

MP Résonance

Elio Thellier

Session 2021

1 Introduction

[Page wiki plutôt intéressante](#)

On considère un système constitué d'une source excitatrice et d'un résonateur. Un résonateur ou oscillateur est un système susceptible d'entrer en résonance c'est à dire d'être le siège d'oscillations amorties. Un tel système peut emmagasiner temporairement de l'énergie sous différentes formes, et l'oscillation est le phénomène par lequel l'énergie du système passe d'une forme à l'autre de façon périodique. L'excitateur va appliquer une énergie sous forme périodique à la même fréquence que celle des oscillations du résonateur, et le système résonant va pouvoir accumuler cette énergie et être le siège d'oscillations de plus en plus importantes jusqu'à atteindre un état d'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs du système.

Pour résumer : résonance = effet d'accumulation de l'énergie en injectant celle-ci au moment où elle peut s'ajouter à l'énergie déjà accumulée, c'est à dire en phase avec cette dernière. On a alors transfert maximal d'énergie. En d'autres mots : le système excitateur + résonateur présente une résonance lorsque sous certaines conditions d'excitation le transfert d'énergie entre l'excitateur et le résonateur est maximal.

Manip introductive :

Matériel

- GBF
- Ampli de puissance
- Vibreur + corde
- Poulie, potence, noix
- Masse

- Balance
- Réglét

On utilise la corde de Melde munie d'un vibreur. On rappelle que la fréquence fondamentale f_0 de la corde s'écrit $f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{mg}{\mu}}$. Pour une longueur de 120cm et une masse de 100g on obtient $f_0 = 10Hz$.

On excite la corde à une fréquence inférieure, typiquement 5 Hz, l'amplitude de la corde est faible, le transfert n'est pas optimal. Lorsqu'on s'approche de la dizaine de Hertz, l'amplitude augmente jusqu'à atteindre un maximum. Puis elle diminue à nouveau.

Idées importantes à transmettre :

- La résonance est un phénomène fréquentiel
- Il existe une fréquence particulière pour laquelle le transfert d'énergie est maximal
- Autour de la fréquence de résonance on a quand même un transfert significatif d'énergie vers le résonateur : notion de plage de fréquence sur laquelle l'excitateur et le résonateur sont fortement couplés

On va chercher à caractériser la résonance de différents systèmes pour plusieurs raisons :

- Le transfert maximal d'énergie peut conduire à des dépassements / dysfonctionnements / saturation que l'on veut éviter
- Si on réduit la plage de fréquence sur laquelle le système résonne on crée un système très sensible à certaines fréquences particulières, intéressant, oscillateur très sélectif (quartz, horloge atomique)

2 Résonance en intensité d'un circuit RLC série

Matériel

- Plaquette de branchements (pas les vertes mais plutôt les platines métalliques)
- Bobine de 60 mH environ et capa de 470 nF
- Soit potentiomètre pour résistance variable, soit jeu de résistances et on les fait varier à la main
- RLC-mètre pour mesurer à chaque fois les valeurs de R, L et C (rappel : faire attention à la fréquence de travail)

- Oscilloscope
- GBF

Protocole

- Montage du circuit RLC, sortie aux bornes de la résistance variable, ajouter un suiveur en sortie du GBF pour s'affranchir de sa résistance de sortie
- Détermination de la fréquence de résonance en régime sinusoïdal forcé :

On applique en entrée au GBF une excitation sinusoïdale à la fréquence f , d'amplitude 10 Vpp. On observe à l'oscillo la réponse temporelle aux bornes de R et l'entrée, on met les mêmes échelles en ordonnée et on visualise en mode XY. A la résonance, le déphasage est nul. Evaluer f_0 et son incertitude.

Etude théorique du circuit : $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ autour de 950 Hz avec les paramètres choisis. Remarque : même en faisant les incertitudes proprement on n'obtient pas la valeur attendue. Pourquoi ? Est-ce la formule théorique qui cloche ? Peut être que le LC-mètre mesure les valeurs des composants tout seuls et que la somme des parties n'est pas le tout ? Effets inductifs et capacitifs ? Y réfléchir.

Remarque : dans un circuit RLC, l'énergie est sous forme potentielle quand la tension est maximale aux bornes du condensateur, et sous forme magnétique quand le courant est maximum dans la bobine. Si on injecte de l'énergie potentielle au moment ou l'énergie potentielle est maximale, l'énergie totale augmente.

- Evaluation du facteur de qualité en fonction de la résistance :
On vient de voir qu'il existait une fréquence à laquelle le transfert d'énergie était maximal entre le GBF et le circuit RLC !
Cette fréquence est en fait la fréquence propre du système à 1DDL qu'est le circuit RLC. Les oscillations libres du circuit ne peuvent se produire qu'à une fréquence bien définie susceptible d'induire une résonance. On peut retrouver cette fréquence propre en soumettant le système résonant non plus à une excitation périodique mais à une impulsion de sorte que le système sera le siège d'oscillations amorties sur une fréquence proche de sa fréquence propre. Pour un système à plusieurs DDL : on définit les modes propres qui sont les modes sur lesquels on peut toujours décomposer l'état de la corde, puis en forçage par un excitateur, on aura résonance aux pulsations des modes propres.
- On va étudier la réponse du système à une impulsion à l'aide d'une macro Igor. On va obtenir son diagramme de Bode.
Rq : attention à bien brancher l'entrée du GBF en voie 1 de l'oscillo et la sortie

du circuit en voie 2 de l'oscillo.

Choix des paramètres d'impulsion :

- On s'attend à une fréquence autour de 950 Hz donc on veut voir jusqu'à 5 kHz, pour la durée du pulse on prends $T_p = \frac{1}{f_{max}}$
 - On veut environ 100 points donc pour la durée d'acquisition on choisit $T_d = 100T_p$
 - On envoie une sinus cardinal car sa TF est une porte
- On peut ainsi retrouver la valeur de f_0 , mais on peut aussi déterminer Q.

Sur le diagramme de Bode en phase on mesure alors pour chaque valeur de résistance le gain, la fréquence de résonance, et les deux fréquences de coupure à -3dB qui correspondent au passage de la phase à ± 45 degrés, et les incertitudes associées. On en déduit alors Q par la formule $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$

On cherche à comparer à la formule théorique $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

Remarque : Si on utilise ce modèle, on n'obtient pas ce qu'il faut. Pourquoi ? Parce qu'il y a une résistance résiduelle dans le montage, r , due à la résistance de sortie du GBF (dont on peut se débarrasser déjà en ajoutant un suiveur), et aux bobines de cuivre, qui ne peut être négligée pour les faibles valeurs de R . Deux solutions : Soit on ne garde que les grandes valeurs de R , soit on ajuste avec la formule $Q = \frac{1}{R+r} \sqrt{\frac{L}{C}}$ en ajoutant un paramètre. On obtiendrait ainsi une estimation de r .

Comment mesurer r pour le vérifier ? A la fréquence de résonance on doit avoir un gain de 1, en fait on a un gain de $\frac{R}{R+r}$, ce qui nous permettrait de déterminer r .

- Conclure sur l'influence du facteur de qualité : valeur du max et comportements asymptotique est le même, insister dessus. Montrer la superposition des diagrammes de Bode

Interprétation de Q dans le domaine temporel ? On regarde U aux bornes de C, on obtient en réponse à un échelon une décroissance exponentielle avec un facteur proportionnel à Q. On peut le montrer, et montrer la réponse à un créneau BF (50 Hz) et faire varier R de sorte à mettre en évidence les 3 régimes possibles (apériodique, critique, pseudo-périodique).

On peut insister donc en transition ici sur le lien fort entre dissipation et résonance. On va y revenir dans la manip suivante. Intéressant en acoustique/instruments de musique.

3 Résonance acoustique : le diapason

Occasion de bien parler de FFT

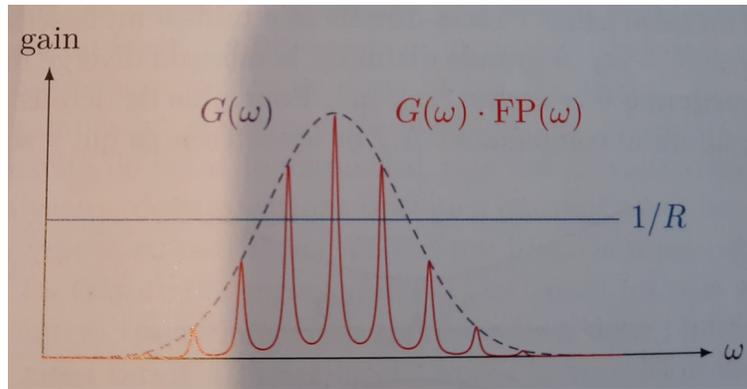
- diapason
- micro
- oscillo

4 Résonance optique : cavité confocale

[BIBLIO : PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE P. 206 SUR L'ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS SPECTRALES D'UN LASER]

[SUR LES LASERS]

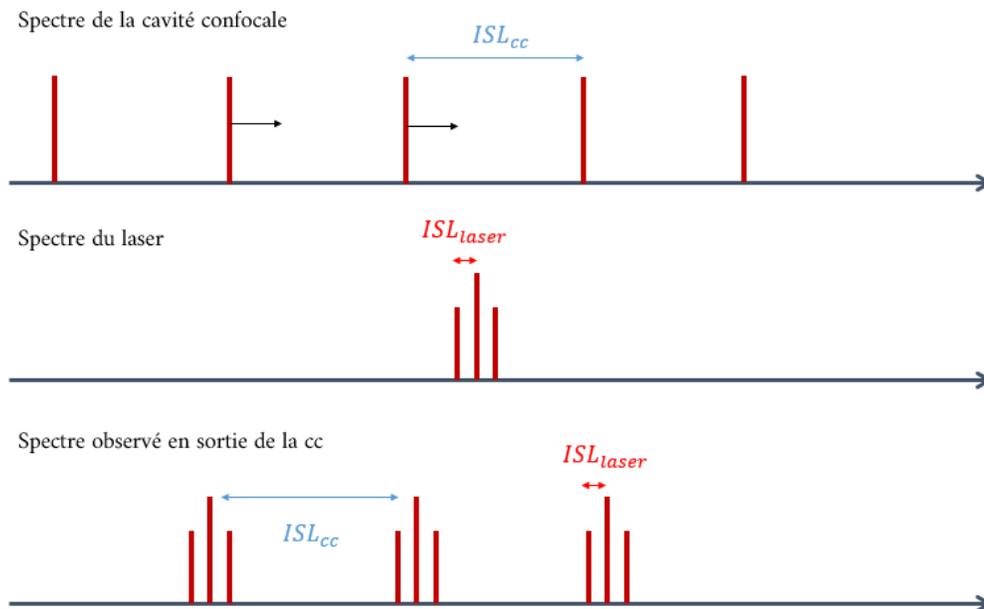
On peut voir un laser comme un système exciteur-résonateur : il est constitué en effet d'un milieu amplificateur (exciteur), et d'une cavité optique (résonateur) : au démarrage du laser, la "lampe-milieu amplificateur" émet spontanément dans toutes les directions. Cependant, il existe une petite partie de l'émission qui se trouve dans l'axe de la cavité laser. Ces photons spontanés peuvent donc y faire des allers et retours. Au fur et à mesure, le milieu amplificateur va jouer son rôle et la quantité de lumière présente dans la cavité va augmenter de façon considérable. Le confinement de la lumière va ainsi accroître la probabilité d'émission stimulée, au détriment de l'émission spontanée. En parallèle, la cavité va jouer le rôle de filtre à cause des multiples allers et retours : seule l'onde parfaitement perpendiculaire à l'axe de la cavité pourra se propager et certaines fréquences seront privilégiées (fréquences de résonance de la cavité). Ainsi, la cavité donne au rayonnement laser ses propriétés si particulières (directivité, finesse spectrale). L'effet laser peut alors se produire à condition que le gain dépasse les pertes liées à la fuite de lumière en sortie de la cavité, alors l'intensité lumineuse dans la cavité croît jusqu'à ce que les pertes s'équilibrent avec l'amplification et on atteint une saturation de l'effet laser.



La sortie du laser peut être elle-même vue comme un système excitateur. L'idée est que l'on va étudier les caractéristiques de la lumière laser en utilisant un autre système résonateur dans lequel on va injecter la lumière laser, à savoir, une cavité Fabry-Pérot. Dans les manip qu'on vient de faire, 1) on avait des systèmes à 1 DDL 2) on a fait varier la fréquence de l'excitateur. Ici le résonateur FP possède plusieurs modes propres, séparés par l' ISL_{cc} , fixé par la longueur de la cavité. Plutôt que faire varier la fréquence de l'excitateur, on va faire varier les modes propres du résonateur, en faisant varier la longueur du FP.

Dans la cavité Fabry Perot, on a une intensité non nulle en sortie à condition d'être un multiple de l' ISL_{cc} , donc sur un mode de la cavité. On voit cela comme une condition de résonance. Le laser lui peut fonctionner seulement sur les modes multiples de l' ISL_{laser} , dont l'intensité est modulée par la courbe de gain.

On fait un balayage type rampe de la longueur de la cavité donc ce qu'il se passe c'est qu'on écarte les pics correspondant aux modes de la cavité, mais en fait comme on est très loin du fondamental tout se passe comme si les modes de la cavité se transmetaient simplement à une vitesse constante. Donc pendant une rampe on balaie un à un les modes du laser modulés en amplitude par la courbe de gain. Puis un autre mode de la cavité rebalaie ces mêmes modes. Donc on voit à l'écran plusieurs fois le même spectre qui est celui du laser modulé par la courbe de gain. Comme en vérité l' ISL_{cc} varie très peu, on peut supposer qu'entre deux de ces "paquets" c'est l' ISL_{cc} . Pour mieux visualiser les "paquets" on active la persistance de sorte à visualiser en direct la courbe de gain et ne pas se tromper sur les pics à regarder !!!!



Attention on pourrait penser qu'il suffit de mesurer l'écart entre deux modes du laser mais non c'est fonction de la vitesse à laquelle on fait le balayage. Pour s'affranchir de la connaissance de cette vitesse il suffit de mesurer aussi à l'écran l' ISL_{cc} entre deux courbes de gain, or celui là on le connaît (donné par la doc), donc il suffit de faire une règle de 3 pour retrouver ISL_{laser} .

Matériel

- Laser He-Ne non polarisé (boîte en bois)
- Cavité confocale avec son boîtier de commande ([Notice](#))
- Oscilloscope
- Doublet de 150mm par ex

Protocole

- On focalise très bien le faisceau laser avec une lentille pour l'envoyer dans la cavité confocale
- Brancher la cavité confocale à l'oscilloscope en suivant les indications de la doc
- Observer la rampe de tension qu'on envoie au piézo pour contrôler la taille de la cavité et trigger sur le front descendant de cette rampe de consigne

- Visualiser la sortie de la cavité
- Avec le temps qui passe le laser s'échauffe donc la longueur de la cavité bouge donc l'ISL du laser bouge donc on voit les modes se balader sous la courbe de gain... En mettant la persistance on peut visualiser des courbes de gain, ce qui est commode pour ne pas se tromper sur les pics à considérer.
- Formule pour obtenir l'ISL du Laser :

$$ISL_{laser} = \frac{c}{4d} \frac{\Delta t}{\Delta t_{cc}}$$

où $\frac{c}{4d} = ISL_{cc} = 2GHz$ environ que l'on considère constant pour les raisons expliquées plus haut, Δt_{cc} l'écart entre deux courbes de gain qui correspond donc à l'ISL de la cavité confocale, cf schéma plus haut, et Δt l'écart entre deux modes du laser.

- On peut s'intéresser à d'autres choses du genre la largeur à mi-hauteur de la courbe de gain qui nous donnerait un OG de de l'élargissement Doppler du néon à 632,8 nm, même si cette comparaison est à prendre avec des pincettes, cf p.211 du Physique expérimentale