LP48 - Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

Rapport du jury : Présenter l'exemple célèbre du pont de Tacoma n'est pas pertinent, sauf s'il s'agit d'effectuer une critique d'une interprétation erronée très répandue. L'analyse du seul circuit RLC est très insuffisante pour cette leçon. Le phénomène de résonance ne se limite pas aux oscillateurs à un degré de liberté. Le jury regrette que les cavités résonnantes soient rarement présentées. L'aspect énergétique de la résonance est ignoré la plupart du temps. Trop souvent, la notion même de résonance n'est liée qu'à l'existence d'un maximum d'amplitude. Les applications dans le domaine microscopique sont rarement abordées. La leçon porte sur l'étude de phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. Le candidat ne doit pas se limiter à l'électricité et à la mécanique. Il doit prendre soin de dégager les propriétés communes aux différents exemples présentés. Quel lien y a-t-il entre le circuit RLC et la résonance du sodium ? Les relations entre le comportement des systèmes forcés et les propriétés des mêmes systèmes libres, doivent être soulignées, de même que les aspects énergétiques des phénomènes de résonance.

Niveau: CPGE (MPSI/PCSI/PTSI)
Pré-requis:
Electrocinétique : circuit RLC (en régime libre) et régime transitoire
Mécanique classique
Optique ondulatoire : Fabry-Pérot, notions d'interférence à onde multiples
Notation complexe
Bibliographie:
RLC
http://livre21.com/LIVREF/F13/F013069.pdf
http://www.physagreg.fr/electrocinetique-5-resonances-rlc-serie.php#bloc_page
Bilan de puissance
"J'intègre" MPSI/PCSI de M.N Sanz. Dunod (chapitre puissances)
Partie Fabry
http://www.lkb.upmc.fr/cqed/wp-content/uploads/sites/14/2019/10/optique_TD_coherence_corrige.pdf
Partie laser :
http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Contenu_11.html

→ Programme python

Introduction:
Prenons l'exemple de la balançoire: Sur une balançoire pour pouvoir se balancer, on remarque qu'il faut poussé à intervalle régulier (en A et en B → *Cf dessin*) notre balançoire pour avoir un balancement constant et avec un maximum d'amplitude. On remarque rapidement que si on essaye de contrarier ce mouvement, et de se balancer à un autre rythme, le mouvement périodique devient fortement instable et on doit fournir énormément d'énergie.

La résonance est le phénomène selon lequel un système (ici, la balançoire) est sensible à une certaine fréquence (ici, poussée de la balançoire à intervalle réguliers). Cette fréquence est appelée fréquence de résonance ou fréquence propre. La fréquence propre d'un système est la fréquence à laquelle oscille ce système lorsqu'il est en évolution libre. Soumis à une telle excitation, le système va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes, jusqu'à atteindre un régime d'équilibre → les oscillations sont alors qualifiées de « forcées ».

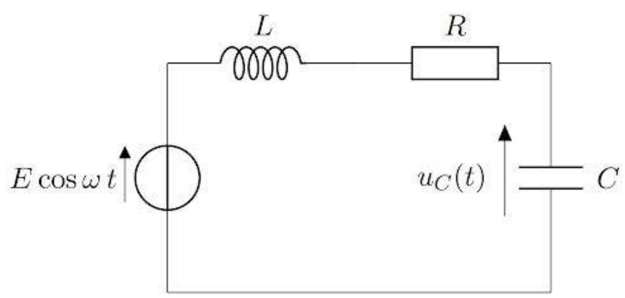
Dans une précédente leçon nous avons étudié les oscillations libres d'un circuit RLC série caractérisé par une fréquence propre d'oscillation. Nous allons voir ce qui se passe lorsque nous excitons le système à cette fréquence, et étendre l'étude à d'autres domaines de la physique notamment l'optique avec la cavité Fabry-Pérot. Pour cela, on se limitera à des systèmes linéaires et on se placera donc en régime sinusoïdal forcé.

I - Etude d'un système mono résonant

1) Le circuit RLC série

a) Présentation du système

Nous allons étudié le circuit RLC série en régime sinusoïdal forcé, il est constitué d'une résistance R, d'une bobine d'inductance L et d'un condensateur de capacité C associées en série. Le circuit est alimenté par un générateur idéal de tension sinusoïdale de f.é.m : e(t) = E.cos(ωt)



Il est possible ici de montrer une vidéo-manipulation pour illustrer la résonance.

Nous verrons alors que le montage RLC série peut-être étudié en tension ou en intensité et qu'il y a donc existence de deux types de résonances aux caractéristiques différentes.

b) Réponse en tension

On se place aux bornes du condensateur, d'après la loi des mailles :

$e(t) = u_L + u_R + u_c$

$e(t) = L.di/dt + R.i + u_c$

or $i = C.du_c/dt$ et on est en régime sinusoïdale forcé : e(t)=E.cos(wt)

$$\frac{d^2u_C}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC}u_C = E\cos\omega t$$

La solution de cette équation différentielle est la somme de la solution de l'équation homogène (équation différentielle avec second membre nul) et d'une solution particulière.
On rappelle que :
-La solution de l'équation homogène correspond au régime transitoire ;
- La solution particulière correspond au régime permanent.
Le but étant ici d'étudier le régime forcé, on ne s'intéressera qu'à la solution particulière, de plus le régime transitoire est assez bref.

En notation complexe : (Démo en [1])

$\underline{u}_c(t)$ = $$\frac{\underline{e}(t)}{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}$$

→ Etude en amplitude
(module de l'amplitude complexe)

$$U_C = \frac{E}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2C^2\omega^2}}$$

avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ la pulsation propre du circuit et $Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$ le facteur de qualité (on verra son sens plus tard). On pose x= w/w_o

Soit

$$U_C = \frac{E}{\sqrt{(1 - x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2}}$$

Variation de Uc dépend de $f(x) = (1 - x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2$

$$f'(x) = 2 \times (-2x) \times (1 - x^2) + \frac{2x}{Q^2}$$

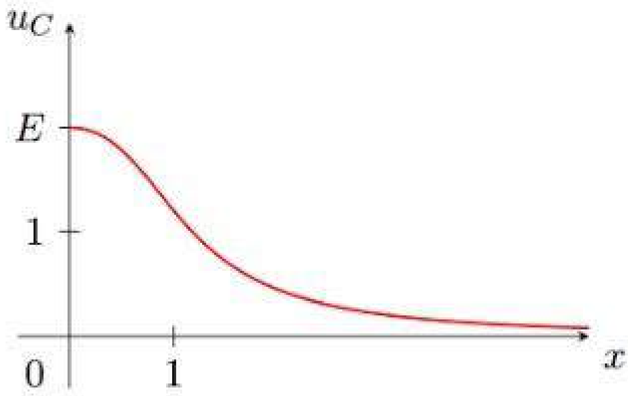
f'(x) = 0 pour

x=0 et $x = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$ si et seulement si $1 - \frac{1}{2Q^2} > 0$ soit $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$

2 cas se distingue :

- Q < $\frac{1}{\sqrt{2}}$

alors f'(x) > 0 pour toute valeur de w, donc f(x) croissante soit U_c décroissante



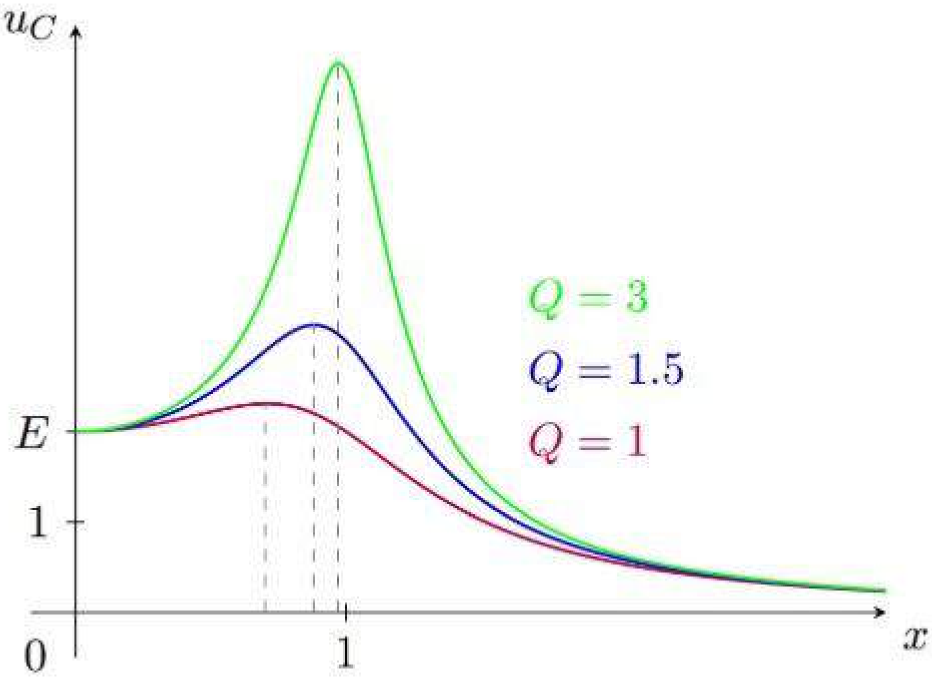
Il n'a pas de résonance en tension quand Q < $\frac{1}{\sqrt{2}}$

- Q > $\frac{1}{\sqrt{2}}$

x	0		$x = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$		$+\infty$
$f'(x)$		-		+	
$f(x)$		Décroissante		Croissante	
U_C		Croissante	$U_{\max} = \frac{2Q^2E}{\sqrt{4Q^2-1}}$	décroissante	

On observe un maximum en tension pour $w=w_r= w_o.\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$

C'est le phénomène de résonance en tension (aussi appelé résonance de charge).



On remarque que la pulsation de résonance wr<wo et que U_{cmax} > E : phénomène de surtension.
Nous observons que :

- la surtension augmente avec Q
- lorsque Q augmente, w_r tend vers w_o (mais toujours inférieur)
- lorsque Q augmente, la résonance est de plus en plus aiguë (pic étroit).

→ Etude du déphasage (de u_c par rapport à e)

$$\Phi_c = \arg(\underline{U}_c) = \arg\left(\frac{E}{1-LC\omega^2+jRC\omega}\right)$$

$$= -\arg(1-LC\omega^2+jRC\omega)$$

$$= -\arg\left(j\left(RC\omega - j(1-LC\omega^2)\right)\right)$$

$$= -\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{1-LC\omega^2}{RC\omega}\right)$$

$$\Phi_c = -\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{1-x^2}{x/Q}\right)$$

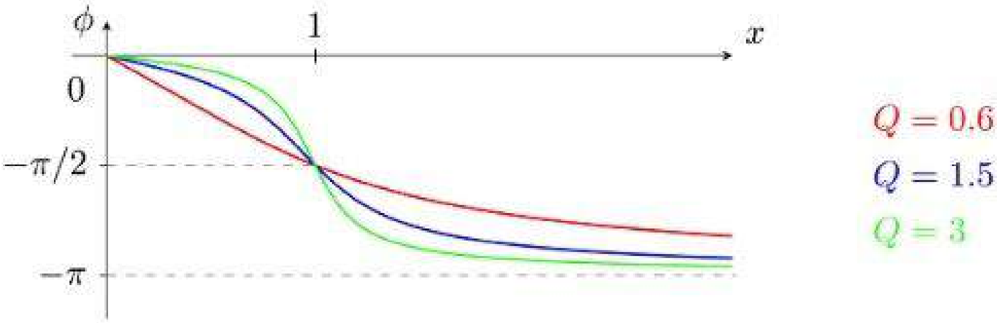
On étudie les variat° de $f(x) = Q\left(\frac{1}{x} - x\right)$

$$f'(x) = -Q\left(\frac{1}{x^2}+1\right)$$

$f'(x) < 0$ pour tte valeur de Q

$f \searrow$ et $\arctan(\ ) \nearrow$ donc $\Phi_c \searrow$

$\lim_{x\to 0} \Phi_c = 0$; $\lim_{x\to\infty} \Phi_c = -\pi$ et $\Phi_c = -\pi/2$ pour $x=1$



A la resonance, u_c est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à e lorsqu'elle existe.

Conclusion:

Il y a résonance en tension aux bornes du condensateur si $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$ et on observe un déphasage de $\frac{\pi}{2}$ de u_c par rapport à e.

c) Réponse en intensité

Pour étudier l'intensité, on se place aux bornes de la résistance car U_r=R.i (image de l'intensité).Pour cette étude, nous nous servons de la relation entre la tension aux bornes du condensateur, que nous venons de déterminer, et l'intensité du courant.

on sait que $i = C.\frac{d(u_c)}{dt}$

en complexe $\underline{i} = C\frac{d(\underline{u_c})}{dt} = jC\omega \underline{u_c}$

$$\underline{i} = jC\omega \frac{\underline{e}(t)}{1-LC\omega^2+jRC\omega}$$

→ Etude en amplitude

$$\underline{I} = jC\omega \frac{\underline{E}}{1-LC\omega^2+jRC\omega}$$

$$I = \frac{EC\omega}{\sqrt{(1-LC\omega^2)^2+R^2C^2\omega^2}}$$

$$= \frac{E/R}{\sqrt{1+Q^2(x-1/x)^2}}$$

Variation de I dep de $f(x) = 1+Q^2(x-1/x)^2$

$$f'(x) = Q^2 . 2 (x-1/x)(1+\frac{1}{x^2})$$

$f'(x) = 0$ si $x = 1$

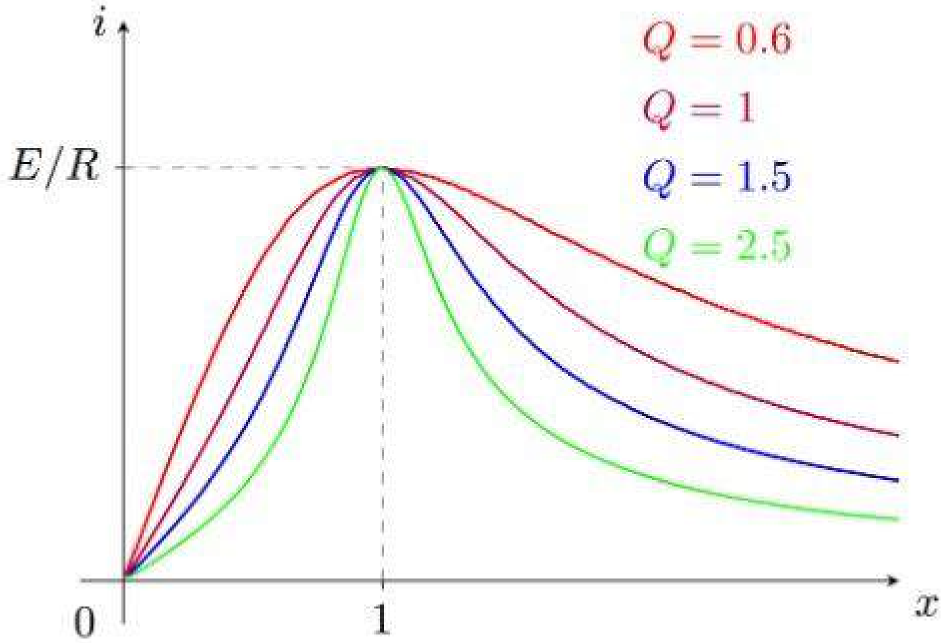
$f'(x) > 0$ de $[1 ; \infty[$ $\Rightarrow I \nearrow$

$f'(x) < 0$ de $[1 ; 0[$ $\Rightarrow I \searrow$

I est maximume pour $\omega_r = \omega_0$ et vaut E/R.

Il y donc toujours résonance en intensité ($\forall Q$) contrairement à res. en tension et a lieu cette fois-ci en ω_0.

(Si $R \nearrow$, ω_r ne varie pas mais $I_{max} \searrow$)



Le facteur de qualité Q porte donc bien son nom. En effet, lorsqu'il est très grand, la résonance est aiguë, et lorsqu'il est très petit, la résonance est floue

→ Etude du déphasage

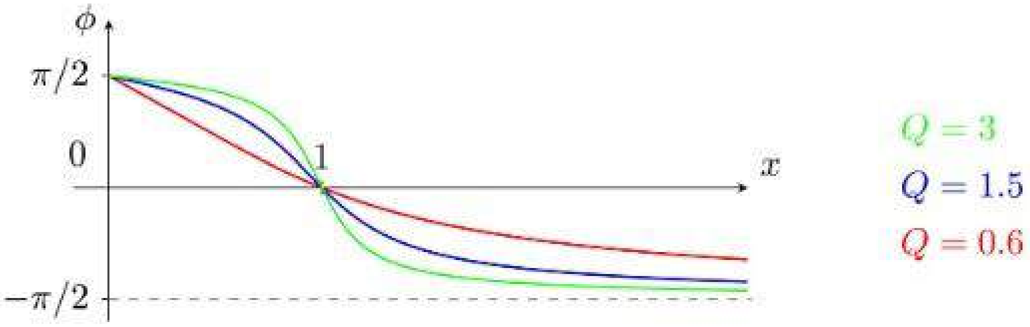
de $i(t)$ par rapport à $e(t)$

$$\underline{i} = C\frac{du}{dt} = jC\omega\underline{u}$$

$$I e^{j\phi'} e^{j\omega t} = jC\omega U_c e^{j\phi_c} e^{j\omega t}$$

$$I = C\omega U_c$$

$$\phi' = \pi/2 + \phi_c$$



À la résonance, on a un déphasage nul d'après les études précédentes. Cela fournit donc un moyen facile pour déterminer expérimentalement la pulsation de résonance : au lieu de chercher la valeur donnant un maximum de l'amplitude de l'intensité, on cherche la valeur donnant un déphasage nul, par exemple en observant une droite en représentation de Lissajous .

Conclusion :
Il y a toujours une résonance en intensité, elle s'observe lorsque la pulsation d'excitation est égal à la pulsation propre du système, et lorsque le déphasage est nul.

On remarque que la résonance aux bornes du condensateur n'existe pas toujours contrairement à la résonance en intensité. D'autre part, la fréquence de résonance aux bornes du condensateur n'est pas la même que celle obtenue pour la résonance en intensité.

→ Bande passante et facteur de qualité

La b.p $\Delta\omega$ (rad/s) correspond aux pulsations pour lesquelles l'amplitude en intensité $I_m(\omega) > \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$

$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ qui sont les pulsations de coupures

En résolvant l'inégalité on a

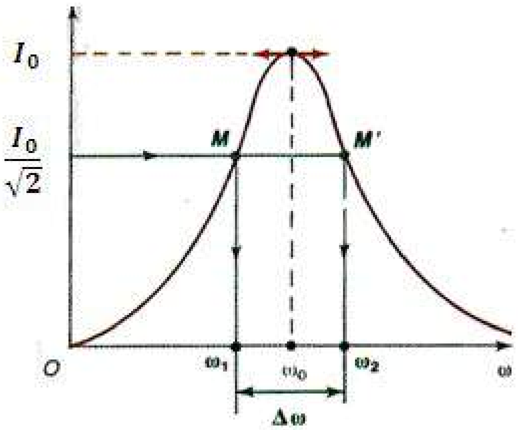
$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{2Q}\left(\sqrt{1+4Q^2} - 1\right)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_0}{2Q}\left(\sqrt{1+4Q^2} + 1\right)$$

Pour un circuit RLC série : $\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{R}{L}$

Plus Q est élevé, $\Delta\omega$ petite, résonance aigue

(Utiliser pour créer des filtres)



Le facteur de qualité Q porte donc bien son nom. En effet, lorsqu'il est très grand, la résonance est aiguë car la bande passante est très petit, et lorsqu'il est très petit, la résonance est floue, et la bande passante large.

→ *programme python*

d) Aspect énergétique

→ **Conservation de l'énergie**

On avait $e(t)=u_R + u_L + u_C = Ri + L.di/dt + u_C$

Pour passer à la puissance on multiplie par i :

$e(t).i = Ri^2 + L.i.di/dt + u_C.i$

$e(t).i = R.i^2 + d(½.L.i^2)/dt + d(½.C.u_C^2)/dt$

Attention on est en convention générateur pour le générateur, et en convention récepteur pour L,C et R.

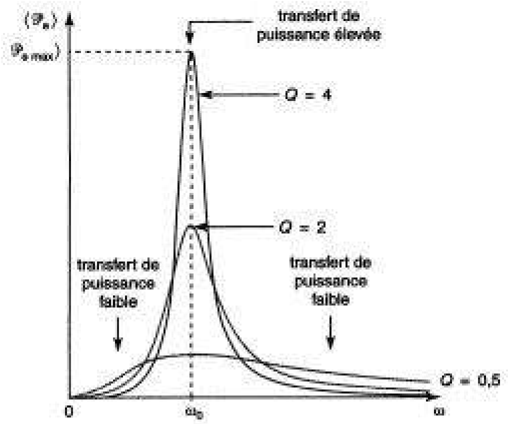
P_g fourni par le générateur = e(t).i
P_J dissipé par effet joule par la résistance = R.i²
$E_{magnétique}$ dans la bobine = ½.L.i²
$E_{électrostatique}$ dans le condensateur = ½.C.uc

→ **Interprétation physique**
La puissance électrique fournie par le générateur est dissipée par effet Joule dans le conducteur ohmique et sert à faire varier l'énergie électromagnétique emmagasinée dans le circuit.
Au départ le condensateur est chargé, l'énergie est stockée sous forme d'énergie électrostatique (E_{es} = ½.C.u_c²), dans la bobine il n'y a pas d'énergie stockée sous forme magnétique. Le condensateur se décharge et l'énergie se stocke dans la bobine sous forme d'énergie magnétique (E_m = ½.L.i²). Puis la bobine se décharge, le courant change de sens pour recharger le condensateur ect d'où le phénomène d'oscillation.

D'un point de vue énergétique Q=2.π. $E_{électromagnétique}$/$É_{perdue}$

Et donc en régime permanent l'énergie totale est constante :
$\langle P_g \rangle = \langle P_J \rangle$, la puissance fournie par le générateur ne sert plus qu'à compenser l'effet Joule.

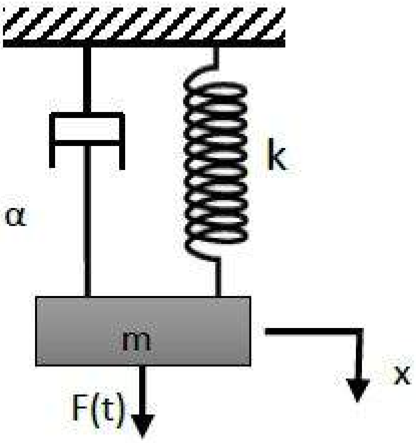
A la résonance, $\langle P_g \rangle = \langle R.i^2 \rangle = R.I_e^2 = R.I_{max}^2/2 = E^2/2.R$
La puissance est maximum à la résonance.



Par définition, on appelle résonance la situation correspondant à une fréquence pour laquelle la puissance moyenne transférée de l'excitateur à l'oscillateur est maximale. On force le système à sa fréquence propre, si bien que l'énergie est toujours apportée en phase, et devient très importante.

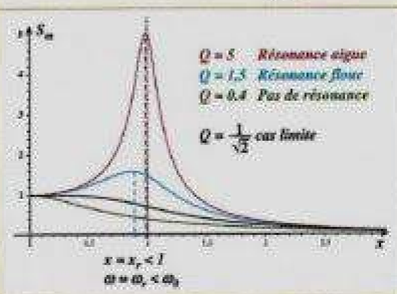
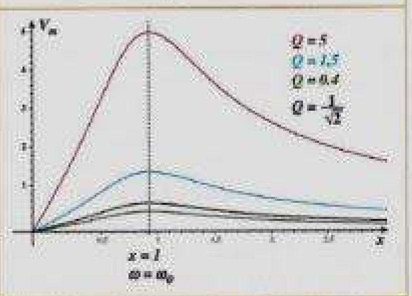
2) Analogie avec la mécanique : système masse-ressort + amortisseur

Le tableau ci-dessous résume les analogies entre l'oscillateur électrique en régime sinusoïdal forcé étudié en électrocinétique et l'oscillateur linéaire en régime sinusoïdal forcé étudié en mécanique. L'inductance L correspond à « l'inertie », la résistance R aux « frottements » et l'inverse de la capacité C au « rappel ».



Récapitulatif des systèmes

	Généralisation	Mécanique	Electricité
Système	Oscillateur amorti	Masse-ressort+amortisseur	RLC série
Forçage	$e(t) = E_0 \cos(\omega t)$	Support oscillant : $z_A(t) = A_0 \cos(\omega t)$	Générateur sinusoïdal : $u_G = U_0 \cos(\omega t)$
Réponse	$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi)$	élongation : $z(t) = Z_m \cos(\omega t + \varphi)$	Charge* : $q(t) = Q_m \cos(\omega t + \varphi)$
Dérivée	$i(t) = V_m \cos(\omega t + \psi)$	vitesse : $v(t) = \dot{z} = V_m \cos(\omega t + \psi)$	intensité : $i(t) = \dot{q} = I_m \cos(\omega t + \psi)$
Paramètres	ω_0 pulsation propre Q = facteur de qualité	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ $\quad Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha}$	$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ $\quad Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

	Réponse en élongation ou charge (ou tension)	Réponse en vitesse ou intensité
Réponse réelle	$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi)$	$i(t) = V_m \cos(\omega t + \psi)$
Amplitude complexe de la réponse	$\underline{S} = \dfrac{\omega_0^2 E_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\frac{\omega_0 \omega}{Q}} = \dfrac{E_0}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}}$	$\underline{V} = \dfrac{Q\omega_0 E_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = \dfrac{Q\omega_0 E_0}{1 + jQ\left(x - \frac{1}{x}\right)}$
Amplitude de la réponse	$S_m = \lvert\underline{S}\rvert = \dfrac{E_0}{\sqrt{(1 - x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2}}$	$V_m = \dfrac{Q\omega_0 E_0}{\sqrt{1 + Q^2\left(x - \frac{1}{x}\right)^2}}$
Courbes		
Abscisse du maximum (résonance)	$x = x_r = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$ et $\omega = \omega_r = \omega_0\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$	$x = 1$ et $\omega = \omega_0$
Maximum d'amplitude	Le maximum n'existe que si $Q > 1/\sqrt{2}$. x_r se rapproche de la fréquence propre quand Q augmente.	Quel que soit Q, le maximum existe et correspond toujours à la fréquence propre.

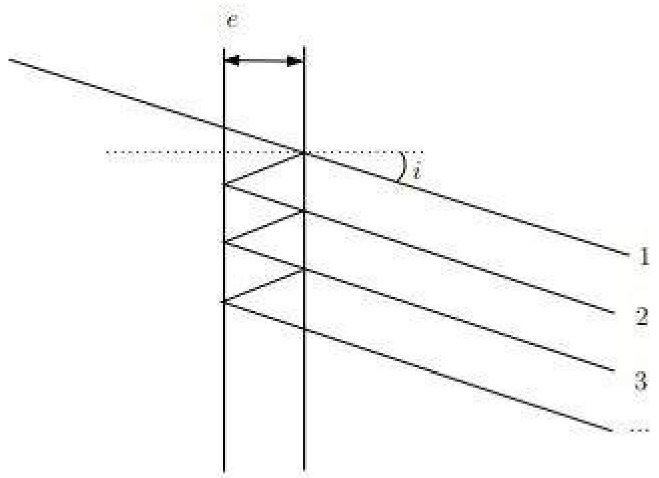
On peut voir que l'étude de la résonance s'applique à différent domaine de la physique, et ici pour un système à 1 degré de liberté, on peut réaliser une analogie très forte entre un système mécanique et un système électronique.

II - Etude d'un système multi-résonant : Cavité Fabry-Pérot

1) Cavité résonante Fabry-Pérot

L'interféromètre Fabry-Pérot est un interféromètre optique constitué de 2 miroirs semi-réfléchissants plans et parallèle à haut coefficient de réflexion (environ 95%).
La lumière entrante effectue plusieurs aller-retour à l'intérieur de la cavité et ressort partiellement à chaque réflexion. Les rayons sortant interférent entre eux et produisent des anneaux localisés à l'infini.

(A savoir: interférence en coin (fraction de °) pour évier franges d'interférences dues au faces arrières qui sont tout de même traiter pour anti-reflet.)



Pour simplifier notre étude on utilise un faisceau collimaté monochromatique et on place en sortie une lentille de focalisation pour observer les franges sur un écran.

On remarque que les rayons en sortie n'ont pas parcouru la même chemin optique → ils présentent donc un déphasage Φ les un par rapport aux autres et interfèrent entre eux à la sortie.

Le déphasage entre 2 rayons successifs $\Delta\Phi = 2.k.e.\cos(\theta) = \frac{4\pi}{\lambda} e.\cos(\theta)$

Or le $m^{ième}$ rayon m a subi deux réflexions de plus que le précédent si bien que chaque réflexion atténuant l'intensité lumineuse d'un facteur R, soit en amplitude un facteur $\sqrt{R}$, car $R=r^2$ avec R coefficient de réflexion en énergie.
On a l'amplitude du $m^{ième}$ rayon :

$$s_m = s_0(\sqrt{R})^{2m} e^{jm\Delta\phi} = s_0(Re^{j\Delta\phi})^m$$

Si on place alors une lentille convergente qui fait converger tous ces rayons vers un même point d'un écran placé au plan focal, l'amplitude de l'onde au niveau de cet écran s'écrit alors comme la somme des contributions de chaque rayon :

$$s_{tot} = \sum_{m=1}^{+\infty} s_m = s_0 \sum_{m=1}^{+\infty} (Re^{j\Delta\phi})^m = s_0 \lim_{m\to+\infty} \frac{1-(Re^{j\Delta\phi})^m}{1-Re^{j\Delta\phi}} = s_0 \frac{1}{1-Re^{j\Delta\phi}}$$

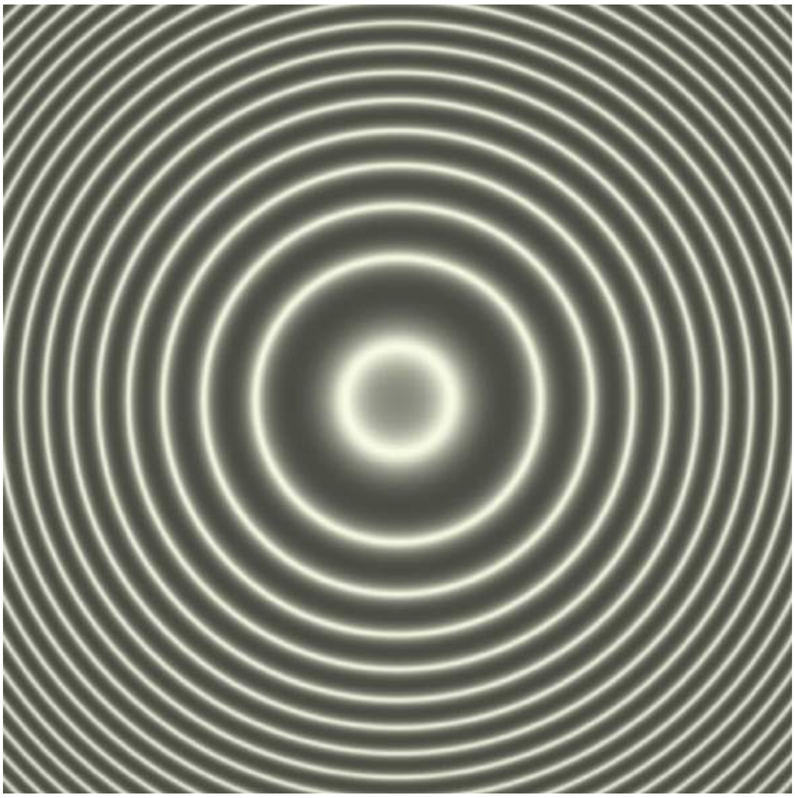
Soit l'intensité totale :

$$I_{tot} = |s_{tot}|^2 = s_{tot}\overline{s_{tot}} = \frac{s_0^2}{(1-Re^{j\Delta\phi})(1-Re^{-j\Delta\phi})} = |s_i|^2 \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\Delta\phi} = I_i \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\Delta\phi}$$

La transmittance est alors:

$$T(\theta) = \frac{I_{tot}}{I_i} = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\Delta\phi} = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R(1-2\sin^2\frac{\Delta\phi}{2})} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2+4R\sin^2\frac{\Delta\phi}{2}} = \frac{1}{1+\frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\frac{\Delta\phi(\theta)}{2}}$$

On obtient sur l'écran :



La transmittance est maximum si $\sin(\Delta\Phi/2)=0 \rightarrow \Delta\Phi = 2.n.\pi$, le maximum faut alors $I=I_i$

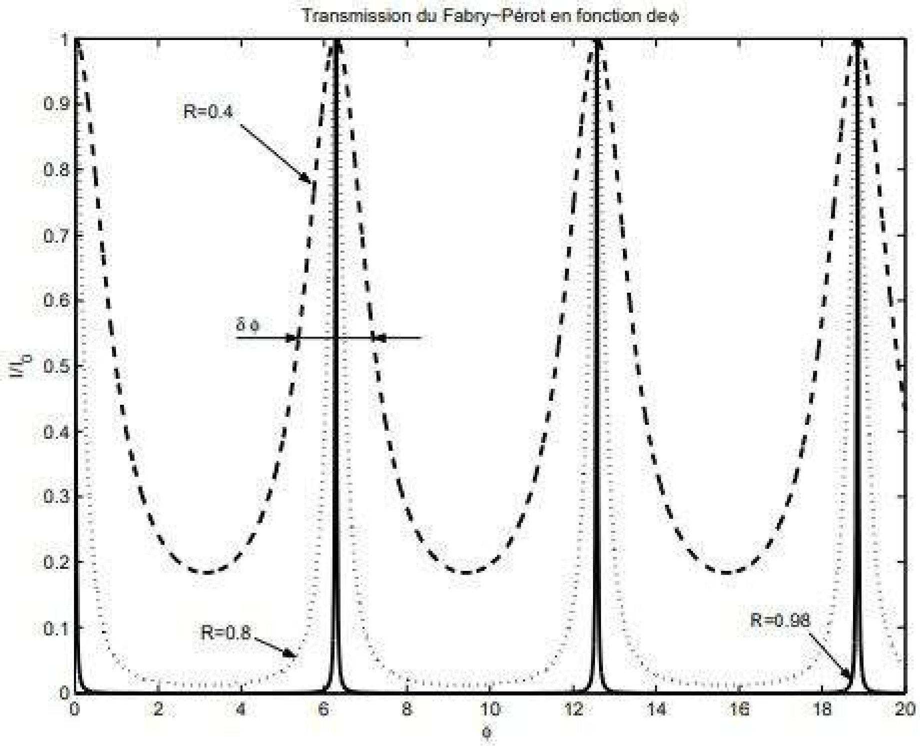


FIGURE 5.2 – Transmission d'un Fabry-Pérot en fonction de φ. Influence du coefficient de réflexion.

Les interférences sont constructives (car rayon en phase), la lumière est entièrement transmise même si le coefficient R avoisine 100%. → C'est la résonance : on a un maximum de puissance transférée entre le rayonnement incident et le rayon transmis (ce qui n'est pas forcément intuitif avec R environ 95%). Le système à accumuler de l'énergie.

On a résonance pour un nombre n discret de pulsation (contrairement aux exemples précédents), soit en fréquence v_n=n.c/(2.e.cos(ϑ)) c'est les modes propres de la cavité.

On remarques qu'elles sont équidistantes de $\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = \frac{4\pi}{c} . \nu_2 . e.\cos(\theta) - \frac{4\pi}{c} . \nu_1 . e.\cos(\theta) = \frac{4\pi}{c} . e.\cos(\theta) . \Delta\nu = 2.\pi$

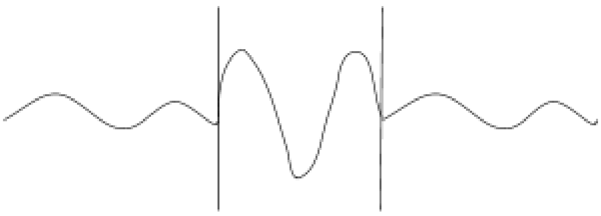
On appelle l'intervalle spectral libre (ISL) du Fabry-Pérot : $\Delta\nu = \frac{c}{2.e.\cos(\theta)}$

On cherche maintenant à calculer la largeur à mi-hauteur d'un pic de résonance $\delta\nu$, pour définir la finesse du pic qui correspond au rapport de l'écart entre 2 pics par la largeur à mi hauteur d'un pic:

$$\mathfrak{F} = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

On remarque que c'est une fonction croissante de R qui quantifie la finesse des pics de résonance : plus la finesse de l'interféromètre est élevée, plus les pics ont fins et donc meilleure est la résolution. En effet, on remarque sur la figure que les pics sont d'autant plus étroit que R est grand. L'explication est que hors résonance le système se comporte comme

2 miroirs où il accumule de l'énergie et à la résonance, c'est la où l'énergie accumulée est maximum car en phase avec l'énergie déjà présente, les ondes partiellement réfléchi et celles transmises interfèrent car en phase et l'onde dans la cavité ayant une très forte amplitude compense la très forte réflectivité du miroir de sortie.

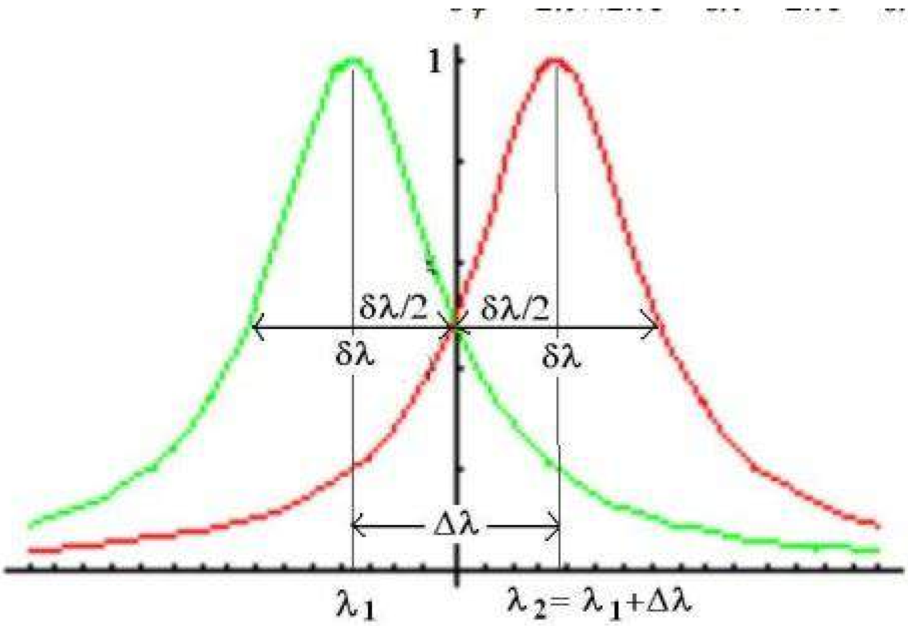


On va voir que la finesse des anneaux est importante pour séparer les raies. On va alors définir le facteur de qualité de cet interféromètre ou plus communément appelée le pouvoir de résolution, il est définit comme le rapport de la fréquence propre à la résonance sur la bande passage :

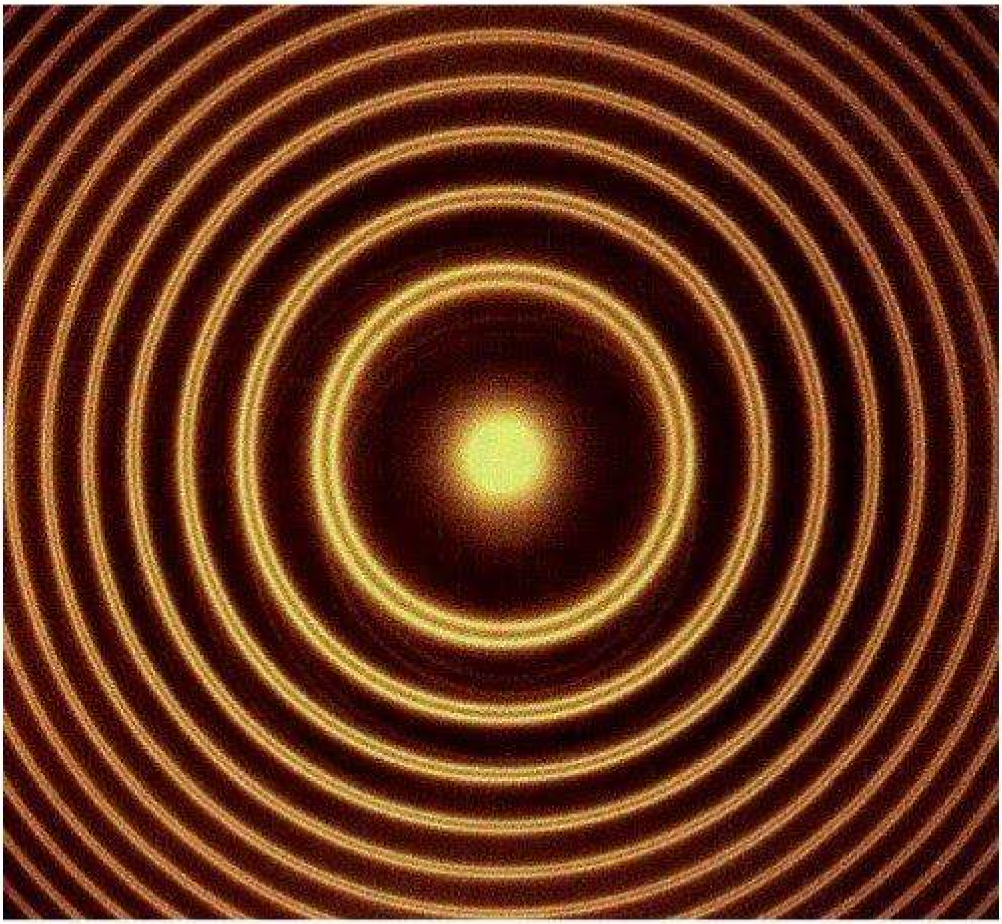
$$Q = \frac{\nu}{\delta\nu} = \mathcal{F}\,\frac{\nu}{\Delta\nu}$$

<u>**A.N :**</u> Résolution du doublet du sodium?
λ=589,3 nm
On a une cavité L= 20cm, et supposons qu'on est en incidence normale :
$\Delta\nu = \frac{3.10^8}{2.0,2}$ = 7,5.10^8 Hz = 750 MHz entre 2 résonance successives (soit 0.4 nm)

Si on utilise des miroirs à R=0.95, on a F=61.
On peut calculer le facteur de qualité Q= 89868 (facteur de qualité très grand), pour en déduire l'écart minimal en lambda détectable : $\delta\lambda = 6pm$ << 400 pm, on peut dont détecter avec cette cavité FP le doublet du sodium.



Cas limite de « résolution » de deux raies proches
sur le critère de « mi-hauteur » (max/2)



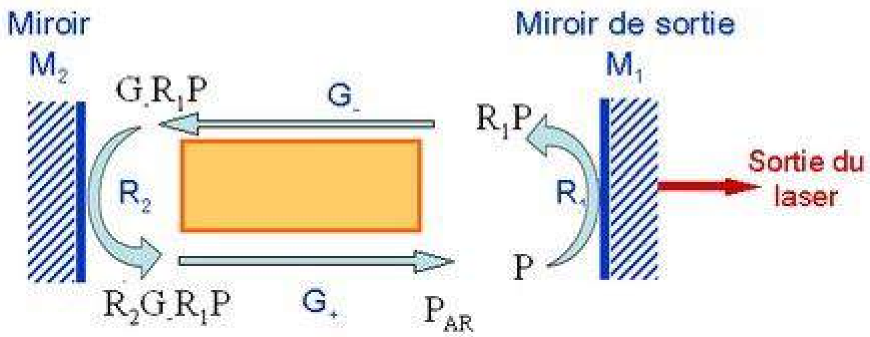
2) Application au laser

<u>A savoir</u> : l'explication est très simplifié pour montrer le rôle de la cavité dans l'application au laser!!!

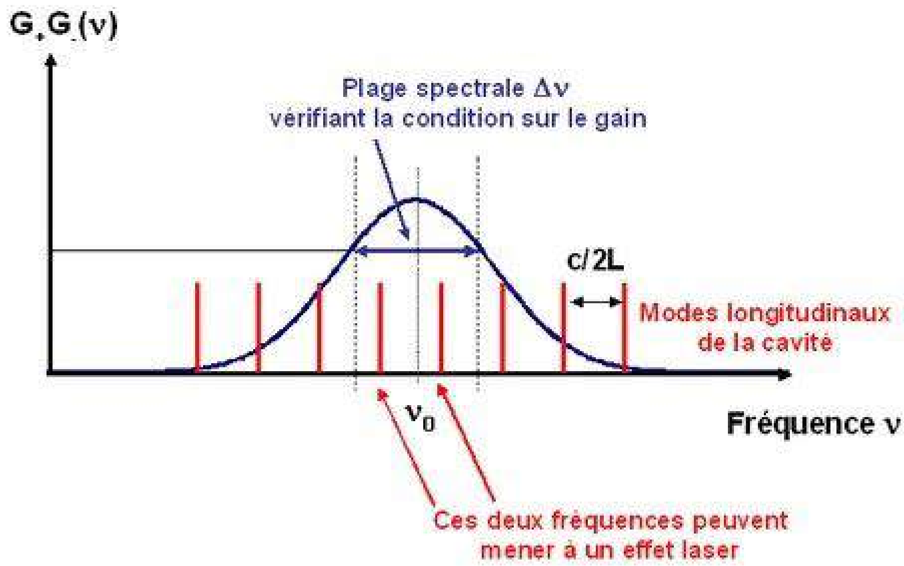
Un effet laser s'obtient en plaçant un milieu amplificateur entre deux miroirs de coefficients de réflexion extrêmement élevés (~ 99%). A chaque aller-retour, l'onde électromagnétique gagne en amplitude autour d'une certaine fréquence par émission stimulée du gaz contenu dans l'enceinte. En effet, la cavité Fabry-Perot décrit précédemment joue un rôle de filtre sur le spectre émis par le laser. Seules des ondes de certaines fréquences peuvent s'y propager. On a vu que les fréquences étaient v_n=n.c/(2.e.cos(i)).

Pour résumer, la cavité est capable de filtrer l'émission spontanée sous la forme de fréquences discrètes (les modes longitudinaux de la cavité). Lorsqu'on arrive à sélectionner un seul mode longitudinal, le rayonnement laser a une qualité spectrale inégalable.

Les miroirs de la cavité doivent donc être choisis de telle sorte que le gain par aller et retour G+G- soit supérieur à $1/R_1R_2$: on dit aussi que le gain doit être supérieur aux pertes de la cavité (représentées par les transmissions des miroirs):



Dans le peigne de fréquences imposées par la cavité, seules celles qui vérifient la condition sur le gain ont une chance de mener à une oscillation laser.



Conclusion

Pour conclure, la résonance est un accroissement significatif de la réponse d'un système à une (ou plusieurs) fréquences particulières, sous une excitation périodique. On a vu qu'elle se définissait aussi par la capacité du système à stocker de l'énergie et qu'elle était maximum lorsque l'énergie accumulée était en phase avec celle apportée.
De plus, pour système linéaire, il y aura phénomène de résonance à chaque fois que la pulsation excitatrice sera égale à la pulsation propre, soit une seule fréquence propre dans le cas du circuit RLC, ou un nombre N pour la cavité Fabry-Pérot.
Les systèmes au caractère résonant sont utilisés dans de nombreuses application , ils permettent en particulier de générer des filtres très sélectifs en électronique, les lasers comme on a pu le voir, ou même aussi la RMN, ou encore en musique avec des instruments ayant une caisse de résonance. Mais parfois, ce phénomène n'est pas désiré, et il faut alors travailler à l'atténuation de celle-ci, le plus souvent en ajoutant un élément fortement dissipatif au système (amortisseurs sur une voiture pour éviter qu'elle rentre en résonance).

Remarques:

-Concernant le plan : éviter la résonance en tension, où l'évoquer très rapidement si le temps, mais détaillé plutôt celle en intensité puis celle en puissance pour détailler l'aspect

énergétique en détails (calculer la puissance reçue en fonction de la fréquence, puis déterminer à quelle pulsation elle est maximale, on se rend compte qu'elle est max pour la pulsation propre → définition de la résonance), puis parler du facteur de qualité, et de la bande passante! La 2ème partie est très bien (notamment l'application numérique sur le doublet du sodium), mais l'application au laser peut être enlevé car très simplifié, avoir..
-Autre application sur le Fabry-Pérot : les filtres interférentiels.

Questions:
-Vous n'avez utilisé que des signaux excitateurs sinusoïdaux, il y a
une raison à cela ? Un signal quelconque peut se décomposer en somme de signaux sinusoïdaux (série de Fourier), donc cela revient au même, et cela simplifie l'étude.
-Il n'y a pas des hypothèses à faire pour que ça marche ? Linéarité du système.
-Si jamais je change votre circuit RLC, ici en série, que je prends les composants en parallèle ou autre : ça change la pulsation propre ? Le facteur de qualité ? A la fréquence de résonance, un circuit série RLC a le courant maximum, alors qu'un circuit parallèle RLC a courant minimale.
-Résonance non linéaire
https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_non_lin%C3%A9aire
-On peut présenter la corde de Melde, peu de chose à dire si on ne fait que ça, donc prioriser effectivement RLC ou son équivalent mécanique ressort/amortisseur.
-On pourrait aussi étudier résonance en micro (RMN, ou électron élastiquement lié avec diffusion de Rayleigh, manip avec 2 lampes de Sodium : on place 2 lampes à vapeur de sodium face à face, une éteinte, une allumée. On éteint la 2ème, et celle initialement éteinte réémet quelques secondes les doublets → transfert énergétique).
-Excitation en RMN : c'est quoi ? La source de l'excitation est un champ magnétique tournant, et ce qui entre en résonance est le moment magnétique de spin ou en terme macro l'aimantation de notre milieu.
-Réexpliquer exemple de la balançoire, où se trouve le résonance ? Explique le fait que la résonance est caractérisée par une fréquence et pas une autre. Vaut mieux se limiter à une personne qui pousse l'enfant, pour avoir un transfert d'énergie maximal. Si on s'intéresse à l'enfant lui même, plus délicat car oscillateur non linéaire, apport d'énergie interne à l'oscillateur, idée du pendule paramétrique, excitation qui soit au double de la fréquence propre (fonctionne pour le Botafumeiro), régit par l'équation de Faraday.
- Vous avez dit que le transitoire était bref ? Pour le trouver, on enlève le terme de droite de l'équation, et on trouve la pseudo pulsation. La pseudo-période doit être petite devant la durée d'acquisition par exemple. Ou genre on expérimentalement on attend qu'il soit passé.
- Inconvénient d'une surtension ? Peut endommager les composants si il ne peut pas supporter cet tension. Notion de tension de claquage du condensateur : le milieu diélectrique (qui peut être l'air) possède un champ interne suffisamment fort pour ioniser le milieu. Et dans le cas d'une surintensité, ça joue sur la bobine, les fils peuvent fondre.
-Définition de la bande passante, pourquoi racine de 2 ? Définition de bande passante liée à la puissance.
- Retour sur le bilan de puissance : vous avez dit que c'est forcément en convention générateur ? En fait non on choisit, le choix de la convention n'influence pas mais en régime indep du temps, c'est le **signe** qu'il faut regarder. En convention générateur, si le signe est

positif, alors le dipôle considéré fournit bien le courant/l'intensité. Moins évident de conclure ici car on ne connaît pas les signes.
- Pour la partie optique : comment on justifie l'existence d'un système d'anneaux ? Les rayons qui sortent sont parallèle, de même inclinaison.
- De manière générale, c'est quoi un mode propre (expliquer avec corde de Melde)? Associé à une fréquence donnée, c'est une réponse du système tel que le système oscille de façon harmonique.
- Si le facteur R=1, on peut dire quoi de la finesse ? Elle tendrait vers l'infini, on aurait des pics de Dirac. Intérêt d'avoir ce facteur de transmission en énergie R=1 ? Bah rien ne sort du système, réflexion totale, en pratique on observerait rien.
- Facteur de qualité d'un laser ? Bien au delà de 10^8.
- Plusieurs fréquences semble possibles sur votre courbe (diapo 40), laisse penser que laser non monochromatique ? En fait écart très faible entre 2 modes longitudinaux pour un laser, donc on peut considérer monochromatique.