de la réponse du réseau de réaction est complexe.

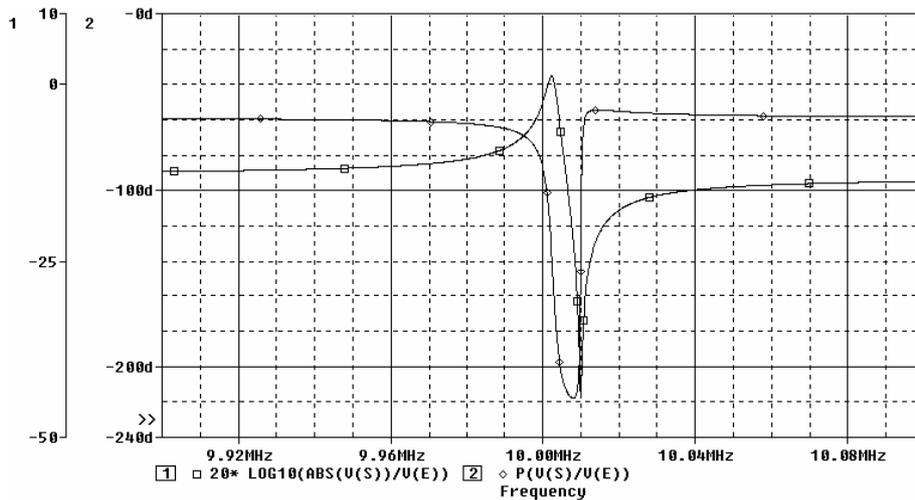
Une simulation en utilisant le schéma ci-contre donne le résultat ci-dessous.

R_s simule la résistance de sortie de la porte.
 C_p simule les capacités parasites de câblage.



R_1 est placée pour permettre une simulation correcte.

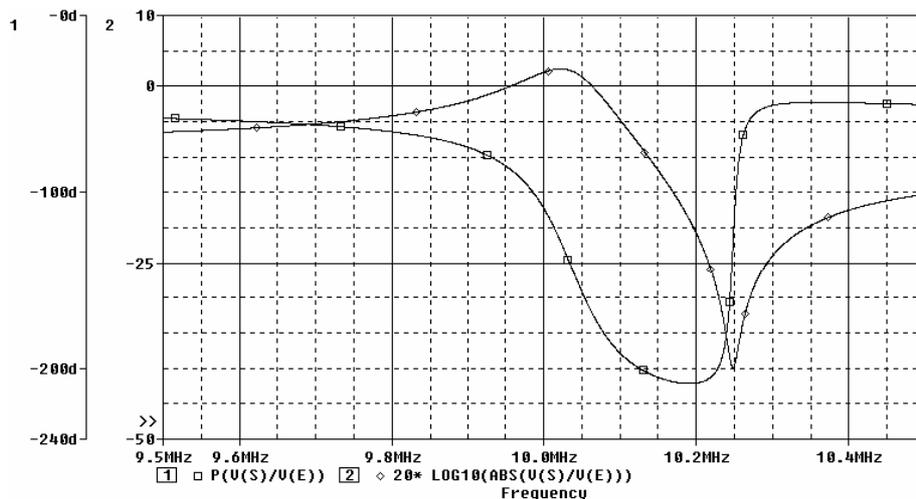
Résultats de simulation avec un quartz 10MHz.



Avec les valeurs des composants externes au quartz, la fréquence d'oscillation ne serait pas 10 MHz mais environ 10,004 MHz. Les valeurs de CL_1 et CL_2 sont mal choisies (pas de doc correspondant au modèle de simulation utilisé)

On constate que la phase varie rapidement entre des fréquences qui sont proches des fréquences propres du quartz F_a et F_s (voir précédemment).

Résultats de simulation avec un résonateur céramique 10 MHz (valeurs des éléments du modèle équivalent fournis par le constructeur Murata) Les valeurs des composants externes sont les mêmes que précédemment.



Avec les valeurs des composants externes au résonateur céramique, la fréquence d'oscillation ne serait pas 10 MHz mais environ 10,08 MHz. Les valeurs de CL1 et CL2 sont mal choisies (doc imprécise)

Amplitude et forme du signal de sortie

L'amplitude du signal de sortie est limitée par la tension d'alimentation de la porte. La forme de la tension de sortie physique de la porte n'est cependant pas carrée. En effet, la résistance interne de la porte avec l'impédance équivalente du quartz et des condensateurs forment un diviseur de tension dont la valeur dépend de la fréquence. A la fréquence fondamentale, l'impédance équivalente est élevée. Elle est beaucoup plus faible pour les fréquences plus élevées. Le signal de sortie physique de la porte peut être quasiment sinusoïdal ou se rapprocher d'un signal carré selon la résistance de sortie de la porte.

Fréquence d'oscillation & ajustage

La fréquence d'oscillation est fixée par les éléments du modèle équivalent et les capacités externes au quartz.

La valeur de R_s n'influe pratiquement pas sur la fréquence pour laquelle le déphasage du réseau de réaction vaut -180° , c'est-à-dire sur la fréquence d'oscillation. Cependant si R_s et $CL1/CL2$ sont trop faibles, ce déphasage n'atteint jamais la valeur qui permet une oscillation.

La fréquence d'oscillation peut se calculer à partir des éléments du modèle équivalent et des condensateurs externes³. Ceci ne s'effectue jamais dans la pratique, les valeurs des éléments du modèle équivalent étant rarement donné par les constructeurs.

Dans la pratique, les valeurs des condensateurs externes CL1 et CL2 sont déterminés d'après les indications des constructeurs.

Les constructeurs indiquent que la fréquence d'oscillation dépend de la "capacité de charge" C_L (load capacitance). Celle-ci est égale à la somme de C_s (stray capacitance, capacité due au câblage), et de la capacité équivalente à la mise en série des capacités des 2 condensateurs extérieurs C_{L1} et C_{L2} .

³ Voir référence [1].

$$C_L = C_S + \frac{C_{L1} \cdot C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}}$$

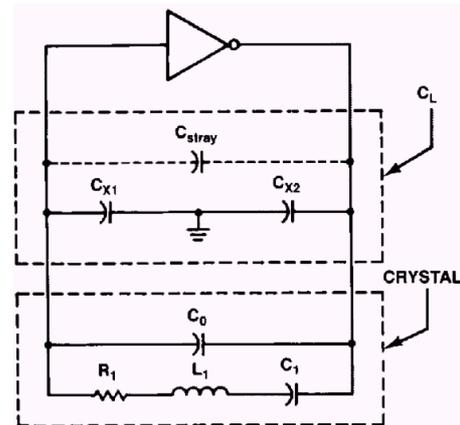
La fréquence d'oscillation est fixée en grande partie par les caractéristiques propres du quartz ou résonateur céramique et en faible partie par C_L .

C_L peut, pour des quartz ou résonateurs céramique de même fréquence nominale, varier d'un constructeur à l'autre.

!! Certains constructeurs appelle capacité de charge C_L , les capacités C_{L1} et C_{L2} d'égales valeurs.

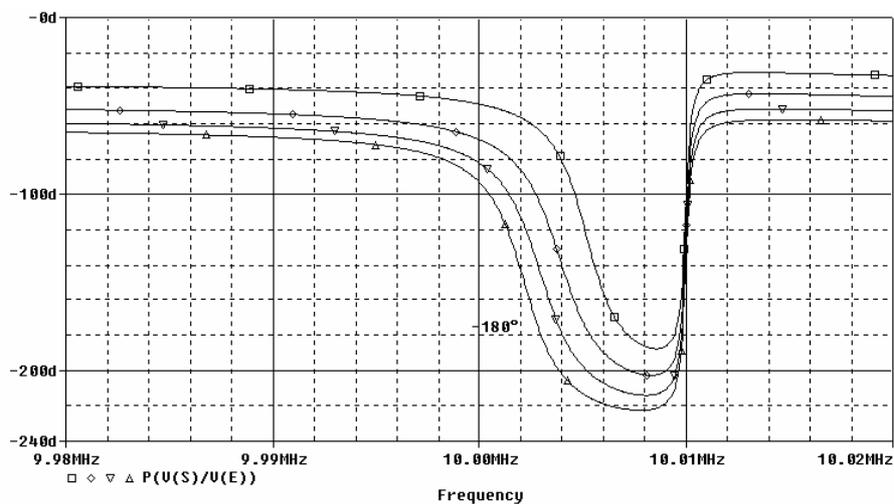
Si les constructeurs ont retenu le terme "capacité de charge", c'est qu'on peut considérer, au prix d'approximations, que c'est la capacité équivalente qui "charge" le quartz. C_{L1} et C_{L2} sont supposés en série, sans tenir compte de leur point commun à la masse.

C_{L1} et C_{L2} sont notés C_{X1} et C_{X2} sur le schéma ci-contre



En faisant varier C_L , c'est-à-dire C_{L1} ou C_{L2} , on peut ajuster, dans un très faible intervalle de valeurs, la fréquence d'oscillation.

Les courbes suivantes montrent les variations du déphasage du réseau de réaction pour différentes valeurs de C_{L1}/C_{L2} . Les courbes de gain ont moins d'importance.



dans l'ordre des symboles : $C_{L1} = C_{L2} = 15\text{pF}, 25\text{pF}, 35\text{pF}, 45\text{pF}$

Plus C_L augmente, plus la fréquence diminue. Pour C_{L1} variant de 25pF à 45pF, la fréquence diminue de 2,4kHz soit 0,02% environ.

La variation relative de la fréquence d'oscillation peut être déterminée par le calcul, à partir des éléments du modèle équivalent (souvent non disponible) et des éléments externes.

$$\Delta F/F_{osc} \approx C_1 / 2(C_0 + C_L)$$

avec C0 et C1 capacité du modèle équivalent et CL capacité de charge.

Pour plus de détail sur les calculs, voir référence [1]

Les constructeurs donnent parfois une représentation graphique de cette variation.

Pour de nombreuses applications à $\mu P/\mu C$ la fréquence d'oscillation n'a pas besoin d'être d'une grande précision et la valeur de C_L n'est donc pas très critique.

Les qualités de l'oscillateur dépendent à la fois du quartz et des composants associés.

5.2.2) RELEVÉS EXPÉRIMENTAUX

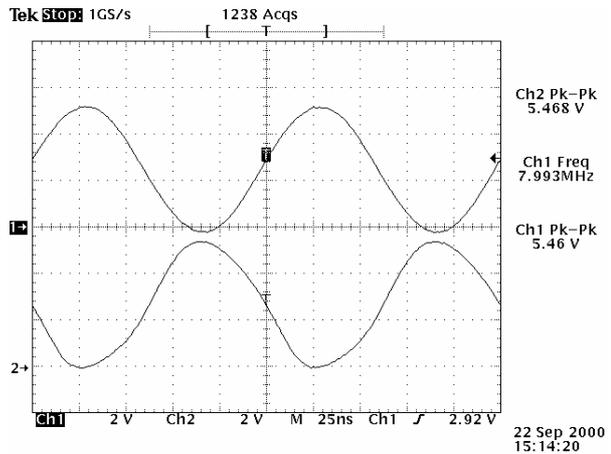
Les relevés suivants ont été obtenus avec un oscillateur constitué de⁴ :

- Une porte logique NON 74C04 (4069) alimentée en 5V
- Un quartz de 8 MHz courant (valeur de C_L non disponible)
- $C_{L1}=C_{L2} = 39$ pF
- R de polarisation = $1M\Omega$

Sonde de l'oscilloscope x10 ($10M\Omega$ // qqs pF)

Voie 1 : entrée de la porte

Voie 2 : sortie de la porte

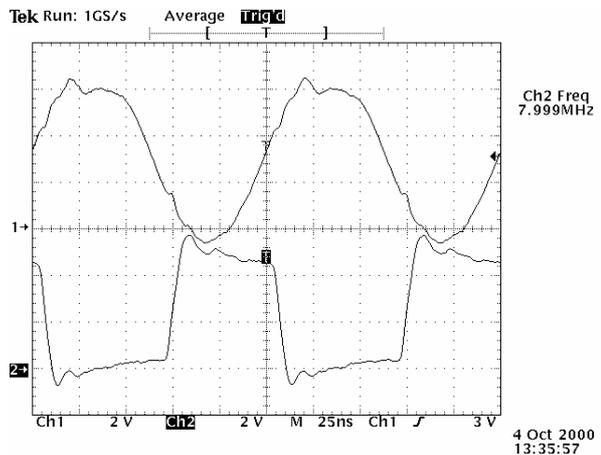


La tension aux bornes du quartz est quasi sinusoïdale, d'amplitude d'environ 5V (V_s-V_e , avec V_s et V_e en opposition de phase).

Même relevés que précédemment avec une porte 74HC04 (résistance de sortie plus faible que la porte 74C04, temps de transition et de propagation réduits)

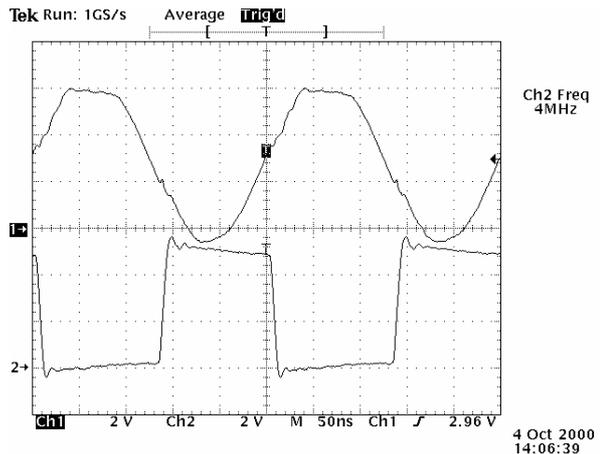
La tension de sortie (voie 2) n'est pas sinusoïdale alors que la tension après le réseau est quasiment sinusoïdale.

Plus la fréquence d'oscillation est basse, plus le signal en sortie de la porte se rapproche d'un signal carré.



⁴ Montage réalisé sur une plaquette d'essai à contacts avec des fils. CI découplé, connexions courtes.

Même relevés que précédemment avec une porte 74HC04 et un quartz de 4 MHz
 La tension en sortie de la porte se rapproche d'un signal carré.
 On voit bien l'écrêtage provoqué par les diodes de protection en entrée de la porte.



Rapport d'amplitude des oscillations en entrée et sortie de la porte

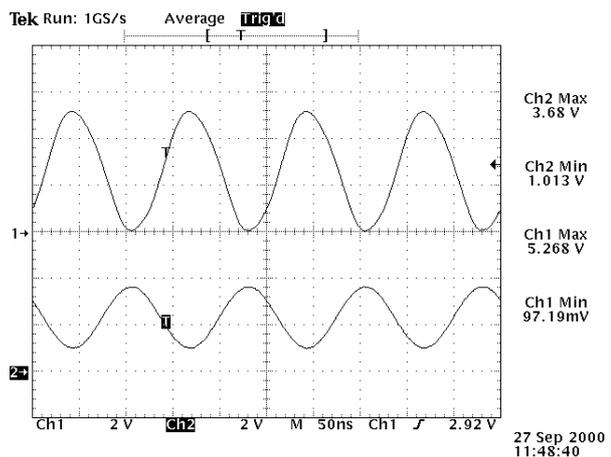
L'amplitude des oscillations d'entrée de la porte est fixée par le rapport des condensateurs C_{L1} et C_{L2} ⁵. Dans le cas ci-dessus, avec des condensateurs de même capacités, les signaux en entrée et sortie de la porte ont sensiblement même amplitude (du moins si on considère le premier harmonique).

$V_s / V_e = C_{L1} / C_{L2}$ avec V_s : tension en sortie de la porte, V_e : tension en entrée de la porte.

Les relevés suivants ont été obtenus avec un oscillateur constitué de :

- Une porte logique NON 74C04 (4069) alimentée en 5V
- Un quartz de 8 MHz courant (valeur de C_L non disponible)
- $C_{L1} = 68\text{pF}$ et $C_{L2} = 27\text{pF}$
- R de polarisation = $1\text{M}\Omega$

(les capacités parasites interviennent et le rapport des amplitudes n'est pas exactement le rapport des capacités C_{L1} et C_{L2})



Voie 1 : sortie de la porte
 Voie 2 : entrée de la porte

5.2.3) AMPLITUDE DES OSCILLATIONS ET PUISSANCE DISSIPÉE DANS LE QUARTZ

La puissance dissipée dans le quartz est un paramètre important car elle influe fortement sur le vieillissement (voir plus haut). Pour un bon comportement, il faut que la puissance dissipée soit inférieure à la valeur maximale spécifiée par le constructeur. Dans la plupart des cas, cette valeur maximale est telle qu'aucune limitation n'est nécessaire ; dans d'autres cas (quartz de petite dimensions, ...), il faut diminuer la puissance dissipée pour obtenir une bonne stabilité temporelle.

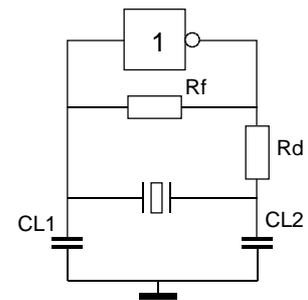
⁵ Pour une démonstration, voir par exemple la référence [1].

Avec le montage précédent et $C_{L1} = C_{L2}$, l'amplitude de la tension aux bornes du quartz est égale à environ la tension d'alimentation de 5V (les tensions aux bornes de C_{L1} et C_{L2} sont d'amplitude 2,5V et en opposition de phase, avec toutes deux une valeur moyenne de 2,5V).

Pour diminuer la puissance dissipée dans le quartz, on peut artificiellement augmenter la résistance de sortie de la porte en plaçant une résistance externe en série.

5.3) OSCILLATEUR PIERCE AVEC RÉSISTANCE SÉRIE

Le schéma avec limitation de puissance dans le quartz est le suivant.



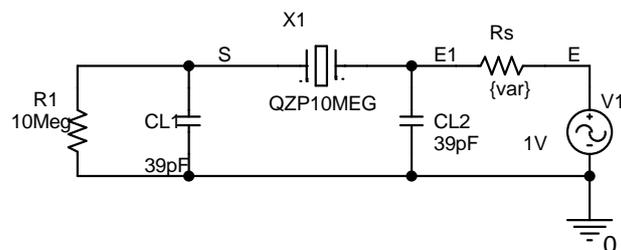
La résistance série s'appelle « Damping Resistor » en anglais. Elle s'ajoute à la résistance interne de la porte. Le principe de fonctionnement n'est donc pas modifié.

La résistance série a plusieurs rôles. Elle permet de :

- diminuer la puissance dissipée dans le quartz, comme mentionnée précédemment.
- démarrer l'oscillateur sur la fréquence de résonance fondamentale et non sur un harmonique (overtone)

Dans les 2 cas, l'effet de la résistance est d'abaisser la tension aux bornes de CL2. La tension aux bornes de CL1 dépend de la tension aux bornes de CL2 et du rapport des capacités (voir précédemment).

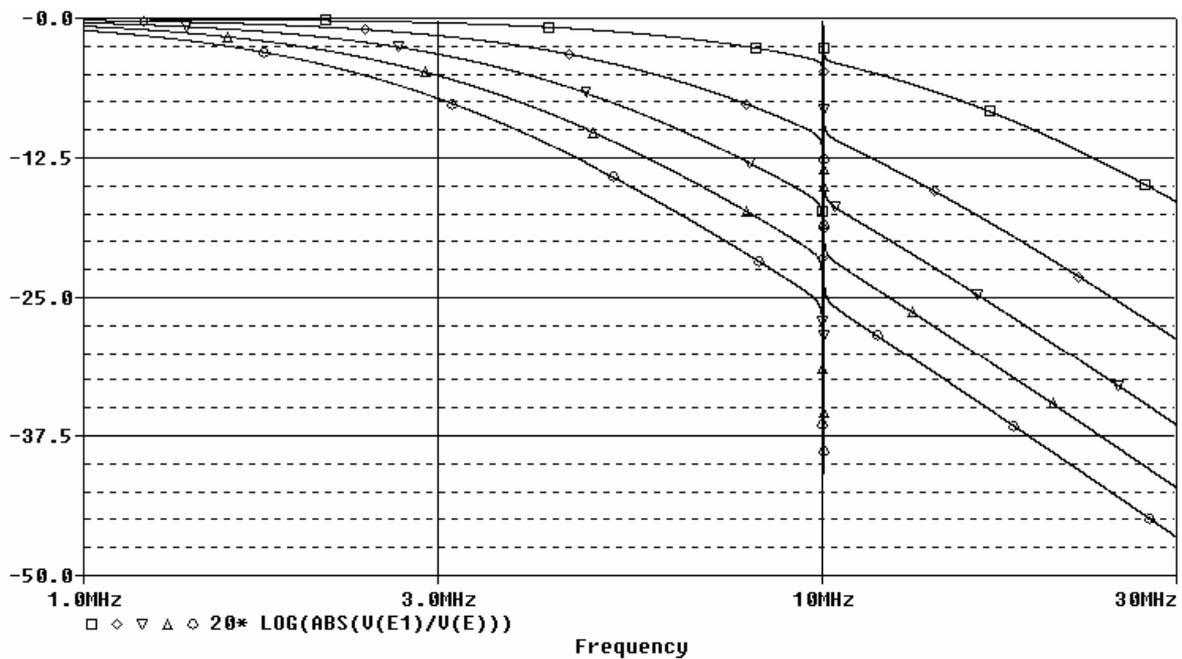
Pour voir l'effet de la résistance sur la tension aux bornes de CL2, on a simulé la réponse en fréquence du montage suivant :



R1 est placée uniquement pour permettre une simulation correcte.

La figure suivante donne le résultat d'une simulation avec un quartz 10MHz. La résonance sur l'harmonique 3 n'est pas modélisée, donc rien n'apparaît sur les résultats de simulation.

Simulation de la transmittance entre E et E1



la valeur de la résistance est dans l'ordre des symboles 200, 400, 600, 800, 1k.

A 10 MHz, on devine le phénomène de résonance très marqué (peu visible uniquement à cause de l'échelle des fréquences).

RD ET FRÉQUENCE D'OSCILLATION

Les oscillations peuvent avoir lieu lorsque le réseau de réaction a une atténuation de 13dB max (voir plus haut) pour une phase de -180° . A chaque résonance, la phase passe par -180° . Sur les courbes ci-dessus, on voit qu'à 30 MHz, si R_d est suffisamment élevée, l'atténuation est trop importante pour que, même avec la résonance sur l'harmonique 3 (non représentée ici), il y ait une possibilité d'oscillations sur l'harmonique 3.

La résistance R_d peut être déterminée :

- d'après la documentation constructeur
- empiriquement en procédant à de nombreux essais dans des conditions diverses.

BAISSE DE LA PUISSANCE DISSIPÉE DANS LE QUARTZ

La puissance dissipée dans le quartz est aussi appelée niveau d'excitation (drive level). Il dépend du courant dans le quartz et de la résistance série équivalente ESR

La résistance R_d peut être déterminée :

- d'après la documentation constructeur du quartz (plusieurs valeurs de R_d données selon la fréquence du quartz et le type de porte)
- par des calculs (à condition de connaître les valeurs des éléments du modèle équivalent du quartz, ce qui est rarement le cas)
- expérimentalement, en mesurant le courant circulant dans le quartz et en calculant la puissance dissipée dans celui-ci avec la résistance série équivalente donnée dans la doc.

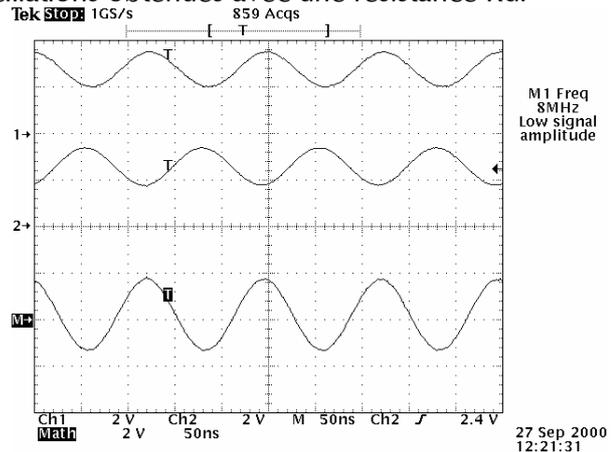
Le choix de R_d est assez pointu. Si R_d est trop faible, il n'y a pas diminution de la puissance dissipée. Si R_d est trop élevée, il n'y a plus d'oscillation.

Voici ci-dessous un exemple d'amplitude des oscillations obtenues avec une résistance R_d . Oscillateur réalisé avec une porte 74C04 (4069), un quartz de 8MHz, $C_{L1} = C_{L2} = 39$ pF, et une résistance R_d de 1,5k en série avec la sortie.

Voie 1 : tension aux bornes de C_{L2} ⁶
 Voie 2 : entrée de la porte
 M : Y1-Y2 (tension aux bornes du quartz)

La tension aux bornes du quartz est égale à moins de la moitié à celle sans résistance (voir 1^{er} relevé). La puissance dissipée dans le quartz est donc inférieure au quart à celle dissipée autrement.

Si on augmente R_d jusqu'à 1,8k, il n'y a plus d'oscillations.



6) QUARTZ ET RÉSONATEUR CÉRAMIQUE POUR OSCILLATEUR PIERCE

La principale caractéristique est la fréquence d'oscillation nominale du quartz avec la capacité de charge nominale C_L .

Les principales caractéristiques d'un quartz données par un constructeur sont présentées dans l'exemple ci-dessous. (il s'agit d'un tableau valable pour une série de quartz)

Frequency Range:	300 kHz ~ 225 MHz	Load Capacity:	30pF
Adjustment Tolerance at 25 C:	+/- 30PPM Max.	E.S.R:	See Table
Frequency Stability:	50PPM Max.	Drive level:	500 MicroWatt
Operating Temperature Range:	-10 C to +60 C	Ageing:	5PPM 1st Year Max.

7) RÈGLES POUR LA CONCEPTION D'UN OSCILLATEUR POUR L'HORLOGE D'UN $\mu P/\mu C$

VALEURS DES COMPOSANTS

A chaque fois que cela est possible, il faut suivre les indications des constructeurs du μC et du quartz ou résonateur céramique. Si certaines de ces indications ne sont pas disponibles, on peut se contenter de suivre les recommandations ci-dessous.

Certains μC s tels que certains PICs permettent de choisir entre plusieurs caractéristiques de transfert pour la porte de l'oscillateur. Ces particularités ne sont pas abordées ici.

⁶ Il ne faut pas placer de sonde en sortie de la porte car cela provoque un arrêt des oscillations. Même une sonde x10 (10M // qqz pF) introduit un léger déphasage sur la tension de sortie qui empêche la condition d'oscillation.

La capacité parasite C_s est souvent estimée à 5pF.

Il faut prendre en compte plusieurs critères pour la conception :

- Précision (tolérance sur la valeur nominale, stabilité en température et dans le temps)
- Fréquence nominale souhaitée
- Type de porte utilisée (avec faible résistance de sortie ou non)

Aux fréquences d'oscillation \leq qqs MHz, il y a risque dans quelques cas d'avoir une oscillation sur un mode non souhaité (3^{ème} harmonique, etc.)

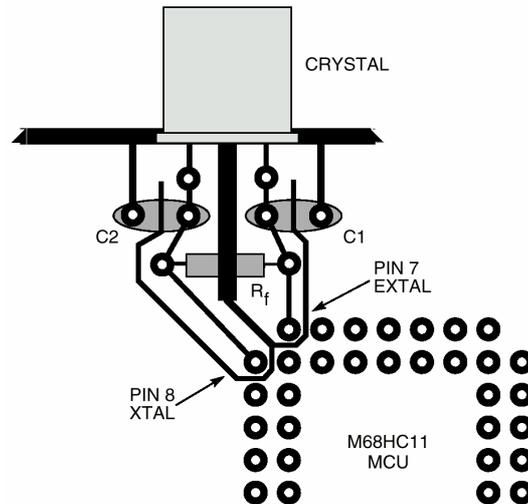
Quelques cas sont réunis dans le tableau ci-dessous.

Précision non critique, $F \geq 8$ MHz	N'importe quel quartz en boîtier HC49U ou HC49S (voir plus haut) ou résonateur céramique convient. CL1 = CL2 de l'ordre de 30 pF à 47 pF. Pas de résistance R_s
Précision $\leq 0,5$ %, $F \geq 8$ MHz	N'importe quel quartz convient. CL1 = CL2 de l'ordre de 30 pF à 47 pF. Pas de résistance R_s pour un quartz en boîtier HC49U (voir plus haut), R_s à déterminer pour ne pas dépasser P_{max} donné par le constructeur si boîtier HC49-S ou CMS
Précision $\leq 0,05\%$ $F \geq 8$ MHz	N'importe quel quartz convient. CL1 = CL2 calculées d'après les indications du constructeur à partir de CL et de C_s estimée (de l'ordre de 5pF) Pas de résistance R_s pour un quartz en boîtier HC49U (voir plus haut), R_s à déterminer pour ne pas dépasser P_{max} donné par le constructeur si boîtier HC49-S ou CMS
Précision très grande $F \geq 8$ MHz	Choisir le quartz en fonction de la précision souhaitée CL1 = CL2 calculées d'après les indications du constructeur à partir de CL et de C_s estimée (de l'ordre de 5pF). CL1 ou CL2 constitué d'un condensateur fixe et d'un condensateur ajustable selon les indications du constructeur. R_s pour minimiser le vieillissement du quartz
Précision non critique, $F \leq 8$ MHz	N'importe quel quartz en boîtier HC49U ou HC49S (voir plus haut) ou résonateur céramique convient. CL1 = CL2 de l'ordre de 30 pF à 47 pF. R_s choisie d'après les indications du constructeur ou déterminée empiriquement pour éviter les oscillations sur une fréquence indésirable (surtout pour les résonateurs céramiques).

IMPLANTATION DES COMPOSANTS

Les liaisons doivent être les plus courtes possibles. Prévoir un anneau de masse de garde, comme dans l'exemple ci-contre.

L'alimentation du $\mu P/\mu C$ doit bien sûr être découplée.



Références

- [1] Électronique Tome 2 par Chatelain et Dessoulay, Tome VIII du traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, éditions des Presses polytechniques romandes (Suisse) (anciennement publié en France aux éditions Dunod).
- [2] Note d'application Intel AP-155 : Oscillators for Microcontrollers (Note d'application très complète avec beaucoup d'indications pratiques). Note au format pdf disponible sur Internet ou sur CDROM Intel.
- [3] Manuel Murata sur les résonateurs céramiques (Note d'application très complète avec beaucoup d'indications pratiques. Plusieurs chapitres sur les différents emplois des résonateurs céramiques). Manuel au format pdf disponible sur Internet.
- [4] Site Web qct.nel/theory (constructeur de quartz et résonateurs céramiques. Approche théorique détaillée)
- [5] Manuel de référence Motorola du 68HC11 (pages 2.11 à 2.15 : quelques indications sur le choix de la résistance série). Manuel au format pdf disponible sur Internet