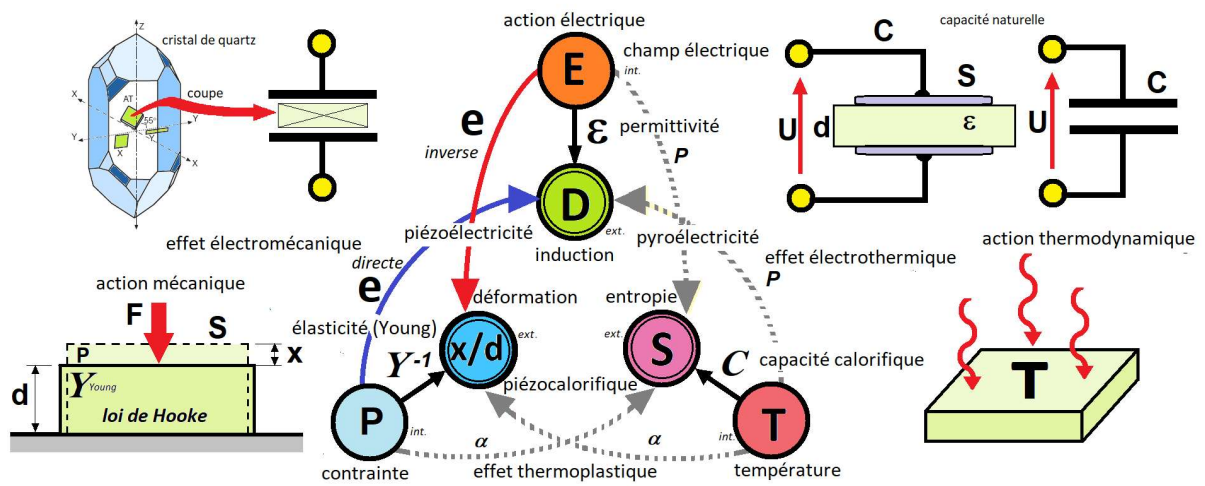
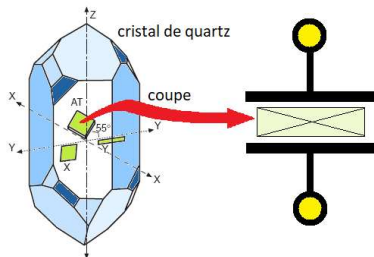


La piézoélectricité

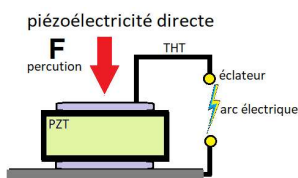


La piézoélectricité a été découverte par Jacques et Pierre Curie en 1880 pour les effets mécaniques-électriques, puis Lippman montra en 1881 la réversibilité du phénomène piézoélectrique pour la conversion électromécanique. D'autres physiciens contribuèrent à son développement : Voigt, Thomson ainsi qu'à ses applications : Langevin pour les sonars, Cady pour le premier oscillateur à quartz. Les quartz, d'origine naturelle ou de fabrication synthétique hydrothermale, ainsi que certaines céramiques plus récentes comme les PZT ont des propriétés piézoélectriques qui sont exploitées dans différents dispositifs électroniques professionnels, grand public ou radioamateur ou dans des dispositifs de la vie courante comme les générateurs d'étincelle électrique pour l'allume-gaz.

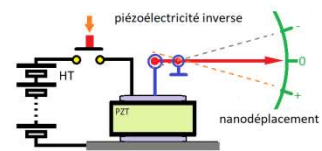


Les quartz ont des structures cristallines trigonales de silice SiO_2 avec un réseau hexagonal composé d'ions positifs et négatifs qui se polarisent électriquement sous l'effet d'une déformation quand on les soumet à une contrainte, c'est la piézoélectricité. Les quartz sont taillés selon des angles de coupe précis par rapport aux axes cristallographiques, polis avec précision et ils sont recouverts de deux métallisations connectées pour percevoir ou induire des effets électriques.

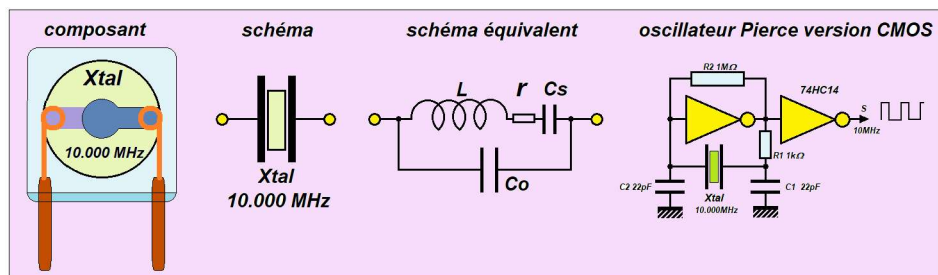
A cause de la structure cristalline, les différentes propriétés mécaniques et électriques sont anisotropiques, c'est-à-dire que leurs valeurs dépendent de l'orientation xyz . L'angle de coupe, défini selon ces axes par mesure goniométrique en diffraction X, a beaucoup d'importance sur le comportement du composant en particulier concernant l'influence de la température sur la fréquence de résonance.



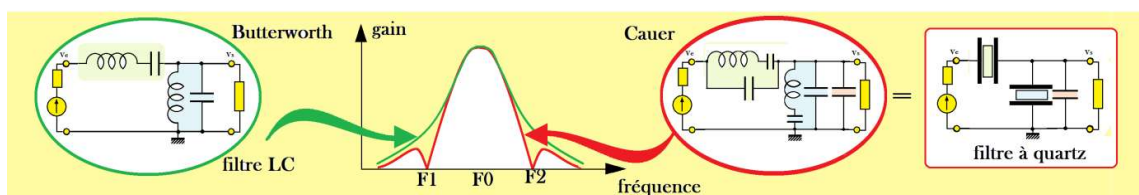
Sous l'effet d'un choc mécanique, on peut générer un arc électrique (application : allume gaz), c'est la piézoélectricité directe. Un signal électrique permet de déformer très légèrement le cristal et de provoquer des nano ou des micro-déplacements (applications : transducteur, moteur, haut-parleurs), c'est la piézoélectricité inverse.



Le quartz est principalement utilisé dans les oscillateurs de précision en radio **RF**, télécommunication, métrologie ou comme circuit d'horloge de précision (microprocesseur, métrologie). Ces quartz sont alors taillés en forme et ajustés en épaisseur pour vibrer à la fréquence désirée dans un mode de vibration donné. Électriquement le quartz est équivalent à un circuit électrique passif du type **RLC** mais très précis et à très grand coefficient de qualité **Q**. S'il est inséré correctement dans un circuit électronique actif possédant au moins un transistor ou une porte **CMOS** linéarisée, il sera mis en oscillation entretenue et délivrera un signal de fréquence précise et peu bruité à grande pureté spectrale.

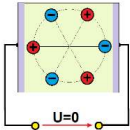
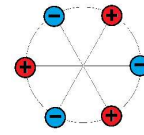


Étant équivalents à un circuit **LC** ayant un très bon coefficient de qualité, les quartz et les céramiques sont aussi utilisés en **RF** pour réaliser des filtres passe-bande de grande précision en fréquence, ce qui est illustré ci-dessous.

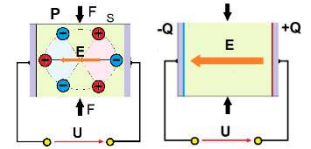


Principe physique de la piézoélectricité :

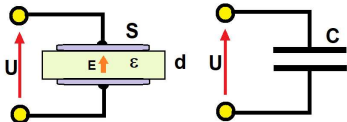
Imaginons un cristal simplifié type SiO_2 constitué uniquement de six ions positifs et négatifs disposés symétriquement sur un anneau comme sur la figure suivante. Ces six charges électriques ont la même valeur absolue et sont disposées alternativement, selon le signe.



En l'absence de contrainte, le champ électrique au centre du cristal est nul, les centres de gravité des deux types de charge se confondent et il n'y a pas de tension induite. Si on exerce une force de compression et donc une contrainte uniformément répartie, l'anneau est déformé, les centres de gravité des deux types de charges s'écartent et un champ électrique apparaît au centre. Une tension U induite apparaît aux bornes des métallisations. L'effet est réciproque, une tension appliquée aux armatures provoque une contraction du cristal ou une extension selon le signe.



Le condensateur plan



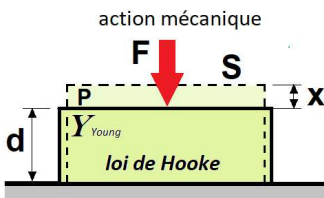
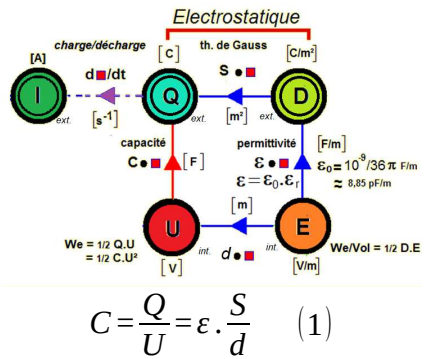
C: capacité [F] ramenée en pF
 S: surface [m²]
 d: épaisseur [m]
 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, permittivité [F/m]
 $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ F/m
 ϵ_r : permittivité relative du matériau (environ 5 pour le quartz, près de 10 000 pour les céramiques PZT)

Si on ne considère pas l'effet piézoélectrique, mais seulement la nature diélectrique du matériau isolant, nous avons affaire à un condensateur plan. Le matériau est soumis à un champ électrique E (grandeur intensive) dû à la tension U et il est le siège d'un champ d'induction D (grandeur extensive) qui se retrouve comme charge surfacique sur les armatures (Gauss) et comme charge Q en l'intégrant sur la surface totale. La

$$\text{capacité est donc : } C = \frac{Q}{U} = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

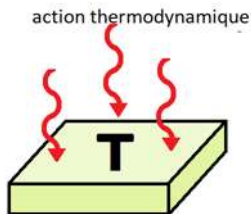
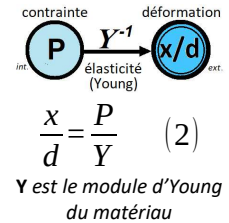
Sur le graphe, l'expression de la capacité est donnée par le trajet des arcs bleus qui vont de U à Q .

Diagramme de cohérence des grandeurs de l'électrostatique



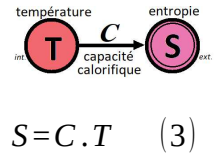
Effet mécanique : une contrainte P exercée sur le cristal provoque une déformation relative x/d , conformément à la loi d'élasticité de Hooke $x/d = P/Y$. Pour des petits déplacements la loi est linéaire et non destructive.

La contrainte est appliquée uniformément sur toute la surface, elle est homogène à une pression : $P = \frac{F}{S}$ en $[Pa \equiv \frac{N}{m^2}]$.



Effet thermodynamique : la pyroélectricité est la conversion de l'énergie thermique en effet électrique. Cet effet est connu avant celui de la piézoélectricité et peut être observé avec un cristal de tourmaline. Nous n'aborderons pas cet effet, mais il faut connaître son existence, car des capteurs piézoélectriques sont actuellement utilisés.

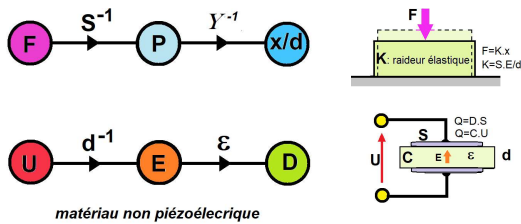
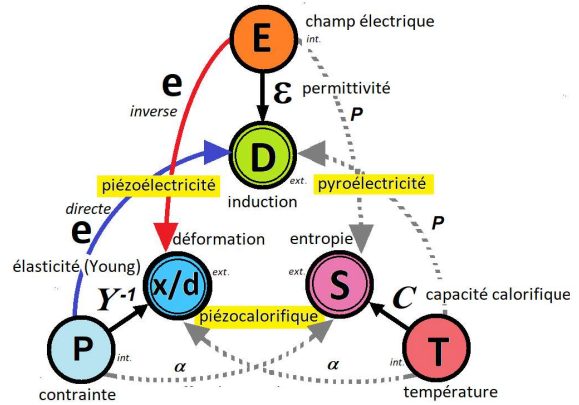
La température agit aussi sur les variables mécaniques par thermoplasticité à travers les effets piézo calorifiques et de ce fait les quartz sont sensibles à la température. Cette grandeur d'influence peut être maîtrisée par le type de taille du cristal et l'emploi de montage de compensation ou de régulation de température plus ou moins sophistiqués dans le cas des oscillateurs. Cela va de l'oscillateur à quartz à très faible dérive au capteur de température très précis.



La piézoélectricité est caractérisée par un couplage entre les phénomènes mécaniques et les phénomènes électriques avec un coefficient e dit de piézoélectricité.

Une contrainte mécanique provoque une induction électrique, c'est-à-dire une charge surfacique, c'est l'effet direct. Un champ électrique provoque une déformation dimensionnelle du cristal, c'est l'effet inverse. Les deux coefficients e sont identiques.

Les caractéristiques pour une seule direction d'action dans le réseau du cristal piézoélectrique sont données par le graphe suivant. Les actions dans les autres directions selon les axes avec tous les effets sur chaque axe amène à l'emploi de matrice utilisant le calcul tensoriel. Nous n'aborderons pas cet aspect dans cette présentation.



Si nous considérons un matériau non piézoélectrique, les effets mécaniques et électriques sont sans relation, ils sont découplés. Seuls subsistent deux effets insignifiants, si on écrase légèrement le matériau, son épaisseur varie et, de ce fait, le condensateur voit l'épaisseur de l'isolant diminué, donc C devrait légèrement varier. De même le champ électrique dans l'isolant exerce une toute petite pression sur les armatures. Ces effets sont très négligeables vue la dureté du quartz ou celle des céramiques et nous ne les considérerons pas.

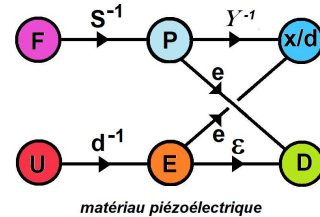
La piézoélectricité est caractérisée par une dépendance réciproque entre les relations mécaniques et électriques à travers un double coefficient piézoélectrique e .

Pour un matériau piézoélectrique, en plus du champ électrique E , la contrainte P augmente le déplacement D selon le coefficient piézoélectrique e du matériau, donc augmente la charge surfacique, c'est la piézoélectricité directe des frères Curie :

$$D = \epsilon \cdot E + e \cdot P \quad (4)$$

La force F crée une contrainte P qui modifie, selon l'élasticité Y^{-1} , l'élongation du cristal x/d . A cela s'ajoute l'effet piézoélectrique qui, avec la présence du champ électrique E selon le même coefficient e , c'est la piézoélectricité inverse de Lippman :

$$\frac{x}{d} = \frac{P}{Y} + e \cdot E \quad (5)$$



matériau piézoélectrique

piézoélectricité directe :

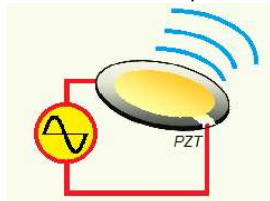
$$D = \epsilon \cdot E + e \cdot P = (U \cdot \epsilon) / d + \frac{F \cdot e}{S} \quad (6)$$

piézoélectricité inverse :

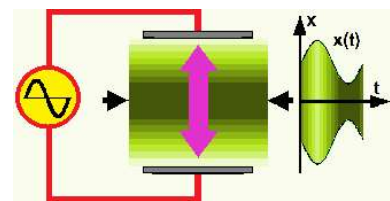
$$\frac{x}{d} = \frac{P}{Y} + e \cdot E = \frac{F}{S \cdot Y} + \frac{U \cdot e}{d} \quad (7)$$

Les effets mécaniques de la conversion piézoélectrique vont permettre avec l'aide d'un montage électronique d'entretenir des vibrations de la matière et ainsi entretenir des ondes de volume. Toute la partie du cristal qui se situe sous l'influence des électrodes sera soumise à ces ondes mécaniques.

Vibrations mécaniques :



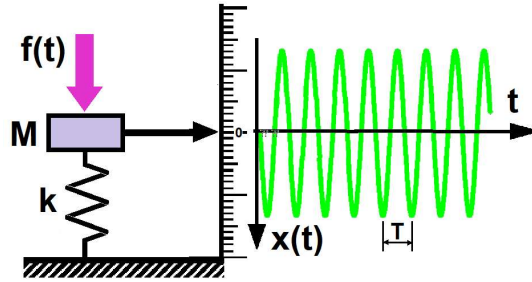
Si nous soumettons un cristal piézoélectrique à un signal électrique sinusoïdal et de fréquence variable, il sera le siège de vibrations mécaniques. C'est le principe des transducteurs acoustiques et des buzzers PZT. Nous allons soumettre notre cristal de base à des vibrations dans le sens de l'épaisseur et modéliser de façon simple son fonctionnement par des éléments mécaniques.



Modélisation mécanique :

La loi de Hooke, mise en œuvre précédemment montre que le cristal possède une certaine élasticité liée à son module d'Young et que nous représenterons de façon

simpliste par un ressort de dureté k . La masse du quartz qui sera mise en mouvement de façon plus ou moins complexe sera aussi modélisée simplement par une masse $M = \rho V$, produit masse volumique et volume Cette représentation par deux constantes localisées k et M est très élémentaire par rapport à la réalité à constante répartie sur le volume, mais elle est suffisante pour comprendre le mécanisme de vibration. Si nous appliquons une force F du type percussion de Dirac $\delta(t)$ (choc très bref) orientée vers le bas, le système se met en vibration et oscille à une fréquence donnée sans amortissement selon une loi sinusoïdale.



Intuitivement, nous pouvons affirmer que plus la masse sera grande plus la fréquence d'oscillation sera petite et que plus la dureté du ressort sera grande plus la fréquence sera grande. Ceci se résout par une démonstration classique qui est la suivante : la force d'inertie de la masse additionnée à la force de dureté de l'élasticité s'opposent à la force appliquée, ce

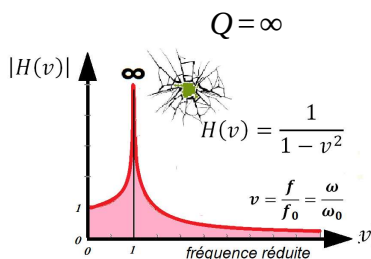
qui donne une équation différentielle linéaire du deuxième ordre dite de l'oscillateur : $M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot x = f(t)$ (8)

Cette équation nous dit comment les variables sont liées, la solution dépendant du second terme $f(t)$ et des conditions initiales (position et vitesse de la masse à l'instant zéro). Pour résoudre élégamment cette équation, lorsque les conditions initiales sont nulles, nous pouvons utiliser la transformée de Laplace de cette équation :

$$M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot x = f(t) \xrightarrow{TL} M p^2 \cdot X + k \cdot X = F(p) \quad (9)$$

La réponse harmonique, c'est-à-dire le gain en fonction de la fréquence du système soumis à des sollicitations sinusoïdales sur une grande bande de fréquence se déduit aussi de l'équation précédente, c'est la fonction de transfert:

$$H(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1/k}{M p^2 + 1} \quad p = j\omega \quad H(\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{1/k}{1 - \frac{M}{k} \omega^2} = \frac{A}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (10)$$



La fréquence de résonance a pour pulsation angulaire $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$

avec $\omega_0 = 2\pi f_0$ mesurée en **rad/s**. A cette fréquence le gain devient infini, le coefficient de qualité aussi, ce qui n'a pas de sens physiquement, cela causerait la destruction du matériau qui, comme un verre de cristal, avec pas ou très peu d'excitation se briserait.

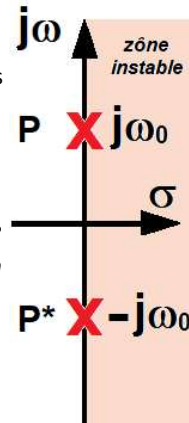
Une fonction de transfert du type $H(p) = \frac{A}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + 1}$ (notre résultat précédent) est en limite de

stabilité et cela n'a pas de sens physique pour un composant passif, un amortissement existe toujours naturellement et sa présence se manifeste par un terme supplémentaire du premier degré

dans l'expression de son dénominateur : $H(p) = \frac{A}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2m}{\omega_0} p + 1}$

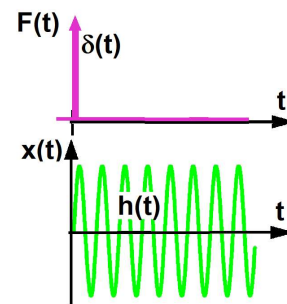
Juste une allusion à la théorie des pôles :

La fonction $H(p) = \frac{A \omega_0^2}{p^2 + \omega_0^2} = \frac{A \omega_0^2}{(p-P) \cdot (p-P^*)}$ peut se décomposer selon deux racines qui sont ses pôles P et P*. Ceux-ci sont ici en limite du domaine de stabilité.



C'est la théorie dite des pôles et des zéros utilisée pour l'étude des fonctions de transfert en électronique, particulièrement pour celles des filtres et en automatique (asservissement et régulation).

Si nous appliquons une force F du type percussion de Dirac $\delta(t)$ (choc très bref) orientée vers le bas, le système se met en vibration et oscille à une fréquence donnée sans amortissement selon une loi sinusoïdale. Nous pouvons partir de la fonction de transfert H(p) et retrouver l'équation originale de la réponse impulsionnelle h(t) à une percussion de Dirac :



$$H(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{M}{k}p^2 + 1} \quad TL^{-1} \quad h(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (11)$$

$$\text{avec } A = \frac{1}{kM} \quad \text{et } \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

Lorsque la force n'est plus appliquée, ce système non amorti reste en oscillation permanente et la force d'inertie compense

la force de l'élasticité: $M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = -k \cdot x \quad \frac{d}{dt} \rightarrow j\omega \quad M \cdot \omega^2 \cdot X = k \cdot X$ avec $\rho \cdot S \cdot d$,

$$F = \rho S d \omega^2 X$$

ρ : masse volumique du quartz, $S \cdot d$: volume=surface multipliée par l'épaisseur.

$$(7) \rightarrow \frac{X}{d} = \frac{\rho S d \cdot \omega^2 \cdot X}{S \cdot Y} + \frac{U \cdot e}{d} \rightarrow X = \frac{e \cdot U}{1 - \rho d^2 \cdot Y^{-1} \cdot \omega^2} \quad (12)$$

$$(6) \rightarrow D = (U \cdot \epsilon) / d + \frac{\rho S d \omega^2 X \cdot e}{S} \quad (13)$$

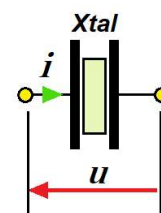
Schéma électrique équivalent du quartz : à travers les effets électromécaniques du quartz, nous allons rechercher l'expression du courant en fonction de la tension à partir de:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad F = I = j\omega \cdot Q \quad (14) \quad \text{en régime harmonique. Le théorème de Gauss donne la}$$

charge collectée sur les armatures pour une tension appliquée et un écrasement donné :

$$Q = D \cdot S, \quad D = (U \cdot \epsilon) / d + \frac{F \cdot e}{S} = (U \cdot \epsilon) / d + \rho d \omega^2 \cdot e \cdot X, \text{ ce qui donne pour}$$

le courant :



$$I = j\omega \cdot S \left(\frac{\epsilon U}{d} + \rho d \omega^2 \cdot e \cdot X \right) = j\omega \cdot \left(\frac{\epsilon S}{d} + \frac{e^2 \cdot S \rho d \omega^2}{1 - \rho d^2 \cdot Y^{-1} \cdot \omega^2} \right) \cdot U$$

La quantité mise dans les parenthèses correspond aux constituants du schéma équivalent piézoélectrique, la capacité naturelle en parallèle avec l'équivalent admittance motionnelle du quartz :

$$\left(\frac{\epsilon S}{d} + \frac{e^2 \cdot S \rho d \omega^2}{1 - \rho d^2 \cdot Y^{-1} \cdot \omega^2} \right) = (C_n + M(\omega)).$$

L'expression $M(\omega) = \frac{e^2 \cdot S \rho d \omega^2}{1 - \rho d^2 \cdot Y^{-1} \cdot \omega^2}$ est mise sous forme d'une fraction de polynôme en ω qui se décompose en

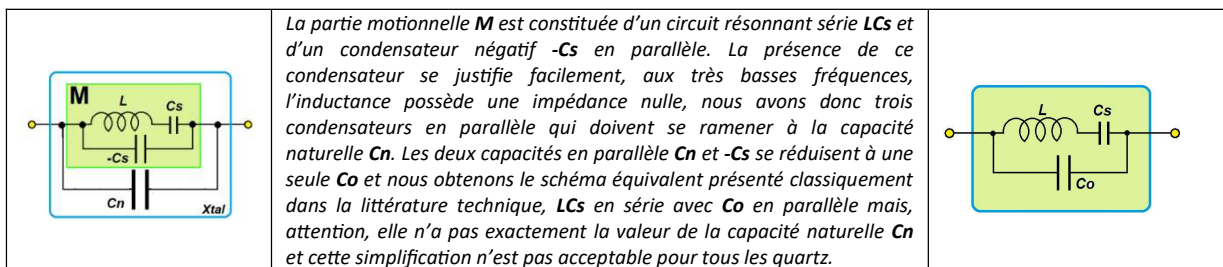
$$\text{éléments simples : } M(\omega) = \frac{a}{1 - B \cdot \omega^2} - c = \frac{(a - c) + B \cdot c \cdot \omega^2}{1 - B \cdot \omega^2},$$

qu'on identifie simplement : $B = \rho d^2 \cdot Y^{-1}$ et $(a - c) = 0$ ce qui donne $a = c$ $Bc = e^2 \cdot S \rho d \omega^2$.

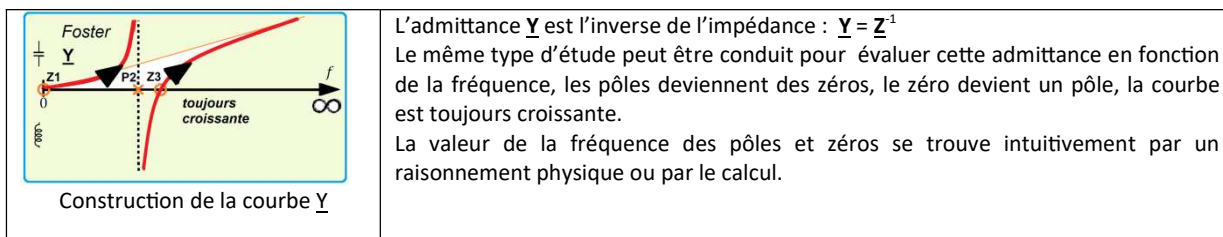
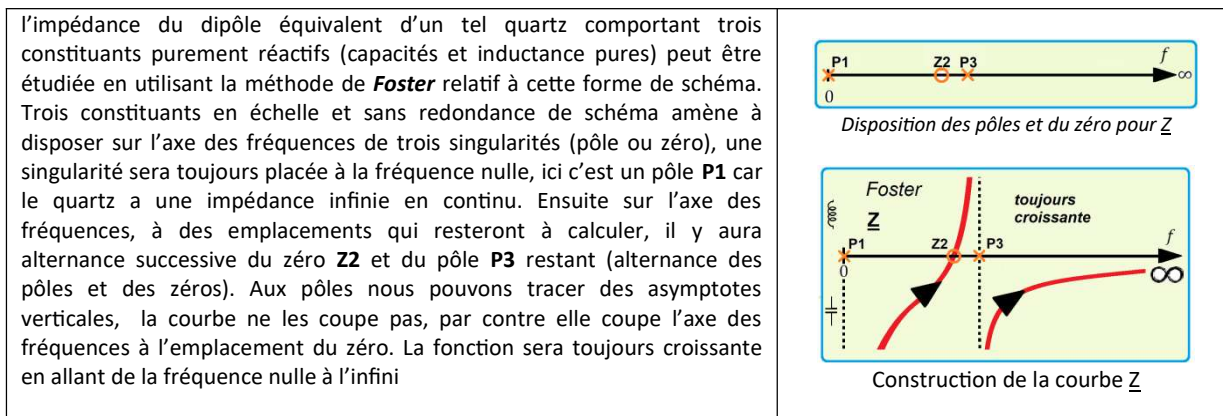
Nous obtenons l'expression de la capacité série : $C_s = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \cdot \frac{e^2 \cdot Y}{\epsilon} = C_n \cdot K^2$ avec $K^2 = e^2 \frac{Y}{\epsilon}$,

ainsi que celle de l'inductance équivalente $L = \rho \frac{d^3}{S e^2 Y^2}$ et la capacité parallèle

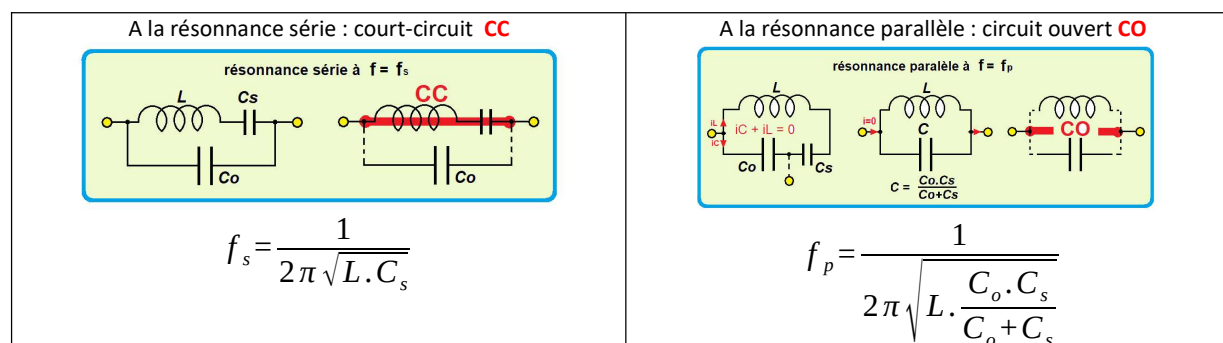
$$C_0 = C_n - C_s = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{S}{d} (1 - K^2)$$



Etude de l'impédance **Z** du quartz parfait sans perte (non amorti) et sans fréquences parasites :



Raisonnement physique :



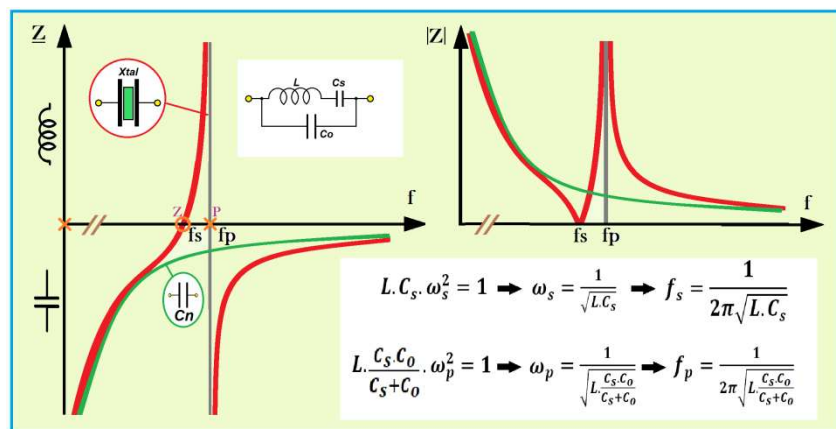
Comme $C_s > C_o$, nous avons $f_s < f_p$

Par le calcul de l'admittance avec la transformée de Laplace :

$$Y = C_o \cdot p + \frac{1}{L \cdot p + \frac{1}{C_s \cdot p}} \quad p = j\omega \quad Y(j\omega) = C_o \cdot j\omega + \frac{1}{L \cdot j\omega + \frac{1}{C_s \cdot p}}$$

$$Y = (C_s + C_o) p \cdot \frac{L \frac{C_s \cdot C_o}{C_s + C_o} \cdot p^2 + 1}{L C_s \cdot p^2 + 1}$$

Pour l'essentiel des fréquences, le quartz se comporte comme un condensateur **Cn** et lorsque la fréquence est proche de la fréquence de résonance mécanique, il réagit électriquement sur un tout petit espace fréquentiel en passant du court-circuit à la fréquence série **fs**, au circuit ouvert à la fréquence parallèle **fp**. Entre ces deux fréquences le quartz a un comportement inductif et ce sera dans cette zone qu'il sera exploité comme oscillateur avec un montage électronique correct.



Une approche plus réaliste de la piézoélectricité, aussi bien pour les quartz que les céramiques est de tenir compte de l'amortissement naturel de la vibration de résonance, nous reprenons donc l'étude du modèle mécanique. L'amortissement des oscillations est représenté par un frottement linéaire α , il est extrêmement faible pour les quartz utilisés comme résonateurs dans les montages oscillateurs. Le frottement est modélisé par un vérin qui exerce une force d'opposition proportionnelle à la vitesse de déplacement, ici dans ce qui suit, nous exagérons fortement son effet pour le mettre en évidence.

Les trois éléments de base exercent chacun une force qui s'oppose à la force appliquée, la masse une force d'inertie liée à l'accélération $M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}$, le vérin une force dépendante de la vitesse $\alpha \cdot \frac{dx}{dt}$ et le ressort une force liée à l'écrasement kx , ce qui donne cette nouvelle équation différentielle linéaire du deuxième ordre :

$$M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = f(t)$$

La transformée de Laplace avec des conditions initiales nulles est directe

avec l'opérateur dérivée qui devient la variable complexe:

$$\frac{d}{dt} TL \quad p = \sigma + j\omega$$

$$H(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1/M}{p^2 + \frac{\alpha}{M} \cdot p + \frac{k}{M}} TL^{-1} \quad h(t) = \frac{e^{-\frac{\alpha}{2M}t}}{\sqrt{M\left(k - \frac{\alpha^2}{4}\right)}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)$$

Résultat déduit d'un dictionnaire des transformées de Laplace.
 La réponse est oscillatoire amortie, son retour asymptotique sur l'axe des zéros confirme la stabilité du système apportée par le frottement. La réponse impulsionnelle représentée ici est moyennement amortie comme dans le cas de certains transducteurs en céramique. Un quartz pour oscillateur sera lui très faiblement amorti, il a un très grand coefficient de qualité et la décroissance exponentielle sera lente.

La réponse harmonique est celle d'un litre passe-bas du deuxième ordre **LP2**, représentée ici en coordonnées cartésiennes :

$$H(v) = \frac{1}{1 + 0,2j \cdot v - v^2}$$

$v = \frac{f}{f_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$
fréquence réduite

$$H(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1/M}{p^2 + \frac{\alpha}{M} \cdot p + \frac{k}{M}} \quad p = j\omega \quad H(\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)}$$

Pour un coefficient d'amortissement $m=0.1$, le coefficient de surtension à la résonance est de 5.025

$$Q = \frac{1}{2m\sqrt{1-m^2}} \quad \omega_r = \omega_0\sqrt{1-m^2}$$

Pour un quartz de qualité réalisé dans un matériau synthétique **HQ**, le coefficient **Q** peut largement dépasser 10^6 , ayant alors un très faible amortissement le terme m^2 est négligeable et ce terme se simplifie :

$$Q = \frac{1}{2m} \quad \text{et} \quad \omega_r = \omega_0$$

La fonction de transfert

$$H(p) = \frac{A}{\omega_0^2 + \frac{2m}{\omega_0} p + 1}$$

est stable si les trois termes du dénominateur sont du même signe. Pour un quartz, le terme **2m** peut être inférieur à 10^{-6} , du fait du très fort coefficient de surtension, ce quartz reste toujours très fragile s'il est soumis à une trop forte excitation électrique ou mécanique. A cause du frottement, il subit aussi un échauffement qui peut modifier très légèrement sa fréquence d'oscillation, selon le type de coupe.

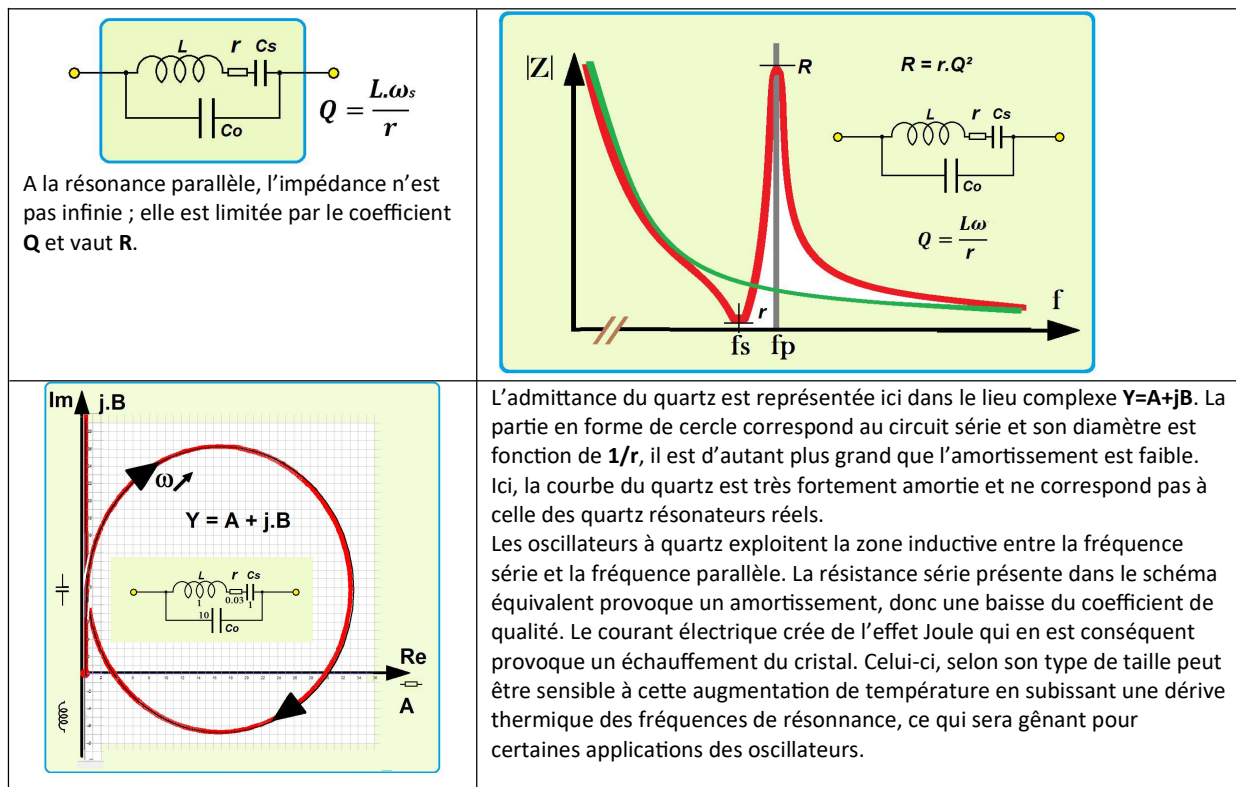
Plan $p = \sigma + j\omega$

Toujours une allusion aux pôles, la fonction

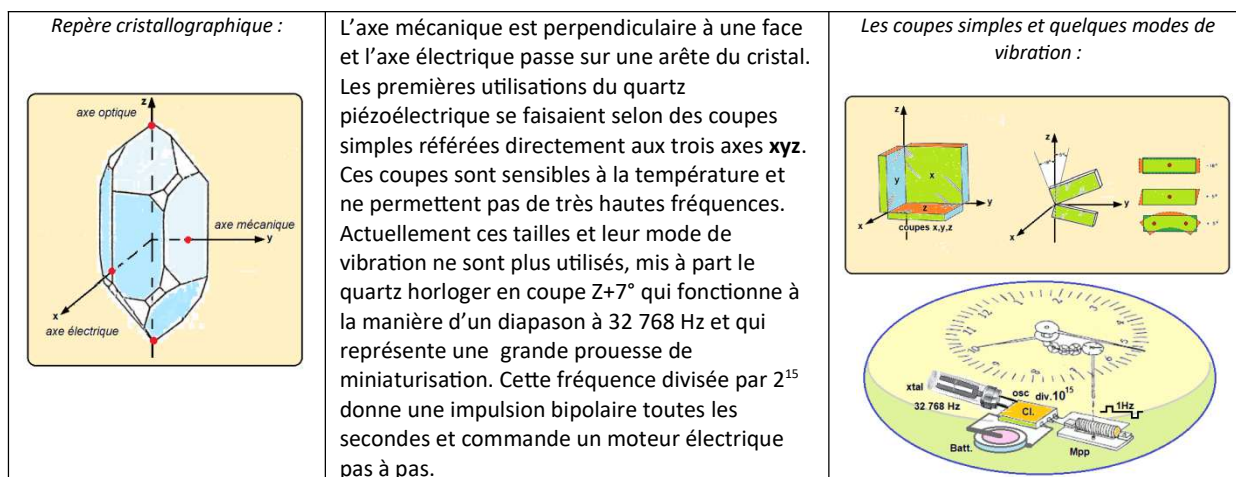
$$H(p) = \frac{A \omega_0^2}{p^2 + \frac{2m}{\omega_0} p + \omega_0^2} = \frac{A \omega_0^2}{(p-P) \cdot (p-P^*)}$$

peut se décomposer selon deux racines qui sont ses pôles **P** et **P*** conjugués entre eux. Ceux-ci sont placés dans la zone stable à gauche dans le plan complexe et sur un demi-cercle. Pour un quartz résonateur, l'angle ψ reste extrêmement petit:
 $m = \sin(\psi)$

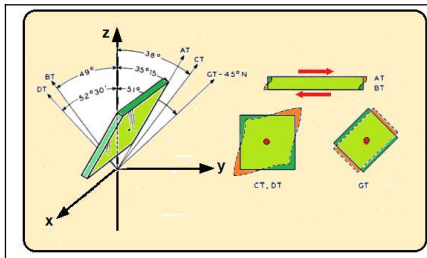
L'effet de l'amortissement sur le schéma équivalent se traduit par une résistance **r** de très faible valeur mise dans le circuit série :



Les différentes coupes cristallines du quartz : selon la fréquence désirée et selon certaines autres caractéristiques comme le comportement thermique (dérive en température), le vieillissement ou le bruit de phase, on privilégie certaines coupes angulaires.

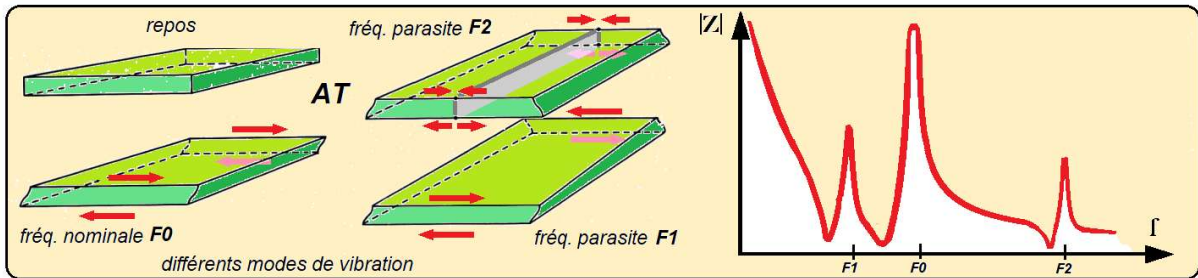


Pour améliorer le comportement thermique, les ingénieurs de la compagnie Bell ont expérimenté des nouvelle coupe en faisant subir une rotation des axes. Parmi ces nouvelles tailles, la coupe AT a donné un très bon comportement thermique et c'est une technique encore mise en œuvre actuellement pour les quartz à bas coût.



Coupe **AT** : coupe à simple rotation Lack, Willard (Bell 1934). Coupe à $35^{\circ}15'$ par rapport à l'axe z. La grande majorité des quartz actuellement fabriqués sont taillés selon la coupe AT. Une onde de volume se propage en vibration mécanique de déplacement selon un cisaillement transversal. Une même plaque de cristal peut avoir différent mode de résonance et vibrer selon des modes non prévus.

et les quartz de plus haute technologie ayant des spécifications de très faible bruit de phase sont taillés selon la coupe SC.



Coupe **SC** (*stress compensated*): coupe double rotation

A finir ...

Ainsi qu'une présentation des oscillateurs LC et à quartz. F4AEM

$$f \quad \omega \quad P1 \quad Z1 \quad P2 \quad 0 \quad \infty$$

