

Chapitre 11

Compléments sur les oscillateurs

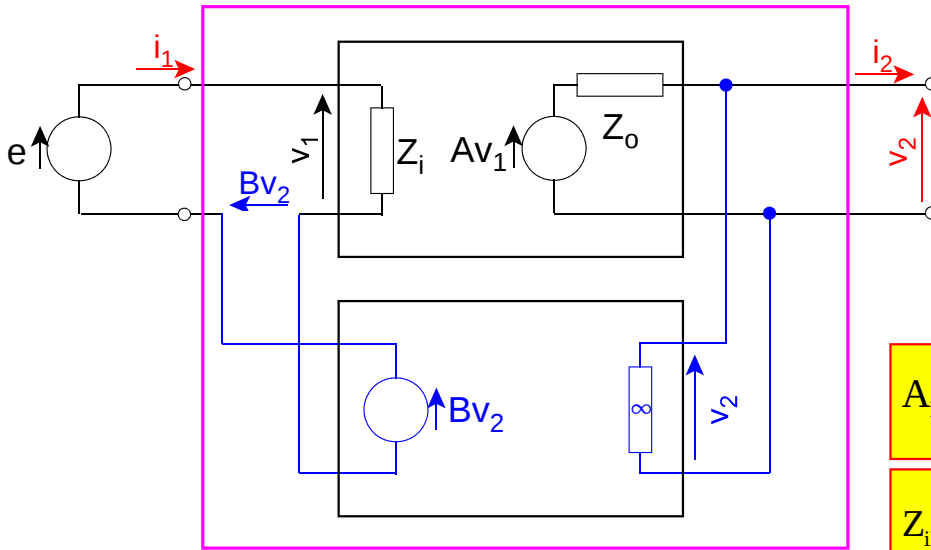
Oscillateurs

PLAN

- ▶ **Rappels sur la rétroaction**
- ▶ Principe des oscillateurs
- ▶ Exemple: oscillateur à quartz

Rétroaction de tension

définitions



$$A_R = \left. \frac{v_2}{e} \right|_{i_2=0} = \frac{A}{1-AB}$$

$$Z_{iR} = \left. \frac{e}{i_1} \right|_{i_2=0} = Z_i(1-AB)$$

$$Z_{oR} = \left. \frac{-v_2}{i_2} \right|_{e=0} = \frac{Z_o}{1-AB}$$

Soit un amplificateur de tension caractérisé par son gain $A = v_2 / v_1$, son impédance d'entrée Z_i et son impédance de sortie Z_o .

Appliquer une rétroaction de tension (*voltage feedback*) sur cet amplificateur, c'est prélever la tension de sortie v_1 , la multiplier par une autre fonction de transfert B (appelé **gain de rétroaction**) pour obtenir une tension

$$B.v_2 = AB.v_1$$

que l'on somme avec le signal e à l'entrée de l'amplificateur A .

Le bloc B est supposé parfait avec :

- une impédance d'entrée infinie pour ne pas perturber la sortie de l'ampli A
- une impédance de sortie nulle pour ajouter Bv_2 à la tension d'entrée e , quel que soit le courant i_1

L'amplificateur muni de cette rétroaction forme un nouvel amplificateur dont rappelons ici les propriétés A_R , Z_{iR} et Z_{oR} (définies sur la figure) en fonction des propriétés de l'ampli originel (A , Z_i , Z_o) et du gain de rétroaction B .

L'indice "R" indique les propriétés de l'ampli avec rétroaction.

REM1: en toute généralité A et B sont des fonctions de transfert complexes $A(\omega)$ et $B(\omega)$ qui modifient donc à la fois la phase et l'amplitude en fonction de la fréquence

REM2 : le gain A_R porte souvent le nom de **gain en boucle fermée** ("closed-loop gain") parce que les blocs A et B forment une boucle

REM2 : si l'on coupe la rétroaction (en déconnectant la sortie du bloc B de l'entrée du bloc A), on obtient à la sortie de B un signal

$$B.v_2 = AB.v_1 = AB.e$$

Le gain **AB** porte le nom de "**gain en boucle ouverte**" (*open-loop gain*).

Rétroaction négative de tension

|1-AB| > 1: améliore tout, sauf le gain

- ▶ inconvénient : diminution du gain
- ▶ avantages
 - ♦ améliore toutes les propriétés autres que le gain
 - $Z_i \nearrow$ et $Z_o \searrow$
 - diminue l'influence des non-linéarités
 - ♦ universellement employé dans les amplis
 - ♦ forte rétroaction < 0
 - source de tension
 - propriétés fixées par B (composants passifs stables)

soit une variation du gain de l'ampli $\Delta A(T, f, v_1)$

$$\frac{\Delta A_R}{A_R} = \frac{1}{|1-AB|} \frac{\Delta A}{A} < \frac{\Delta A}{A}$$

La rétroaction négative est largement utilisée dans des amplificateurs pour améliorer leurs propriétés :

- diminution de l'impédance de sortie
- augmentation de l'impédance d'entrée
- diminution des non-linéarités ; supposons que le signal d'entrée e soit sinusoïdal et que l'ampli A introduise une distorsion, la rétroaction négative réinjecte à l'entrée cette distorsion en opposition de phase, ce qui en atténue l'effet.

On démontrera à titre d'exercice que toute fluctuation relative $\Delta A/A$ sur le gain A , due à n'importe quelle cause comme :

- la dérive thermique
- la dispersion de fabrication
- une dépendance avec la fréquence
- une non-linéarité (dépendance avec la tension d'entrée v_1)

se retrouve dans la fluctuation relative du gain avec rétroaction A_R , mais atténuée par le facteur $(1-AB)$.

Une forte rétroaction négative rend le gain en boucle fermée pratiquement indépendant des propriétés de l'amplificateur A , c'est la qualité du gain de rétroaction B qui est alors prépondérante. En **réalisant B par des composants passifs de qualité**, on obtient alors d'excellents amplificateurs. C'est la base de tous les montages à amplificateurs opérationnels que vous connaissez.

Exercice: revoir les différents montages basés sur des amplificateurs opérationnels avec rétroaction négative et montrer comment ils s'intègrent dans cette théorie générale de la rétroaction.

Rétroaction positive de tension

|1-AB| < 1: abîme tout, sauf le gain, mais fort utile

► avantages :

- ♦ augmente le gain (quasiment sans intérêt)
 - utilisée autrefois dans les premiers amplis à tubes pour minimiser le nombre d'étages
- ♦ utile pour certains montages spéciaux
 - oscillateurs (cf dia suivante)
 - bistables (cf électronique numérique)
 - entrée à hystérèse (trigger de Schmitt)

► inconvénients

- ♦ dégrade toutes les propriétés autres que le gain
 - $Z_i \searrow$ et $Z_o \nearrow$
 - accentue les non-linéarités
 - instabilité si $AB > 1$ ("effet Larsen" par exemple)



ELEC-H-402/ 08 : Amplis à 1 MOS

CH08_Ampli1MOS_d24.shw
16-01-14 14:48:27

7

La rétroaction positive a été autrefois utilisée dans des amplificateurs pour augmenter le gain, et donc diminuer le nombre d'étages, vu le coût des tubes électroniques à cette époque. Ce n'est plus le cas aujourd'hui, car la rétroaction positive accentue malheureusement tous les défauts de l'amplificateur A :

- l'impédance de sortie est augmentée
- l'impédance d'entrée est diminuée
- les non-linéarités s'aggravent

En effet, supposons que le signal d'entrée e soit sinusoïdal et que l'ampli A introduise une distorsion, celle-ci est sommée en phase à l'entrée, et donc réamplifiée.

La rétroaction positive rend le montage instable si le gain en boucle ouverte AB est supérieur à l'unité (phénomène appelé "accrochage"). On assiste alors à un effet "boule de neige": une petite perturbation à l'entrée est amplifiée par le gain AB et rajoutée à l'entrée, est réamplifiée, et ainsi de suite. Le signal de sortie se rapproche d'une onde carrée.

Un des exemples typiques est l'effet LARSEN : si le microphone relié à l'entrée d'un ampli capte une fraction trop importante du signal de sortie venant des haut-parleurs, un sifflement aigu se produit. C'est aussi le cas lors d'une conversation téléphonique avec l'auditeur d'un programme radio qui laisse le volume de son poste trop haut.

La rétroaction positive est cependant beaucoup utilisée dans des montages particuliers évoqués dans vos différents cours d'électronique analogique et numérique:

- les oscillateurs
- les bistables et mémoires
- le trigger de Schmitt

Oscillateurs

PLAN

- ▶ Rappels sur la rétroaction
- ▶ **Principe des oscillateurs**
- ▶ Exemple: oscillateur à quartz

Les oscillateurs

beaucoup de variantes très utilisées

- ▶ définition
 - ♦ circuit générant un signal périodique
 - au départ d'une alimentation continue
 - sans aucune entrée périodique
- ▶ types d'oscillateurs
 - ♦ sinusoïdal
 - une seule fréquence ou multi-fréquences (synthétiseurs)
 - ♦ onde carrée, triangulaire, etc
- ▶ exemple
 - ♦ générateur de fonction du labo (sinus, carré, triangle)
 - ♦ tous les émetteurs/récepteurs
 - ♦ radar, μ onde
 - ♦ ultra-sons
 - ♦ horloges (montres, microprocesseurs, ...)

Les oscillateurs sont une des applications les plus importantes de la rétroaction positive et trouvent leur utilité dans de nombreux montages électroniques.

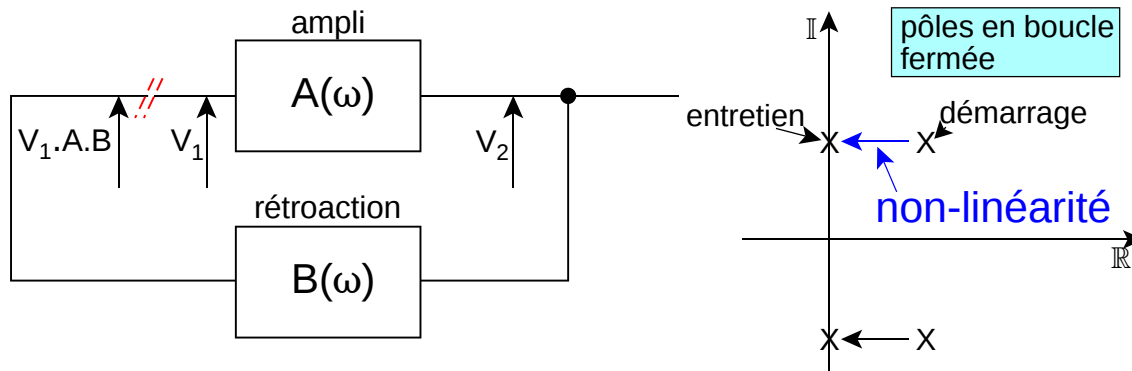
Ils sont en effet à la base :

- de tout émetteur de télécommunication
- de tout récepteur de télécommunication
- des synthétiseurs musicaux
- des circuits d'horloge pour toutes les bases de temps (de la montre au cadencement d'un microprocesseur)
- des dispositifs à ultra-sons (échographie, sonar, nettoyage industriel)
- du chauffage par induction utilisé en métallurgie et dans les cuisinières domestiques
- des radars et des fours à micro-ondes
-

De nombreuses variantes sont possibles suivant le type de signal produit (sinus, rectangle, triangle, multi-sinus,) et la technologie utilisée.

Principe des oscillateurs

rétroaction positive $AB > 1$ au démarrage, puis $AB = 1$



- démarrage de l'oscillation au départ du bruit de fond
- croissance exponentielle de l'amplitude si $\exists \omega$ tel que $A(\omega) \cdot B(\omega) \geq 1$ avec $\phi_A + \phi_B = 0$ ou $n360^\circ$
- entretien de l'oscillation en régime:
 $A(\omega) \cdot B(\omega) = 1$ grâce à une non-linéarité de AB

Un oscillateur se compose d'un amplificateur (de gain $A(\omega)$) muni d'une rétroaction (de gain $B(\omega)$).

En toute généralité, A et B sont complexes, c'est-à-dire qu'ils introduisent à la fois un changement d'amplitude et de phase.

Les deux blocs forment une boucle fermée ; il n'y a **pas de signal d'entrée**.

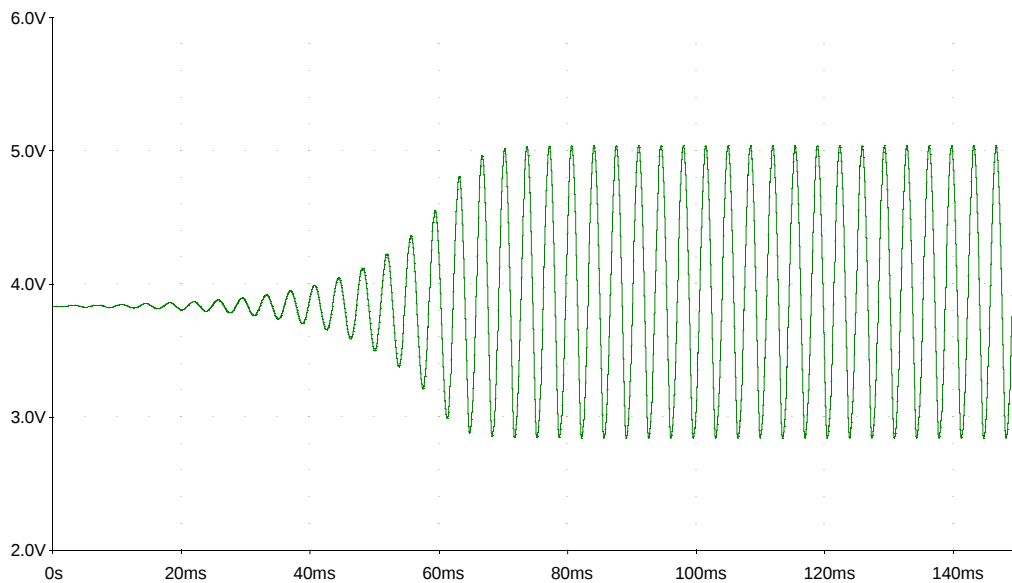
S'il existe une fréquence à laquelle le **produit des deux gains est un réel positif supérieur à l'unité**, toute perturbation à l'entrée y revient en phase et amplifiée par le gain AB. L'oscillation naît alors au départ du bruit de fond et son amplitude croît exponentiellement (voir dia suivante)

Pour que l'oscillateur soit stable, il faut encore que, une fois l'amplitude désirée atteinte, une **non-linéarité** agisse sur le produit AB pour le ramener à l'unité et l'y maintenir ; l'amplitude de l'oscillation reste alors constante.

La non-linéarité consiste donc en une dépendance de AB avec l'amplitude du signal de sortie.

Démarrage de l'oscillateur

croissance exponentielle puis stabilisation



Cette dia illustre le démarrage de l'oscillateur : dans le bruit de fond, une fréquence répond au critère $AB > 1$ et $\phi = 0$; on voit donc croître l'amplitude à cette fréquence, avec une enveloppe exponentielle croissante, puis le circuit non-linéaire de limitation d'amplitude intervient.

Vous aurez l'occasion de construire au laboratoire un oscillateur à pont de Wien basé un amplificateur opérationnel et des circuits RC.

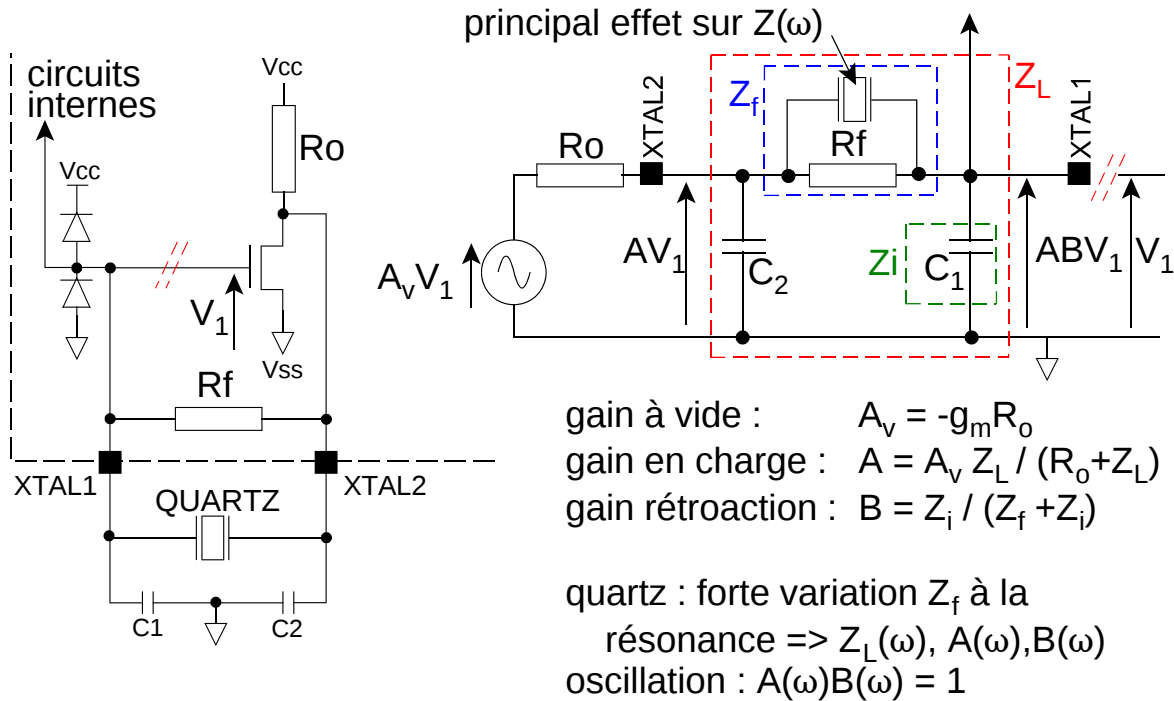
Oscillateurs

PLAN

- ▶ Rappels sur la rétroaction
- ▶ Principe des oscillateurs
- ▶ **Exemple: oscillateur à quartz**

Exemple d'oscillateur à quartz: le μC 8051

ampli à transistor MOS et rétroaction par C et quartz



Dans une des variantes du 8051, l'oscillateur est construit sur base d'un étage amplificateur à transistor NMOS.

Coupons par la pensée la rétroaction au niveau de la grille (voir les traits de coupure sur la figure). Soit une perturbation d'amplitude V_1 sur la grille. Si la sortie n'était pas chargée, on obtiendrait un gain à vide

$$A_v = -g_m \cdot R_o$$

L'étage est donc une source de tension d'amplitude $A_v \cdot V_1$ et d'impédance de sortie R_o . Vu cette impédance de sortie, le gain en charge A est plus faible que le gain à vide; il est déterminé par le diviseur d'impédance formé par R_o et l'impédance de charge Z_L (définie sur la figure); la tension de drain vaut alors $A \cdot V_1$

La fraction de cette tension de drain qui est ramenée à la grille est déterminée par le diviseur d'impédance formé par Z_f et Z_i , définissant ainsi le gain de rétroaction B .

La base de l'oscillation est le quartz qui présente une variation d'impédance très importante avec la fréquence (voir diapos suivantes) et influence donc à la fois les gains A et B .

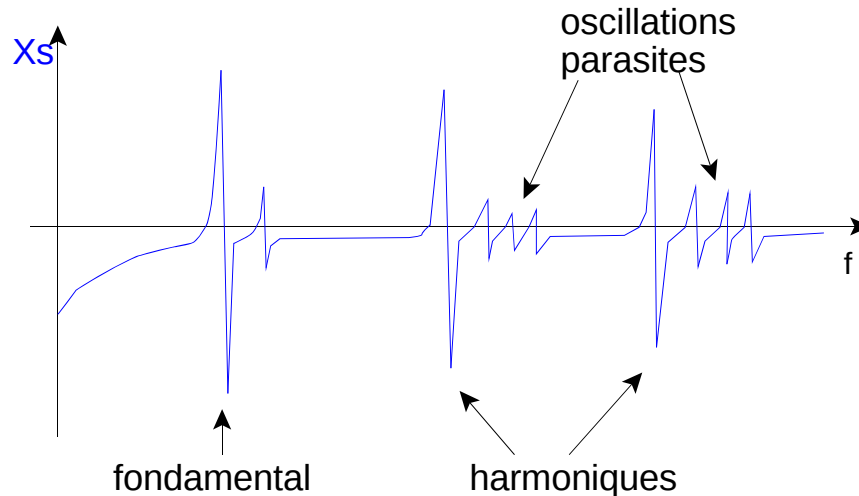
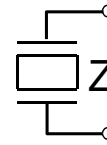
Compte tenu d'un déphasage de 180° introduit par l'amplificateur à transistor, le circuit de rétroaction doit fournir un supplément de 180° pour ramener à la grille un signal en phase. Si l'on ôte le quartz, les cellules RC introduisent chacune un déphasage de moins de 90° , ce qui est insuffisant. Le rôle du **quartz** est donc de provoquer un **déphasage supplémentaire**, d'où le nom d'**oscillateur à réactance positive**.

Le signal de sortie de l'oscillateur est la tension de grille, qui est distribuée à l'intérieur du microprocesseur. La non-linéarité qui limite l'amplitude est ici constituée d'un circuit d'écrobage à diode qui écrête la tension entre les bornes d'alimentation.

Le quartz

effet piézoélectrique : couplage mécanique-électrique

- ▶ oscillateur mécanique
- ▶ cristal ou céramique piezoélectrique
 - ♦ on applique $V \Rightarrow$ déformation mécanique
 - ♦ on déforme $\Rightarrow$ on obtient une tension



Le quartz est un cristal ou une céramique (cas le plus fréquent) piézoélectrique. L'effet piézoélectrique réversible, lié à la structure cristalline, consiste en :

- l'apparition de charges sur un cristal soumis à une tension mécanique (cisaillement, compression)
- l'apparition d'une déformation mécanique lorsque le cristal est soumis à un champ électrique.

On donne une forme à ce quartz pour obtenir une fréquence de résonance mécanique bien précise. La figure nous montre ici une taille "diapason" utilisée dans les quartz de montres et présentant un mode de vibration principal à $32768\text{Hz} = 2^{15}\text{Hz}$. Le diamètre est de l'ordre du mm.

Pour connecter le cristal dans un circuit électrique, on en métallise 2 faces pour former des électrodes, auxquelles on soude des fils. Cela se traduit dans le symbole du quartz visible sur cette figure.

Le circuit extérieur est destiné à exciter électriquement un des modes de vibration mécaniques.

Du point de vue électrique, les résonances mécaniques se marquent par des variations brutales de la réactance. Les oscillateurs fonctionnent normalement sur le premier mode de vibration (fondamental).

Le quartz

schéma équivalent - 2 résonances proches - énorme Q

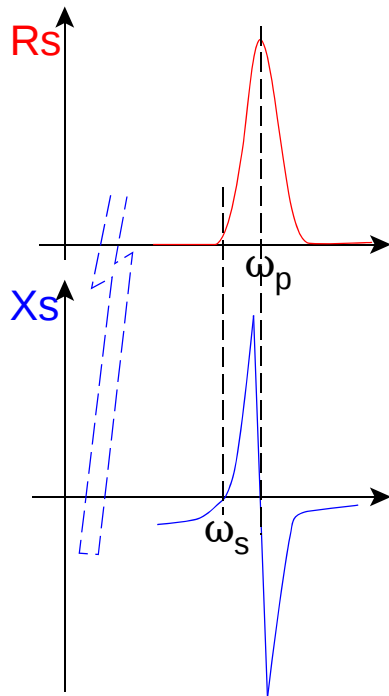
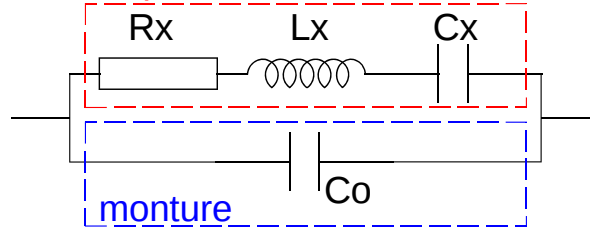


schéma équivalent de l'oscillation mécanique



$$\omega_s = (L_x C_x)^{-0.5}$$

$$\omega_p = \omega_s (1 + C_x / C_o)^{0.5} \approx \omega_s$$

$$Q_s = \omega_s L_x / R_x$$

Paramètres typiques

f [MHz]	Rx [Ω]	L1 [mH]	Cx [pF]	Co [pF]	Qs
2.000	100	520	0.012	4	126E3
4.608	36	117	0.010	2.9	94E3
11.25019	8.38	0.024	5.4	31E3	

fondamental

23

Si l'on s'intéresse de plus près à la résonance principale (fondamental) et que l'on relève les caractéristiques électriques du circuit, on peut donner un schéma équivalent formé :

- d'un circuit résonant R-L-C série
- d'un condensateur en parallèle qui représente la capacité propre du cristal ainsi que la capacité de la monture (c'est-à-dire les deux électrodes métalliques et les fils de raccordement).

L'intérêt des quartz vient

- de la bonne stabilité de leur fréquence de résonance avec la température (les oscillateurs ultra-stables doivent néanmoins être thermostatisés)
- du caractère très aigu de la résonance, avec un **coefficient de qualité de plusieurs dizaines de milliers**

On obtient **deux fréquences de résonance** très proches :

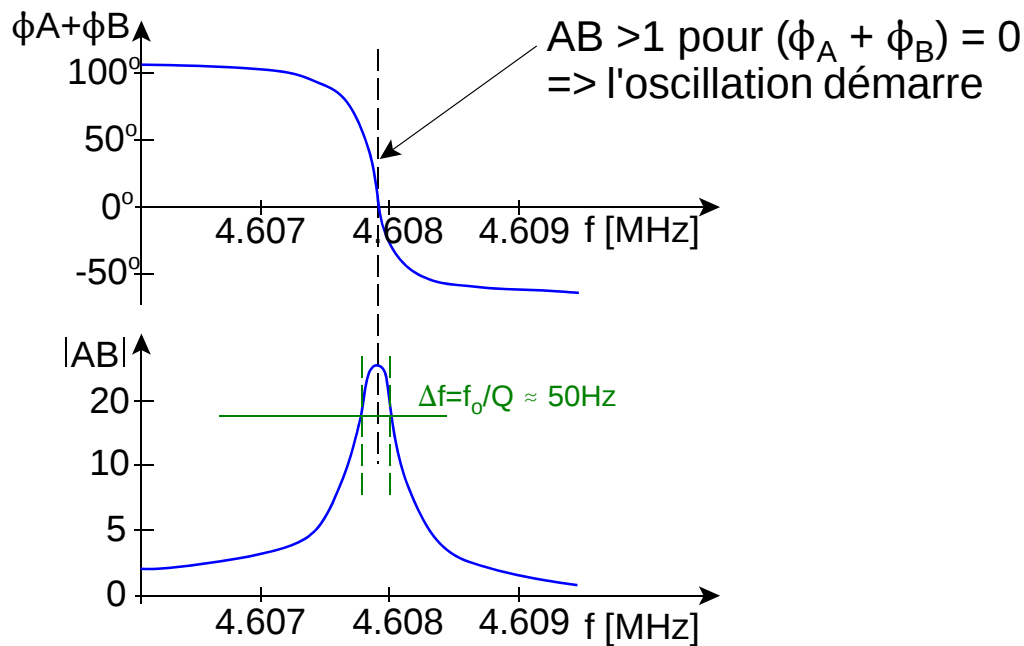
- la résonance série ω_s , où la réactance s'annule et le quartz est équivalent à la résistance R_x de quelques dizaines d'Ohm.
- la résonance parallèle ω_p , où la réactance s'annule et le quartz présente une résistance très élevée.

Il existe plusieurs schémas d'oscillateurs qui exploitent l'une ou l'autre de ces résonances, ou qui travaillent entre les 2 résonances.

On remarque la variation très brutale de la réactance autour de la résonance parallèle.

Le quartz

assure les conditions d'oscillation à sa f propre

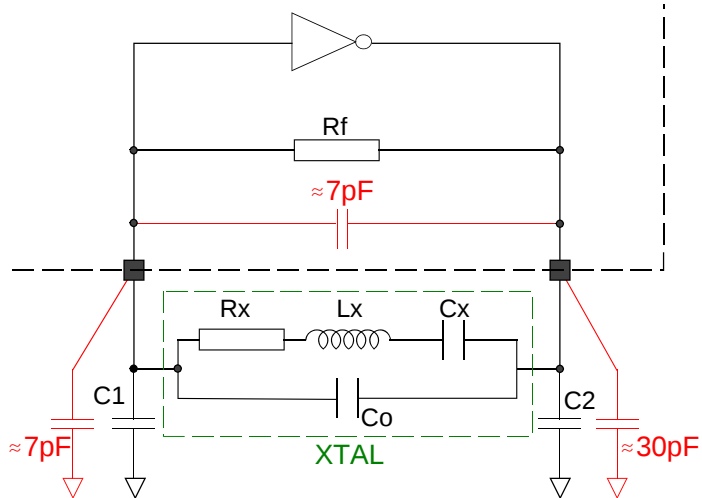


Cette figure donne les courbes de gain et déphasage en boucle ouverte de l'oscillateur du 8051, avec un quartz de 4.608 MHz .
La bande passante (largeur du pic de résonance à -3dB) est très étroite, en effet elle est donnée par le rapport entre la fréquence de résonance et le facteur de qualité Q . Pour Q de l'ordre de 10^5 , on obtient un bande passante voisine de 50Hz, ce qui montre bien que l'oscillation ne peut se produire qu'au voisinage de la résonance du quartz.

Le quartz n'est pas seul...

les autres éléments sont plutôt perturbateurs

- ▶ condensateurs parasites
 - ♦ participent à l'oscillation
 - ♦ valeur mal connue
 - variables (T^0 , V)
 - dispersion de fabrication
 - variantes
 - ♦ plutôt gênants
- ▶ variation des paramètres du transistor avec V et T^0



L'oscillation peut être perturbée par les condensateurs parasites à l'entrée, à la sortie et la capacité drain-grille du NMOS.

Ces condensateurs font partie intégrante du processus d'oscillation, mais sont en général mal connus et varient dans une fourchette assez sensible avec la dispersion de fabrication, la tension d'alimentation et la température.

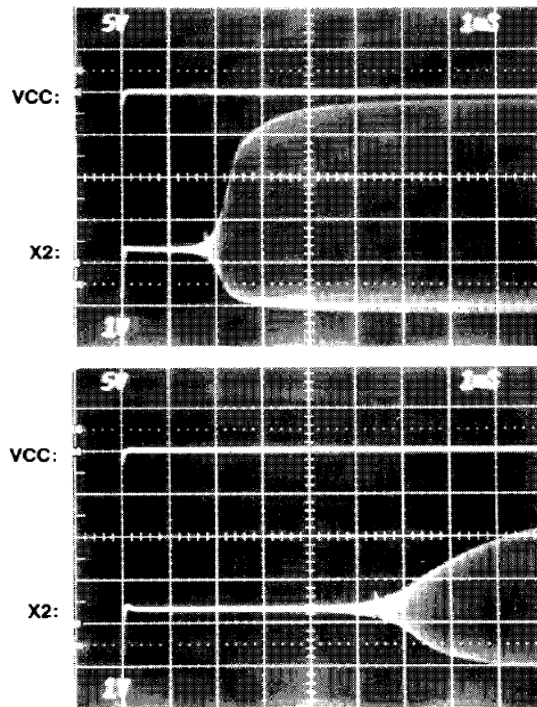
S'y ajoutent les variations des caractéristiques du transistor.

Il faudra donc s'assurer du bon fonctionnement de l'oscillateur dans toute la plage de variation de tension (en particulier dans les systèmes sur pile) et de température.

influence de C1 et C2

démarrage - stabilité - fréquence

- ▶ C1 et C2 ↗
 - ♦ favorable
 - ↘ rôle des capacités parasites
 - ↘ AB pour les harmoniques
 - ♦ défavorable
 - ↗ temps de démarrage
 - ↘ amplitude oscillation
- ▶ valeurs usuelles : 10-100pF
- ▶ performances
 - ♦ précision
 - 0,1% à 1% (souvent suffisant !)
 - avec ajustage 0.005%
 - ♦ stabilité = 0.05%



Le coefficient de qualité est une mesure du rapport entre l'énergie fournie par le transistor à chaque période (pour maintenir l'amplitude de l'oscillation en compensant les pertes) et l'énergie stockée dans les réactances du circuit oscillant.

Vu le coefficient de qualité très élevé des quartz, le temps démarrage de l'oscillation peut être de plusieurs dizaines de ms, chaque période d'oscillation n'apportant qu'une fraction de l'énergie réactive à stocker en interne.

Les oscillogrammes représentent le démarrage de l'oscillation, avec différentes valeurs des capacités externes C_1 et C_2 .

Grossir les condensateurs C_1 et C_2 :

- diminue l'influence des capacités parasites avec lesquelles elles sont en parallèle
- diminue le gain AB à fréquence élevée, ce qui limite le risque d'osciller sur un harmonique
- augmente le temps de démarrage
- diminue l'amplitude de l'oscillation

On peut également se servir de condensateurs fixes ou variables pour retoucher légèrement la fréquence d'oscillation (c'est le cas dans les montres par exemple).

En pratique...

problèmes courants

problème	cause	remède(s)
f trop grande	accrochage sur harmonique	↗ Ci
f trop faible	oscillation parasite	↘ Ci, soigner le câblage
démarrage incertain	gain AB trop faible	↘ Ci, soigner câblage changer de quartz ($R_X \ll$)
	<i>noise pick-up</i>	soigner découplage soigner câblage

Le tableau ci-dessus résume les principaux problèmes que l'on peut rencontrer pour faire osciller le quartz de manière fiable et qui ont déjà été décrits.

La marge de manoeuvre est assez réduite, puisque le schéma de l'oscillateur est imposé par le constructeur. Les ennuis viennent souvent

- d'un mauvais choix du quartz (la résistance R_X de certains quartz est parfois trop élevée).
- d'un mauvais dimensionnement de C_1 et C_2
- de couplages parasites de l'oscillateur avec d'autres signaux voisins (*noise pick-up*).

On consultera toujours la notice du processeur, qui précisera le schéma à adopter et fournira éventuellement des prescriptions sur

- le type de quartz (voire même une ou plusieurs marques et types qui ont été testés)
- les valeurs de C_1 et C_2

En pratique..

il faut du soin ..

► soigner le câblage

♦ éviter les inductances parasites

- quartz très proche du μP : diminuer les boucles
 - XTAL1- quartz-XTAL2
 - XTALi - Ci - Vss (i=1..2)

♦ éviter les couplages capacitifs

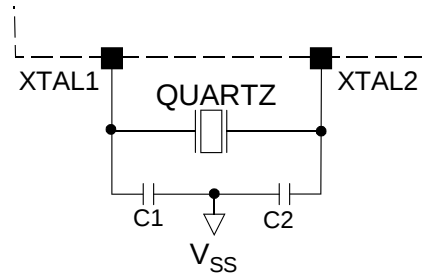
- éloigner pistes à dv/dt élevé
- entourer de pistes "calmes" (V_{SS} ou V_{DD} , bien découplés)
- mettre le boîtier du quartz à la masse

► ajuster C_1 et/ou C_2

♦ obtenir une amplitude crête-à-crête $\geq V_{DD}/2$

♦ ! oscilloscope peut tuer oscillation ($Z_{in}=10M\Omega//qq\text{ pF}$)

- R_{in} perturbe polarisation XTAL1 $\Rightarrow$ mesurer en AC
- si C_{in} perturbe XTAL2 alors diminuer C_2



Le bon fonctionnement de l'oscillateur nécessite un câblage soigné. En particulier, les inductances de connexion sont des éléments parasites à limiter autant que possible. Il faut donc

- rapprocher le quartz le plus possible du processeur
- prévoir une piste de masse proche du quartz pour y connecter les condensateurs C_1 et C_2

Les couplages capacitifs (*pick-up* ou diaphonie) entre pistes voisines peuvent être polluants; on évitera donc de faire voisiner sur de grandes longueurs :

- deux pistes d'horloges différentes
- une piste de l'oscillateur et une piste véhiculant un autre signal présentant des flancs très raides
- une piste d'horloge et une piste véhiculant un signal analogique de faible amplitude

On peut entourer les pistes "à risque" de pistes à faible dv/dt comme la masse et l'alimentation (avec un découplage soigné par des condensateurs de qualité). Le boîtier du quartz est métallique et peut être mis à la masse, mais c'est une opération difficile si on le monte verticalement pour gagner de la surface.

La valeur maximum de C_1 et C_2 est fixée par le souci de maintenir une amplitude d'oscillation supérieure à la moitié de la tension d'alimentation, et ce sur toute la plage de température. La mesure de cette amplitude à l'oscilloscope est susceptible de perturber :

- la polarisation du transistor (si le signal utile est à la grille du NMOS) par la résistance d'entrée de la sonde (même de l'ordre de $10M\Omega$); il est recommandé de faire la mesure en couplage AC
- la valeur de C_1 et C_2 ; si l'on veut ajuster C_1 et C_2 de manière précise, il faudra retoucher les valeurs pour tenir compte des quelques pF introduits par la sonde.

Le cas échéant, la présence de la sonde d'oscilloscope peut tuer l'oscillation.