LP 45: Résonances. Applications

Léa Bessonart

April 23, 2022

Niveau: L2

Pré-requis: Electrocinétique, Notation complexe, Corde de Melde, interférences, rayonnement dipolaire.

Sources: Cap prépas , Physique (MPSI-PCSI-PTSI) , corde de melde : `https://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=14578`

Introduction

Pour introduire la résonance on peut parler de l'exemple de la balançoire. Lorsqu'une personne est sur une balançoire et que quelqu'un la pousse, pour lui communiquer de l'énergie, alors l'opérateur doit pousser de manière régulière en accord avec la pulsation d'oscillation de la personne sur la balançoire. En effet si l'opérateur pousse quand la balançoire est de l'autre côté cela ne sert à rien. Or pousser la balançoire, c'est à dire exciter de manière périodique notre système se traduit par une augmentation de l'amplitude des oscillations. C'est la résonance.

On peut alors tenter de définir ce qu'est la résonance : phénomène par lequel l'excitation d'un système oscillant à une pulsation ω proche de l'une de ses fréquences propres ω_0, se traduisant par une réponse de très forte amplitude..

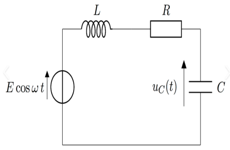
On va s'attacher dans cette leçon à revenir sur des systèmes déjà rencontrés pour montrer la généralité du concept de résonance.

> intro faire résonance d'un RLC

1 Un oscilateur à un degrés de liberté

1.1 Généralité sur le RLC

On considère un circuit RLC série alimenté par un générateur de tension sinusoïdale $e(t) = E\cos\omega t$.



La loi de mailles appliquée au circuit s'écrit

$$e(t) = Ri + L\frac{di}{dt} + u_c$$

Or $i = \frac{dq}{dt}$, et $u_c = \frac{q}{C}$ l'équation différentielle vérifiée par q s'écrit donc:

$$\frac{e}{L} = \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC}$$

On peut réécrire cette équation sous une forme dites canonique :

$$\frac{e}{L} = \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}\frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q$$

avec $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ et $Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

C'est une équation qui décrit plusieurs systèmes, donc on ne s'intéresse pas uniquement au circuit RLC. De plus les idées pour caractériser une résonance seront les même, même si le système est légèrement différents. On peut faire une analogie avec un système mécanique.

	Mécanique	Electrocinétique
Equation	$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + \frac{\alpha}{m}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + \frac{k}{m}x = \frac{F}{m}\cos\omega t$	$\frac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2} + \frac{R}{L}\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{LC}q = \frac{e}{L}\cos(\omega t)$
Variable	position x	charge q
Dérivée temporelle	vitesse $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t$	intensité $\mathrm{d}q/\mathrm{d}t$
Inertie	masse m	inductance L
Dissipation	frottement α	résistance R
Raideur	raideur k	inverse d'un capacité $1/C$
Forçage	force F	tension e
Pulsation propre	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Facteur de qualité	$Q = \frac{1}{\alpha}\sqrt{mk}$	$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

1.2 Résonance en tension

L'équation est une équation différentielle linéaire, on peut donc utiliser un formalisme complexe, c'est à dire se placer dans l'espace de Fourier pour étudier le régime sinusoïdale forcé.

$$(j\omega)^2 q + \frac{Rj\omega}{L}q + \frac{1}{LC}q = \frac{e}{L}$$

Nous on s'intéresse à ce qu'il se passe au borne du condensateur. On en a donc $u = \frac{q}{C}$. Donc on peut exprimer u :

$$u = \frac{e}{1 + j\omega RC + LC(j\omega)^2}$$

On définit alors la fonction de transfert comme:

$$H = \frac{u}{e} = \frac{1}{1 + j\omega RC + LC(j\omega)^2} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{Q\omega_0} - (\frac{\omega}{\omega_0})^2}$$

On s'intéresse à déterminer la pulsation telle qu'il y ait un maximum de l'amplitude. On réécrit la fonction de transfert en utilisant la pulsation réduite $x = \frac{\omega}{\omega_0}$

$$H = \frac{1}{1 + j\frac{x}{Q} - x^2} \rightarrow |H| = \frac{1}{\sqrt{(1-x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2}}$$

On cherche à trouver la résonance, donc à amplitude de l'excitation fixé on veux que la norme de la fonction de transfert soit maximale. Ceci ce traduit par un dénominateur minimale dont la dérivée, noté f', sera posé nulle.

$$f' = -4(1-x^2)x + 2\frac{x}{Q^2} = 0 \rightarrow x^2 = 1 - \frac{1}{2Q^2} \qquad ou \quad x = 0$$

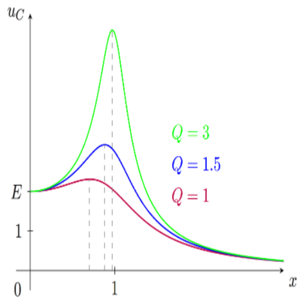
On a donc un maximum pour la fonction de transfert en

$$x_r = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \qquad soit \qquad H(x_r) = \frac{Q}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$$

La fonction de transfert sera maximale si $Q > 1/\sqrt{2}$. C'est un cas où les frottement sont faibles. On peut caractériser Q comme une mesure de dissipation à savoir comme un rapport entre le temps d'amortissement sur la période des oscillations.

De façon générale, on peut caractériser Q par l'acuité de la résonance, c'est à dire la largeur de la résonance. Elle est définie par convention comme l'intervalle $\Delta\omega$ telle que l'amplitude soit divisée par $\sqrt{2}$ par rapport au maximum. On a

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$$



Définition résonance: Lorsqu'un système est soumis à une exitation sinusoïdale, il peut exister certaine fréquence particulières, appelées fréquence de résonance, pour lesquelles sa réponse est d'amplitude particulièrement importante : on dit qu'il y a résonance. A la résonance, même une faible excitation peut suffire pour produire de très grandes oscillations du systèmes (cela peut même aller jusqu'à sa destruction).

1.3 Étude énergétique

On peut se demander si cette résonance correspond à une transfert énergétique maximal. Pour cela on repart de la loi des mailles en variables réelles et on multiplie par i :

$$ei = Li\frac{di}{dt} + Ri^2 + Cu_c\frac{du_c}{dt}$$

On reconnaît alors les différents termes :

- $P_G = ei$Puissance fournit par le générateur
- $P_J = Ri^2$ Puissance dissipée par effet Joule dans la résistance
- $P_L = Li\frac{di}{dt}$ puissance reçue par la bobine
- $P_C = Cu_c\frac{du_c}{dt}$ puissance reçue par le condensateur

Or en régime sinusoïdale forcé on a $< u_c\frac{du_c}{dt} > \propto < \sin(\omega t)\cos(\omega t) >= 0$ Il n'y a pas de puissance transféré en moyenne dans le condensateur. De même sur puissance de la bobine

On en déduit :

$$< P_G >=< P_J >$$

Donc toute la puissance fournie par le générateur est dissipée par effet Joule. Or

$$i = jC\omega u_c \quad \text{car uc=q/C} \implies i = \frac{e}{R}\frac{1}{1 + jQ(x - \frac{1}{x})}$$

Donc

$$\begin{aligned}
< P_J > =& < Ri^2 > \\
=& < RI^2 \cos^2(\omega t + \phi) > \\
=& R\frac{I^2}{2} \\
=& \frac{E^2}{2R}\frac{1}{1+Q^2(x-\frac{1}{x})^2}
\end{aligned}$$

Cette fonction a donc un maximum en $x = 1$. On dit donc que notre système résonne à $\omega = \omega_0$. Pour un degrés de liberté on a une fréquence propre.

Un système excité sinusoidalement est dit en résonance lorsque le transfert de puissance entre le générateur est l'oscillateur est maximal pour une certaine pulsation. Autrement dit la résonance se caractérise aussi par un transfert d'énergie optimal entre un excitateur et un resonnateur.

2 La cavité résonante :Oscillateurs à une infinité de degrés de liberté

Les systèmes étudiés jusqu'à présent sont des systèmes à un degré de liberté. Les oscillations ne se produisent qu'à une seule fréquence déterminée par les paramètres du systèmes. On peut se demander ce qu'il se passe lorsque l'on passe à lorsqu'il y a une infinité d'oscillateurs couplés, c'est le cas des cavité résonantes.

2.1 La corde de melde

L'expérience de la corde de Melde est vue comme un milieu dans laquelle se propage une onde, et on impose à cette onde des conditions aux limites qui marquent sa quantification. En prenant une corde sans dissipation et attachée à ses deux bouts, on obtient alors les modes propres de la corde de fréquences $\nu_n = n\frac{c}{2L}$ avec L la longueur de la corde et $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ la vitesse de propagation. On a donc un couplage linéaire entre une infinité d'oscillateur donc une infinité de modes propres. La corde est vue comme un oscillateur avec un nombre infini de degrés de liberté.

On excite la corde avec un pot vibrant, d'amplitude $\underline{a}$, on envoie donc une onde (plane progressive harmonique) qui se propage dans la corde par l'équation de d'Alembert, sans atténuation et sans dispersion.

On note r les coefficients de réflexions aux deux bouts de la cordes que l'on considère comme égaux.

Utilisons la notation complexe pour calculer l'amplitude du mouvement au point x :

$$A(x) = ae^{-ikx} + are^{-ik(2L-x)} + ar^2e^{-ik(2L+x)} + ...$$

(on se place en un point x fixé)

Les changements de signes proviennent des réflexions sur des extrémités fixes.

On en déduit, en séparant en pair et impair :

$$A(x) = ae^{-ikx}\sum_n (r^2e^{2ikL})^n + are^{-ik(2L-x)}\sum_n (r^2e^{2ikL})^n$$

Comme c'est une suite géométrique de raison (r^2e^{2ikL}), on peut écrire :

$$A(x) = a\frac{e^{-ikx} + re^{-ik(2L-x)}}{1 - r^2e^{2ikL}}$$

L'amplitude est la partie réelle de $A(x)$. On pose $\phi = 2kL$ et $cos(a) = 1 - 2sin(\frac{a}{2})$:

$$
\begin{aligned}
AA^*(x) =& a^2 \frac{(e^{-ikx} + re^{ikx-i\phi})(e^{ikx} + re^{-ikx+i\phi})}{(1-r^2\cos\phi)^2 + r^4\sin^2\phi} \\
=& a^2 \frac{1 + re^{-2ikx+i\phi} + re^{2ikx-i\phi} + r^2}{1 + r^2 - 2r^2\cos\phi} \\
=& a^2 \frac{1 + 2r\cos(2kx-\phi) + r^2}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2(\phi/2)} \\
A^2 =& a^2 \frac{(1+r)^2 - 4r\sin^2(kx-\phi/2)}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2(\phi/2)}
\end{aligned}
$$

Le but maintenant est de satisfaire une condition de résonance. Or on sait que dans cette corde on aura des noeuds et des ventres.

- noeud si A^2 est min soit $\sin^2(kx-\phi/2) = 1$ soit $kx - \phi/2 = (2p+1)\frac{\pi}{2}$
- ventre si A^2 est max soit $\sin^2(kx-\phi/2) = 0$ soit $kx - \phi/2 = n\pi$

Comme c'est la résonance qui nous intéresse, on se place au niveau d'un ventre :

$$
A_{ventre}^2 = a^2 \frac{(1-r)^2}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2(\phi/2)}
$$

Donc il y a résonance si $\sin^2(\phi/2) = 0$ soit $\phi/2 = n\pi$ et comme $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ alors $\lambda_n = \frac{2L}{n}$. On a donc résonance pour des λ espacés régulièrement.

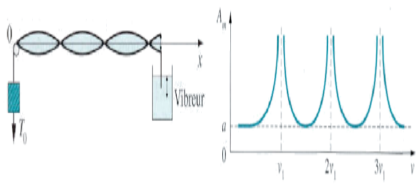
On va la aussi pouvoir définir un facteur de qualité tel que $Q = \frac{f}{\Delta f}$, avec f la fréquence du système excitateur et Δf l'acuité. Dans le cas de la corde de Melde cela donne :

$$
Q = \frac{n\pi r}{1-r^2}
$$

On peut en tirer les conclusions que Q est d'autant plus grand que:

- r^2 est voisin de 1
- que n est élevé, c'est-à-dire que la corde est longue par rapport à λ car à la résonance, $\lambda_n = \frac{2L}{n}$

On a ainsi montré que plus il y avait de degrés de liberté et plus il y avait de mode propre pouvant entrer en résonance. Pour un bon facteur de qualité, on aura des pics étroits, centré sur chacune des fréquence de résonance.



En faisant tendre le nombre de degrés de liberté vers l'infini, on observe que l'on prévoit un nombre infinie de résonance. Bien sûr ceci n'arrive pas en vrai et il y a des limites physique qui font qu'on ne pourra pas voir un nombre infini de mode.

En fait ce que l'on a mis au jour ici c'est un mode de cavité.

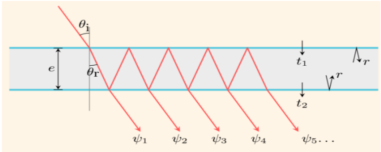


Figure 1: fento physique

2.2 La cavité de Fabry-perrot

On peut parler également du fabry perrot qui est un autre cas de cavité mais avec des ondes lumineuse cette fois-ci. On peut ramener le Fabry-Pérot à deux miroirs parallèles l'un à l'autre de transmission t et de réflexion r. Le principe est le même, le forçage se fait par l'envoi d'une onde électromagnétique sur la cavité. L'onde va ensuite faire des aller-retour dans la cavité, et on obtient la même phénoménologie.

Malgré une nature d'onde différente, on a une parfaite analogie entre ces deux types de cavité.

Corde de Melde	Cavité Fabry Pérot
Excitation du Pot vibrant f	Rayonnement incident f
Amplitude A	Champ électrique E
Réflexion au bord $R = r^2$	Réflexion aux miroirs $R = r^2$
Longueur de la corde L	épaisseur de la cavité e
$\phi = 2kL$	$\phi = 2kne\cos(i)$
Mode n	Ordre d'interférence p

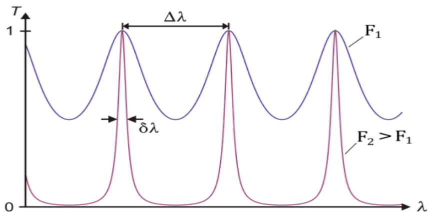
On donne le lien entre le coefficient de réflexion/transmission en amplitude et en énergie tel que : $R = r^2$ et $T = tt'$. On distingue t et t' car le passage air-cavité et cavité air est diffèrent

Pour le fabry perrot on a donc une transmittance, en prenant le coefficient de réflexion en puissance : $r^2 = R$:

$$T = \frac{A_t}{A_i} = \frac{1}{1 + M\sin^2(\phi/2)}$$

avec $M = \frac{4R}{1-R^2}$

Plutôt que le facteur de qualité, pour une cavité résonnante on définit la finesse $F = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}$, qui est le rapport de l'écart entre deux pics et la largeur à mi-hauteur de ces pics.



$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{M}}{2} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

OdG : Pour R = 0.8, F = 14, et pour R = 0.99, F = 313. Une faible augmentation de R permet ainsi un fort gain en finesse.

En sortie, on obtient seulement les pulsations résonantes de la cavité.

S'il y a le temps
Expérience du fabry pérot pour trouver le facteur de qualité du laser. (On peut mesurer l'écart en fréquence de deux mode mais aussi le facteur de qualité)

On notera que la finesse des meilleures cavités Fabry-Pérot est actuellement de l'ordre de 100000.

On va voir maintenant que ces phénomènes de résonance existe aussi au niveau microscopique.

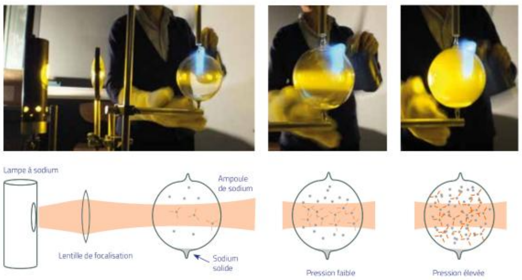
3 Résonance optique

3.1 Observation expérimental

En 1905 Wood à observée un phénomène de résonance optique avec des atomes de sodium.

L'idée est d'éclairer un ballon de verre avec un lampe à décharge de sodium, particulièrement monochromatique, vers 589,3nm. Dans le ballon se trouve de la vapeur de sodium. Pour cela, on a fait au préalable le vide dans le ballon qui contient un petit morceau de sodium qui a été chauffer avec un bec Bunsen pour créer la de vapeur suffisante. On fait alors les observations suivantes:

- Le faisceau de lumière émergeant du ballon après traversée de la vapeur est atténué, une partie de son intensité a été absorbée dans la vapeur
- La vapeur traversée par le faisceau incident devient elle-même source de lumière : elle émet dans toutes les directions de l'espace une lumière de même longueur d'onde, appelée lumière de fluorescence ou, plus précisément, lumière de résonance.



Le phénomène de résonance optique peut se définir comme un cas particulier du phénomène de fluorescence où la lumière émise par le corps a la même longueur d'onde que la lumière du faisceau primaire utilisé pour provoquer l'émission. Cette fluorescence sans changement de fréquence ne se produit que pour quelques fréquences très particulières, caractéristiques du type d'atome qui constitue la vapeur.

Remarques:

Le phénomène de résonance optique se distingue très nettement des phénomènes de diffusion, qui se produisent aussi sans changement de fréquence, par deux caractères essentiels:

- une intensité beaucoup plus forte
- une grande sélectivité en fréquence, et le fait que les fréquences appropriées soient caractéristiques du type d'atome utilisé.

La dénomination de «résonance» a été choisie par analogie avec tous les phénomènes d'oscillations, mécaniques et électriques, où l'amplitude des oscillations forcées (à une fréquence imposée de l'extérieur) croit très fortement, et passe par un maximum, lorsque la fréquence imposée devient égale à une fréquence propre, caractéristique du système étudié.

3.2 Modèle de l'électron élastiquement lié

On excite un atome avec un champs électromagnétique. Tout se passe comme si l'électron était élastiquement lié au noyau (supposé fixe). Le champs électrique incident est :

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kx)} \vec{u_z}$$

L'électron subit alors l'action de :

- du champ électrique car on néglige la composante magnétique de la force de Lorentz (car v/c«1) soit $-e\vec{E}$
- d'une force de rappel élastique : $-k\vec{r}$
- d'une force d'amortissement fluide : $-\alpha\dot{\vec{r}}$

L'application du principe fondamental de la dynamique nous donne :

$$m\ddot{\vec{r}} = -k\vec{r} - \alpha\dot{\vec{r}} - q\vec{E}$$

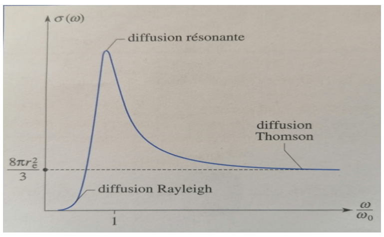
La réponse est, en régime sinusoïdal établi, en utilisant la notation complexe :

$$\vec{r} = \frac{-\frac{q}{m}}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\frac{\omega}{\tau}} \vec{E_0} e^{j\omega t}$$

avec $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ et $\tau = \frac{m}{\alpha}$
La puissance du rayonnement de diffusion est donnée par la formule de Larmor c'est a dire :

$$P = \frac{e^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \qquad avec \quad a = -\omega^2 |\vec{r}|$$

La puissance transféré est maximal pour lorsque la fréquence est proche de la fréquence de ω_0, c'est a dire l'une des fréquence du spectres électromagnétique de l'atome.



4 Conclusion

On a vu différents phénomènes de résonance en physique. La résonance ne peut intervenir plusieurs domaine et elle a des caractéristique tout a fait semblable. De quoi faut'il se souvenir ?

- On a vu en introduction que l'on peut définir la résonance comme un maximum d'amplitude de la réponse du système excité.
- Cette définition peut être complétée par la notion de transfert maximal d'énergie
- Une résonance est dictée par la compétition entre deux processus : La puissance fournie par le forçage, et les pertes par le système, que ce soit par dissipation ou transmission

- C'est le facteur de qualité qui caractérise cette competition. Plus il est grand, plus la résonance est grande et piqué.
- Un système contenant N degrés de liberté, contient N résonance.

Dans certain système on peut éviter la résonance comme sur les roue d'une voiture mais parfois on cherche à l'obtenir comme dans les laser.

Questions

- Pourquoi avoir placé la leçon en L2 ? $\rightarrow$ RLC vu en L1, cavités en L2.
- Quelles sont les difficultés de cette leçon ? $\rightarrow$
- Quels sont les points importants de la leçon, à retenir ? $\rightarrow$ Pulsation propre, facteur de qualité, résonance.
- C'est quoi la pulsation propre d'une balançoire ? $\rightarrow$ Celle d'un pendule. Où est-ce que tu transfères l'énergie dans le cas de la balançoire ? $\rightarrow$ Quand la balançoire arrive au max de l'amplitude. Est-ce que l'excitation est sinusoïdale ?
- C'est quoi une résonance paramétrique ? Quels sont les paramètres dans le cas de la balançoire ? $\rightarrow$ La longueur des cordes.
- C'est quoi un degré de liberté ? Est-ce que le RLC n'a qu'un seul degré de liberté ? Quelle est la dimension de l'espace des phases ? Quel est l'espace des phases pour un oscillateur harmonique ? $\rightarrow$
- Forme canonique du RLC : pourquoi tu as écrit le terme de forçage à gauche ?
- Est-ce que tu peux réécrire la forme canonique de l'équation du RLC ? C'est quoi la pulsation propre, quelle est sa signification physique ? Qu'est-ce qu'il se passe si on excite l'oscillateur avec un bruit blanc ? $\rightarrow$ Le bruit est amplifié à la pulsation de résonance du système : on a un filtre.
- C'est quoi comme type de filtre un RLC ? $\rightarrow$ Passe-bande d'ordre 2. Comment on voit ce comportement d'après le circuit électrique ? $\rightarrow$ Cf les impédances qui dépendent de la fréquence.
- Est-ce que l'analogie élec/méca est toujours valable ? Est-ce que certains paramètres ne sont pas transposables ? $\rightarrow$ Voir la thèse de Clotilde Dequidt `https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01264228v2/document` : signe d'une charge électrique, champ EM.
- Résonance en tension : est-ce que les élèves en vu l'espace de Fourier en L2 ? Quelle différence entre espace de Fourier et notation complexe ? Pourquoi c'est possible de passer dans l'espace de Fourier ? Pourquoi on définit des fonctions de transfert ? $\rightarrow$ Les équations sont linéaires.
- Quel est l'intérêt d'introduire une pulsation réduite ? $\rightarrow$ Utiliser une grandeur adimensionnée.
- Est-ce que tu as cherché à montrer si l'extrémum du dénominateur de la fonction de transfert est un minimum ?
- Est-ce que tu peux revenir sur l'interprétation du facteur de qualité en terme de mesure de la dissipation ? Est-ce que le fait d'avoir une résonance piquée traduit une faible dissipation dans le système ? $\rightarrow$ Il faut faire attention à comparer la durée pendant laquelle l'onde résonne avec la période de l'onde.
- Bilan de puissance du RLC : pourquoi tu dis qu'il y a un transfert maximal d'énergie à la résonance ? $\rightarrow$ A la résonance, on arrive à communiquer plus d'énergie au système (elle est d'ailleurs dissipée par effet Joule). Pourquoi le générateur parvient à communiquer plus de puissance à la résonance ? Tu connais l'adaptation d'impédance ? $\rightarrow$ Le générateur délivre une puissance plus importante parce qu'on adapte l'impédance du système à celle du générateur.
- Corde de Melde : c'est quoi un mode propre ? D'où vient la quantification des modes propres pour la corde de Melde ? $\rightarrow$ On impose des conditions aux limites qui déterminent les modes.
- Est-ce qu'il y a des modes propres si la corde n'est pas attachée au bout ? Différence entre modes propres d'une corde attachée et d'une corde libre ? $\rightarrow$ Il y en a, mais la condition à la limite est changée : l'amplitude n'est plus forcée à zéro quand la corde n'est plus fixée.
- Dans quel cas il n'y a plus de réflexion au bout de la corde ? $\rightarrow$ Il faut adapter l'impédance en fin de corde en fixant une autre corde au bout.
- Différence somme, suite, série ? $\rightarrow$ Somme = addition de termes d'une suite, série : suite des sommes.

- Est-ce que tu es sûre que la série du II.A converge ? → Module de la suite inférieur à 1.
- Est-ce qu'il y a en théorie plus de modes quand la corde est plus longue ? → Non.
- Expérimentalement (dans une corde réelle), qu'est-ce qui limite le fait qu'on n'observe pas un mode d'indice infini ? → Dissipation d'énergie par échauffement interne de la corde, par frottements fluide qui affectent davantage les modes de fréquence élevée (vibrent plus souvent).
- Il y a une différence entre cavité de Fabry-Perot et corde de Melde ? → Inconnu.
- Comment on fait un miroir ? Est-ce que c'est facile d'augmenter le cœfficient de réflexion ? → Construire un miroir : voir Houard, chapitre sur les télescopes.
- Expérience de Wood : comment mettre le résultat en avant ? → Photodiode derrière.
- Comment mettre en avant la réémission ? → Atomes pas dans le faisceau qui émettent quand même : on voit du jaune en-dehors de l'image géométrique et de diffraction.
- Qu'est-ce que la fluorescence ? → Emission d'un photon après excitation. Voir le sujet B 2005 par exemple.
- Qu'est-ce qu'on observerait si on éclairait l'ampoule à sodium avec une lumière blanche ? → Des raies d'absorption aux fréquences de résonance.
- D'où vient la force de rappel élastique ? Elle est de quel type ? → Force coulombienne.
- D'où vient la force de frottement fluide ? Que représente cette force en vrai ? Pourquoi on appelle cette force une force d'amortissement fluide ? Est-ce qu'une force d'amortissement est toujours en $\alpha\dot{r}$ dans les fluides ? → Le rayonnement. Comme pour un frottement à faible Reynolds.
- D'où vient la formule de Larmor ? → Dipôle de Hertz, rayonnement sur une sphère.

Remarques

- Timing : 40 minutes.
- Leçon : bien mais un peu longue et manque de rigueur.
- Pulsation propre : à laquelle oscille le système libre. Mode propre : vient des CL imposées, sinon il n'y en a pas.
- Système linéaire invariant temporel permet de passer dans l'espace de Fourier.
- Modèle de l'électron élastiquement lié : ajouter un schéma. Insister sur le fait qu'il s'agit d'un modèle simple. S'attendre à des questions de méca Q. Pas d'interprétation physique des différents termes durant la leçon.
- La nature du filtre RLC dépend d'où on se place. Tous les systèmes résonants sont des filtres.
- Wood : un peu comme un laser mais pas d'émission stimulée. La lumière est absorbée et réémise en boucle aux fréquences de résonance (ici dans le jaune).
- Un système possède des caractéristiques intrinsèques (propres) lorsqu'il est libre : c'est comme un oscillateur. Puis on force ces oscillateurs pour la résonance. Tout marche de la même façon parce qu'on a affaire à des oscillateurs.
- Définir la résonance le plus tôt possible : en intro ou sur le premier exemple comme dans cette leçon.
- Attention si on prend en compte un cœff de réflexion, on sous-entend qu'il y en a un de transmission par conservation de l'énergie.
- Résonance en amplitude et en énergie : le max est atteint à des pulsations différentes ! ω_0 pour l'énergie, ω_r pour la résonance dans le cas du RLC.