CHAPITRE 17

Oscillateurs en régime sinusoïdal forcé

Dans les circuits électriques que nous avons étudiés, le générateur délivrait toujours une tension ou une intensité continue.

Ce cas est certes courant, mais pas universel. Les circuits sont souvent soumis à des tensions modélisables par un signal sinusoïdal :

▷ les appareils qu'on connecte au secteur sont soumis à une tension sinusoïdale (de fréquence $f = 50$ Hz) ;

▷ en travaux pratiques, on peut régler le GBF pour qu'il délivrer un signal sinusoïdal ;

▷ les appareils ayant à capter des ondes électromagnétiques (téléphones, radios, etc.) doivent traiter des signaux périodiques. On peut les décomposer en signaux sinusoïdaux par analyse de Fourier.

L'expérience montre qu'un circuit électrique soumis depuis un certain temps à une tension ou une intensité sinusoïdale est en **régime sinusoïdal forcé** : ses grandeurs électriques oscillent sinusoïdalement à la même fréquence que celle imposée par le générateur, mais avec une **amplitude** différente et un potentiel **déphasage** par rapport au signal délivré par ce dernier.

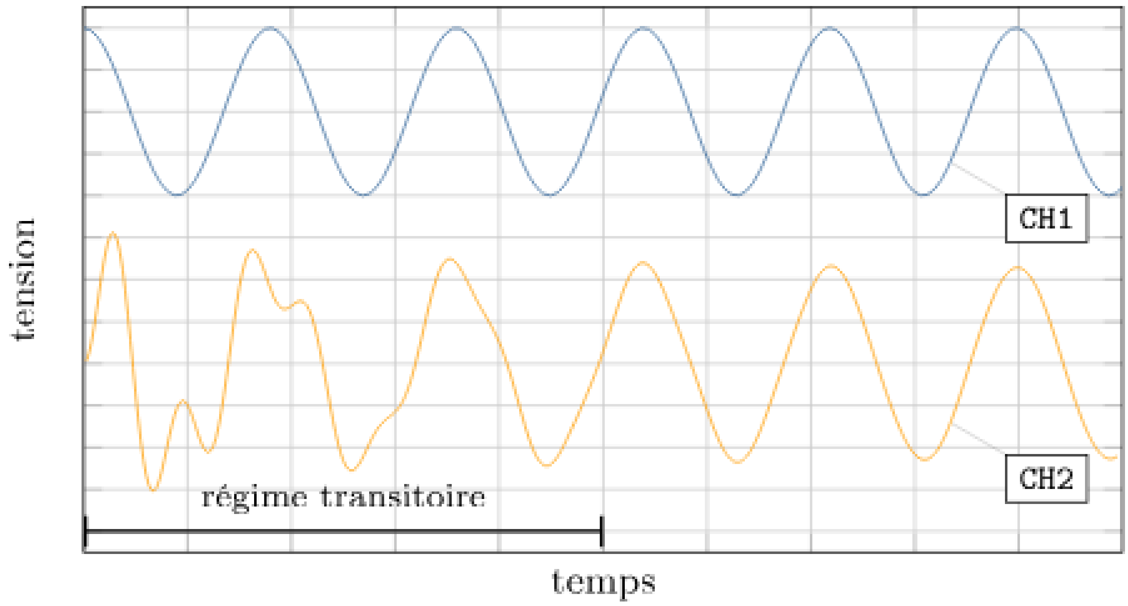


FIGURE 1 – Observation sur l'écran d'un oscilloscope de la tension sinusoïdale délivrée par un GBF (CH1) et d'une autre tension dans le circuit (CH2)

Ce phénomène se retrouve, par analogie, dans les systèmes mécaniques.

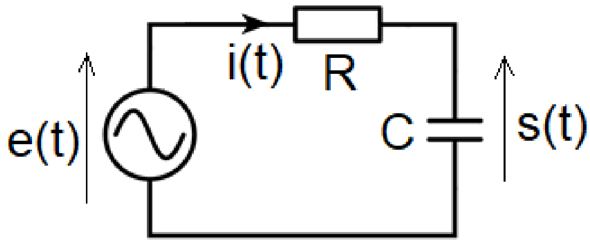
Si un **oscillateur** est soumis à une excitation sinusoïdale, on peut sous certaines conditions observer le phénomène de **résonance** : l'amplitude du signal en sortie de l'oscillateur est maximale pour une fréquence d'excitation particulière, appelée fréquence de résonance, et diminue rapidement lorsqu'on s'en éloigne. La problématique de la résonance est cruciale dans les domaines de l'automobile et du bâtiment notamment, où elle doit être évitée.

1 Régime sinusoïdal forcé

Dans un premier temps, nous introduisons les concepts utiles pour aborder l'étude du régime sinusoïdal forcé.

1.1 Intérêt de la notation complexe

Exercice d'application 1 :



Dans le circuit schématisé ci-dessus, le générateur de signaux basse fréquence (GBF) délivre une tension sinusoïdale de la forme $e(t) = \mathrm{E}\cos(\omega t)$, où E est une constante appelée amplitude et $\omega = 2\pi f$ la pulsation, qu'on règle indirectement en modifiant la fréquence f.

On note $s(t)$ la tension aux bornes du condensateur, qui joue le rôle de **signal de sortie**, $e(t)$ étant le **signal d'entrée** du circuit RC.

On cherche à établir l'expression mathématique de $s(t)$ en régime sinusoïdal forcé.

1. En appliquant la loi des mailles, montrer que la tension de sortie $s(t)$ est régie par l'équation différentielle :

$$\frac{ds}{dt} + \frac{s}{\mathrm{RC}} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{RC}}\cos(\omega t).$$

La solution $s(t)$ de cette équation différentielle est la somme de deux termes :

▹ la solution de l'équation différentielle homogène associée, qu'on notera $s_h(t)$;

▹ une solution particulière de l'équation différentielle, qu'on notera $s_p(t)$.

2. Déterminer $s_h(t)$ et justifier qu'elle devient quasiment nulle au bout d'un temps qu'on exprimera en fonction des paramètres du problème.

On cherche à présent une solution particulière de l'équation différentielle, de la forme $s_p(t) = \mathrm{S}\cos(\omega t+\phi)$, où S représente l'amplitude du signal et ϕ la phase à l'origine du signal de sortie, qui est aussi le déphasage du signal de sortie s par rapport au signal d'entrée e.

3. Injecter la forme cherchée dans l'équation différentielle, puis utiliser les formules de trigonométrie

$$\sin(a+b) = \sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b)$$

et

$$\cos(a+b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)$$

pour aboutir à un système de deux équations :
$$\begin{cases} S\omega\cos(\phi) + \frac{S}{RC}\sin(\phi) = 0 \\ -S\omega\sin(\phi) + \frac{S}{RC}\cos(\phi) = \frac{E}{RC}. \end{cases}$$

Dans ce qui suit, on pose $\omega_0 = \frac{1}{RC}$.

4. Montrer que

$$\phi = -\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right).$$

5. Montrer que

$$S = \frac{E}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}.$$

Pour ce faire, on élevera les deux équations du système au carré avant de les combiner astucieusement.

6. Écrire alors explicitement l'expression du signal $s(t)$ en régime sinusoïdal forcé. Commenter.

Les calculs ci-dessus sont fastidieux, alors qu'on a considéré un circuit simple. On devine qu'ils deviendraient encore plus pénibles pour des circuits plus complexes.

Une astuce de calcul, que nous utiliserons systématiquement désormais, permet de limiter les difficultés calculatoires : l'utilisation de la **notation complexe**.

On introduit des **signaux complexes** $\underline{e}$ et $\underline{s}$ définis par :

$$\underline{e}(t) = Ee^{j\omega t}$$

et

$$\underline{s}(t) = Se^{j(\omega t+\phi)},$$

associés aux signaux réels $e(t)$ et $s(t)$ respectivement. On a décidé de noter j l'unité imaginaire pure telle que $j^2 = -1$, au lieu de i, afin de ne pas risquer de la confondre avec le symbole de l'intensité d'un courant électrique.

Le lien entre le signal réel et son signal complexe associé est le suivant : on retrouve le signal réel en calculant la **partie réelle** du signal complexe associé, soit $s(t) = \mathrm{Re}(\underline{s}(t))$ et $e(t) = \mathrm{Re}(\underline{e}(t))$.

On considère l'équation différentielle associée :

$$\frac{d\underline{s}}{dt} + \frac{1}{RC}\underline{s} = \frac{1}{RC}\underline{e}.$$

Si les signaux complexes sont solution de cette équation, alors les signaux réels sont solution de l'équation différentielle réelle associée.

Le principe de la notation complexe pour résoudre une équation différentielle est le suivant :

▷ À chaque grandeur sinusoïdale on associe une grandeur complexe sous forme exponentielle, dont la partie réelle est la grandeur de départ.

▹ On résout l'équation différentielle pour les signaux complexes, en se servant du fait qu'une dérivation revient à une multiplication par $j\omega$: cela facilite grandement l'analyse car on transforme ainsi l'équation différentielle en une équation polynomiale.

▹ Le **module** de la grandeur complexe est égal à l'**amplitude** du signal réel, l'**argument** de la grandeur complexe est la **phase à l'origine** du signal réel :

$$|\underline{s}| = \sqrt{\underline{s}\underline{s}^*} = \mathrm{S},$$
$$\arg(s) = \phi,$$

où $\underline{s}^*$ désigne le **complexe conjugué** de $\underline{s}$: si $\underline{s} = a + jb$, alors $\underline{s}^* = a - jb$.

Exercice d'application 2 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.

Retrouver les résultats des questions 4 et 5 de l'exercice 1 en utilisant la notation complexe. Commenter.

1.2 Impédance complexe d'un dipôle

Non seulement la notation complexe permet de trouver très rapidement une solution particulière d'une équation différentielle avec second membre sinusoïdal, mais elle permet aussi de simplifier les circuits électriques en régime sinusoïdal forcé.

Pour rappel, dans le cours d'électrocinétique nous avons vu qu'une association en série ou en parallèle de résistances pouvait être remplacée par une résistance équivalente, ce qui permettait de simplifier les schémas des circuits. On aurait pu procéder de même avec les condensateurs et les bobines en s'appuyant sur leurs lois de comportement.

Ici, nous traiterons ces trois types de dipôles avec un formalisme commun, celui de l'**impédance complexe**, ce qui généralisera les résultats. On adopte la convention récepteur pour les dipôles.

On décide de noter

$$u(t) = \mathrm{U}\cos(\omega t + \phi_u)$$

la tension aux bornes du dipôle étudié (résistance, bobine ou condensateur) en convention récepteur et en régime sinusoïdal forcé, ce qui devient en notation complexe :

$$\underline{u} = \mathrm{U}e^{j\phi_u}e^{j\omega t}.$$

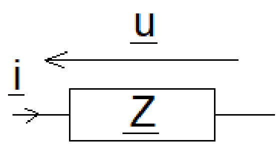
De même, on note

$$i(t) = \mathrm{I}\cos(\omega t + \phi_i)$$

l'intensité du courant traversant le dipôle, ce qui donne

$$\underline{i} = \mathrm{I}e^{j\phi_i}e^{j\omega t}$$

en notation complexe.



On appelle **impédance complexe** d'un dipôle le coefficient de proportionnalité, noté $\underline{Z}$, entre $\underline{u}$ et $\underline{i}$:

$$\underline{u} = \underline{Z} \times \underline{i}.$$

L'impédance complexe d'un dipôle, et plus particulièrement son module $Z = |\underline{Z}|$ appelé **impédance**, généralise la notion de résistance en régime sinusoïdal forcé.

Exercice d'application 3 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Établir l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.

1. En vous appuyant sur la loi d'Ohm, montrer que l'impédance complexe d'un dipôle ohmique de résistance R vaut

$$\underline{Z}_R = R.$$

2. En vous appuyant sur la relation constitutive d'un condensateur idéal de capacité C, montrer que son impédance complexe vaut

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}.$$

En déduire un dipôle équivalent au condensateur, à basse puis à haute fréquence.

3. En vous appuyant sur la relation constitutive d'une bobine idéale d'inductance L, montrer que son impédance complexe vaut

$$\underline{Z}_L = jL\omega.$$

En déduire un dipôle équivalent à la bobine, à basse puis à haute fréquence.

Exercice d'application 4 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.

1. a. En appliquant la loi d'additivité des tensions, montrer que deux impédances $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$ en série peuvent être remplacées par une impédance équivalente

$$\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2.$$

b. En déduire le résultat équivalent en notation réelle pour une association en série de deux résistances, puis de deux condensateurs, puis de deux bobines.

2. a.En appliquant la loi des nœuds, montrer que deux impédances $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$ en parallèle peuvent être remplacées par une impédance équivalente $\underline{Z}_{eq}$ telle que

$$\frac{1}{\underline{Z}_{eq}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2},$$

b. Exprimer alors $\underline{Z}_{eq}$ en fonction de $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$. c. En déduire le résultat équivalent en notation réelle pour une association en parallèle de deux résistances, puis de deux condensateurs, puis de deux bobines.

On peut approfondir encore l'analogie entre les notions d'impédance complexe et de résistance en définissant l'**admittance complexe** d'un dipôle, notée $\underline{Y}$, comme l'inverse de l'impédance :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}},$$

qui est l'analogue de la conductance

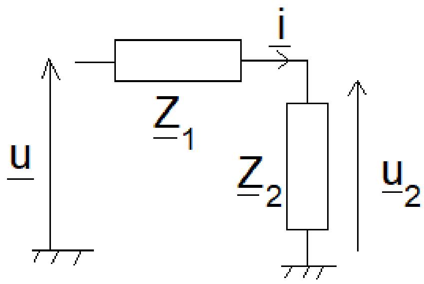
$$G = \frac{1}{R}$$

d'un dipôle ohmique.

Dipôle	Résistance	Bobine	Condensateur
Schéma	R i u	L i u	C i u
Impédance complexe	$\underline{Z_R} = R$	$\underline{Z_L} = Lj\omega$	$\underline{Z_C} = \frac{1}{Cj\omega}$
Impédance	$Z_R = R$	$Z_L = L\omega$	$Z_C = \frac{1}{C\omega}$
Admittance complexe	$\underline{Y_R} = \frac{1}{R}$	$\underline{Y_L} = \frac{1}{Lj\omega}$	$\underline{Y_C} = Cj\omega$
$\omega \longrightarrow 0$	$Z_R \to R$	$Z_L \to 0$ L i u $\Leftrightarrow$ L i $u = 0$	$Z_C \to \infty$ C i u $\Leftrightarrow$ C $i = 0$ u
$\omega \longrightarrow \infty$	$Z_R \to R$	$Z_L \to \infty$ L i u $\Leftrightarrow$ L $i = 0$ u	$Z_C \to 0$ C i u $\Leftrightarrow$ C i $u = 0$

FIGURE 2 – Tableau récapitulatif

Enfin, on retrouve en régime sinusoïdal forcé avec les impédances complexes le résultat établi en régime quelconque pour une **structure de pont diviseur de tension**.



Avec les notations du schéma ci-dessus,

$$\underline{u}_2 = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}\underline{u}.$$

2 Phénomène de résonance

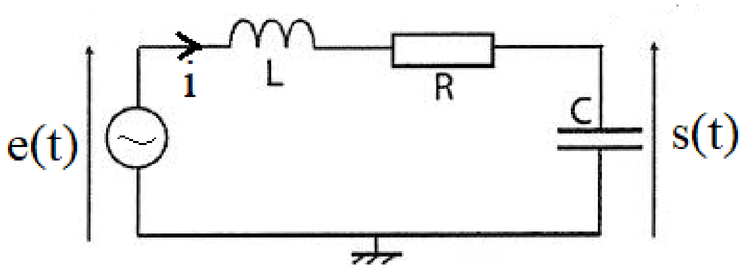
En régime sinusoïdal forcé, la réponse d'un circuit du premier ordre à une excitation sinusoïdale est, elle aussi, une excitation sinusoïdale, de même fréquence mais déphasée et d'amplitude différente.

Ce résultat se généralise aux systèmes du deuxième ordre, ce qui sera l'objet de cette section. Nous verrons aussi qu'un phénomène émerge quand un oscillateur du deuxième ordre est en régime sinusoïdal forcé : la **résonance**.

2.1 Circuit RLC en régime sinusoïdal forcé

On étudie un circuit RLC série, alimenté par un générateur délivrant une tension $e(t) = \mathrm{E}\cos(\omega t)$.

Nous nous intéressons à l'intensité i du courant qui circule dans l'unique maille du circuit, et à la tension $s(t)$ aux bornes du condensateur en sortie du circuit.



Exercice d'application 5 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.

1. Montrer que la tension $s(t)$ vérifie l'équation différentielle :

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{L}}\frac{ds}{dt} + \frac{1}{\mathrm{LC}}s = \frac{1}{\mathrm{LC}}e.$$

2. Montrer que l'intensité i(t) vérifie l'équation différentielle :

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = \frac{1}{L}\frac{de}{dt}.$$

3. En déduire que dans les deux cas la pulsation propre ω_0 et le facteur de qualité Q ont la même expression, que vous donnerez en fonction de R, L et C.

2.1.1 Résonance en intensité

Afin d'alléger l'écriture, dans ce qui suit nous poserons une pulsation réduite $x = \frac{\omega}{\omega_0}$, de sorte que $x = 1$ signifie que la pulsation du générateur basse fréquence est égale à la pulsation propre du circuit RLC.

En régime sinusoïdal forcé, l'évolution temporelle de l'intensité est de la forme

$$i(t) = I\cos(\omega t + \phi_i),$$

avec ϕ_i le déphasage de l'intensité par rapport à la tension délivrée par le générateur. On rappelle que I et ϕ_i sont des fonctions de la variable ω.

Exercice d'application 6 :

1. Expliquer comment modifier le montage pour observer $i(t)$.
2. En utilisant la notation complexe et les résultats de l'exercice 5, montrer que

$$\underline{i} = \frac{\underline{e}}{R}\frac{1}{1 + jQ\left(x - \frac{1}{x}\right)}. \tag{1}$$

3. En déduire que

$$I = \frac{E}{R}\frac{1}{\sqrt{1 + Q^2\left(x - \frac{1}{x}\right)^2}}. \tag{2}$$

Analysons graphiquement ce résultat :

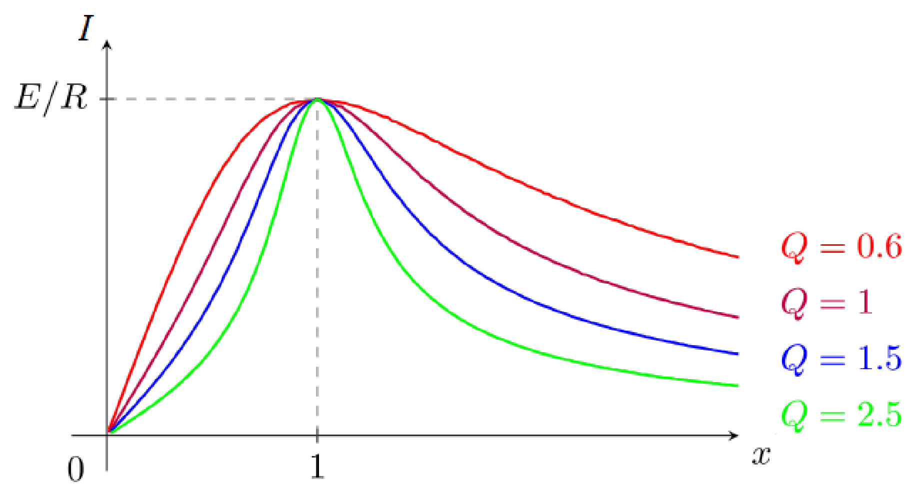


FIGURE 3 – Amplitude de l'intensité dans un circuit RLC série en régime sinusoïdal forcé, en fonction de la pulsation réduite $x = \frac{\omega}{\omega_0}$, pour différents facteurs de qualité Q

▹ L'amplitude de l'intensité est maximale lorsque la pulsation du signal délivré par le GBF prend une valeur particulière appelée **pulsation de résonance**, que nous noterons ω_r. Ici, elle s'avère être égale à la pulsation propre du circuit RLC : $\omega_r = \omega_0$.

▹ Si on s'éloigne de cette pulsation, la réponse s'atténue d'autant plus vite que le facteur de qualité prend une valeur élevée.

Cette réponse très marquée d'un système au voisinage d'une fréquence particulière qui lui est propre est très commune en physique : c'est le **phénomène de résonance**. Le circuit RLC série est le siège d'un phénomène de **résonance en intensité**, et ce, quelle que soit la valeur du facteur de qualité.

La finesse du pic est quantifiée par l'**acuité de la résonance**. Si le facteur de qualité Q est élevé, le pic est fin et la résonance est aigüe, si Q est faible le pic est large, et on dit alors que la résonance est floue.

Pour rendre ce résultat quantitatif, on définit les **pulsations de coupure** : pour un facteur de qualité fixé, ce sont celles pour lesquelles l'amplitude de la grandeur d'intérêt (ici l'intensité) ne vaut plus que $1/\sqrt{2}$ fois la valeur atteinte à la pulsation de résonance. Mathématiquement, pour une résonance en intensité cela se traduit par :

$$i(\omega_c) = \frac{i(\omega_r)}{\sqrt{2}}.$$

Remarque : ce facteur $1/\sqrt{2}$ est motivé par le fait que l'énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude pour un signal sinusoïdal, une pulsation de coupure correspond donc à une énergie égale à la moitié de sa valeur maximale.

L'**acuité de la résonance** désigne alors la grandeur

$$\frac{\omega_r}{\Delta\omega_c} = \frac{\omega_r}{\omega_{c,2} - \omega_{c,1}}.$$

Exercice d'application 7 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité.

1. En vous appuyant sur l'équation (2), montrer qu'il existe deux pulsations de coupure $\omega_{c,1}$ et $\omega_{c,2} > \omega_{c,1}$, qui sont chacune racine d'une équation polynomiale du deuxième ordre.
2. Montrer que l'acuité de la résonance vérifie

$$\frac{\omega_r}{\Delta\omega_c} = \frac{\omega_r}{\omega_{c,2} - \omega_{c,1}} = Q.$$

Cette propriété, qu'il faut retenir, s'avère utile pour déterminer graphiquement la valeur du facteur de qualité d'un circuit RLC siège du phénomène de résonance en intensité.

Exercice d'application 8 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.

En utilisant l'équation (1), montrer que le déphasage de l'intensité par rapport à la tension du générateur vérifie

$$\phi_i = -\arctan\left(Q\left(x - \frac{1}{x}\right)\right),$$

où $\arctan$ désigne la fonction arctangente.

Analysons cette propriété graphiquement :

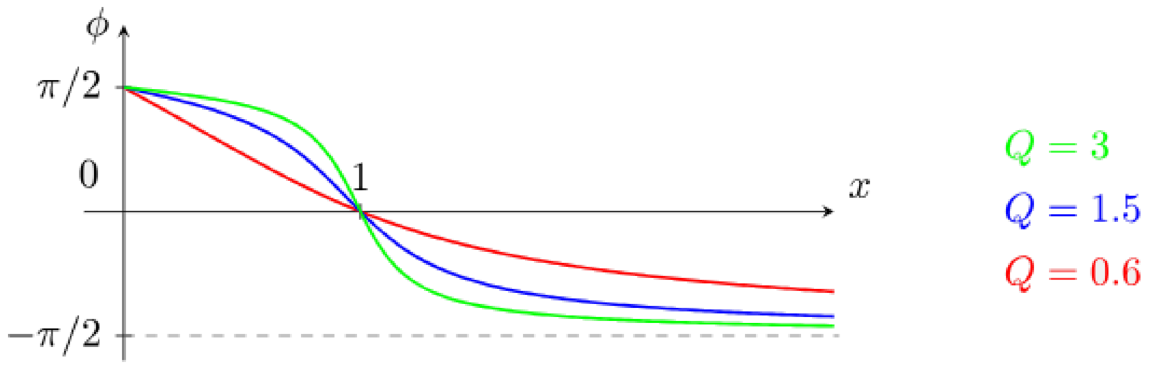


FIGURE 4 – Déphasage de l'intensité dans un circuit RLC série par rapport à la tension du générateur en régime sinusoïdal forcé, en fonction de la pulsation réduite, pour différents facteurs de qualité

On constate que le déphasage de l'intensité par rapport à la tension d'entrée s'annule à la résonance, quelle que soit la valeur du facteur de qualité. Cette propriété peut s'avérer utile pour déterminer expérimentalement la pulsation de résonance.

2.1.2 Résonance en tension

On s'intéresse à présent à la tension $s(t)$ aux bornes du condensateur en régime sinusoïdal forcé. On la note $s(t) = S\cos(\omega t + \phi_s)$, où ϕ_s est le déphasage de la tension aux bornes du condensateur par rapport à celle aux bornes du générateur.

Exercice d'application 9 :

1. En utilisant la notation complexe et un résultat de l'exercice 5, montrer que

$$\underline{s} = \frac{E}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}}.$$

et en déduire que

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

2. En déduire que le circuit RLC série n'admet une résonance en tension que si $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$, et que dans ce cas $\omega_r = \omega_0\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$. On raisonnera sur le dénominateur de $S(x)$.

▹ On retiendra que la résonance en tension aux bornes du condensateur dans un circuit RLC n'est possible que si $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$, et que dans ce cas $\omega_r = \omega_0\sqrt{1-\frac{1}{2Q^2}}$.

Analysons graphiquement la résonance en tension dans le circuit RLC :

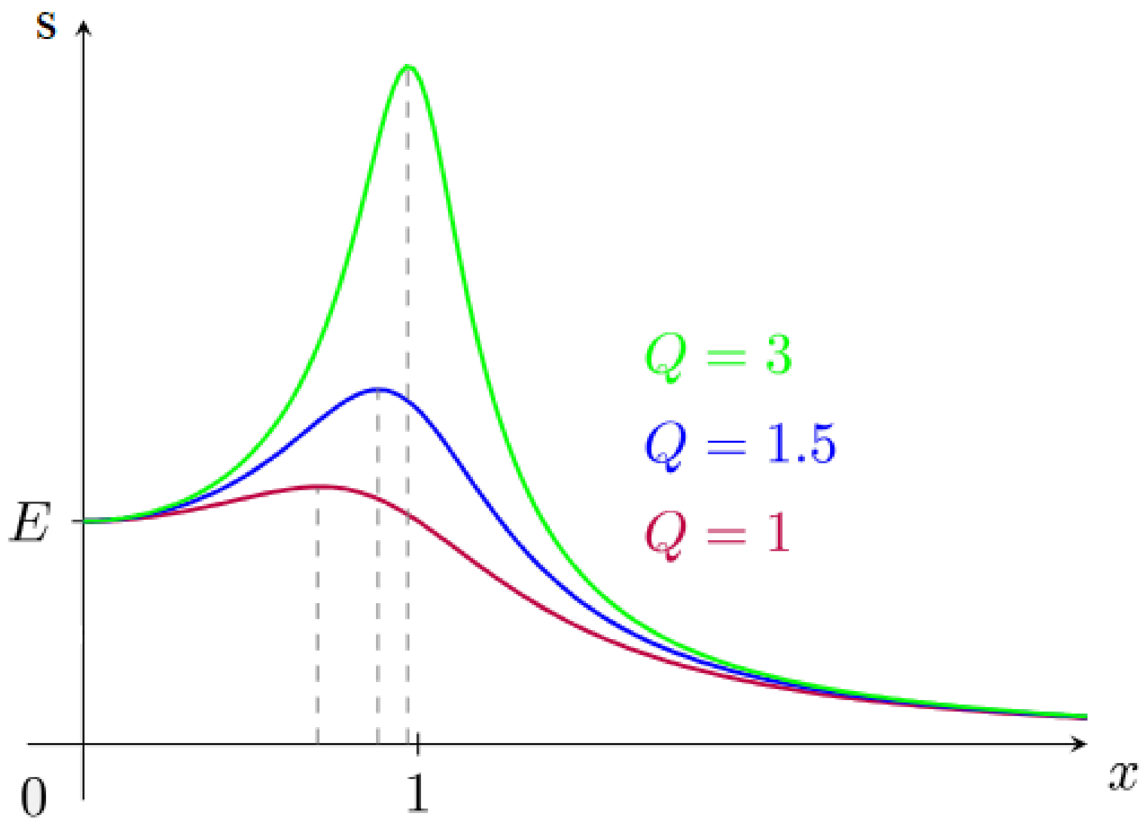


FIGURE 5 – Amplitude de la tension aux bornes du condensateur en régime sinusoïdal forcé en fonction de la pulsation réduite du signal délivré par le GBF, pour différents facteurs de qualité

On peut faire les remarques suivantes :

▹ L'amplitude de la tension est maximale lorsque la pulsation du signal délivré par le GBF prend une valeur ω_r particulière, qui s'avère être proche, mais différente, de la pulsation propre du circuit RLC : $\omega_r \neq \omega_0$. Plus précisément, on a montré plus haut que $\omega_r = \omega_0\sqrt{1-\frac{1}{2Q^2}}$.

▹ Si on s'éloigne de cette pulsation, la réponse s'atténue d'autant plus vite que le facteur de qualité prend une valeur élevée.

▹ Si le facteur de qualité vérifie $Q > 1$, alors l'amplitude du signal de sortie est plus grande que celle de l'excitation ! On est dans le cas où le phénomène de résonance est le plus spectaculaire. Il est d'autant plus marqué que le facteur de qualité est élevé. On peut montrer, à facteur de qualité fixé, que

$$S_{max} = \frac{2Q^2E}{\sqrt{4Q^2-1}},$$

qui devient dans le cas d'un facteur de qualité élevé :

$$S_{max} \simeq QE,$$

ce qui permet d'estimer facilement le facteur de qualité à partir d'une représentation graphique.

Pour le déphsasage, la dérivation est un peu plus compliquée.

$$\phi_s = -\arg\left(1 - x^2 + j\frac{x}{Q}\right),$$

mais comme le nombre complexe dont on cherche l'argument a une partie réelle susceptible de changer de signe, on ne peut pas directement appliquer la fonction arctangente.

Néanmoins, on peut réécrire astucieusement :

$$\phi_s = -\arg\left(j\left(\frac{x}{Q} - j(1-x^2)\right)\right) = -\arg(j) - \arg\left(\left(\frac{x}{Q} - j(1-x^2)\right)\right) = -\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{1-x^2}{\frac{x}{Q}}\right)$$

Analysons graphiquement ce résultat :

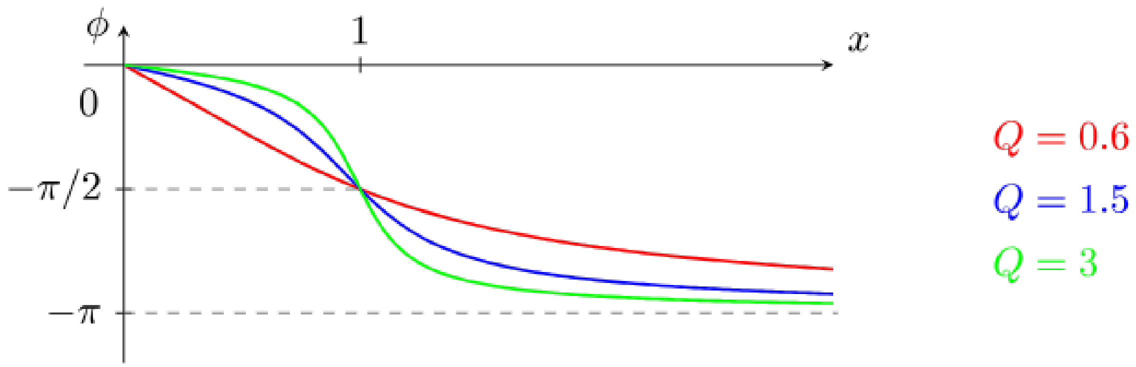


FIGURE 6 – Déphasage de la tension aux bornes du condensateur par rapport à celle du générateur en régime sinusoïdal forcé en fonction de la pulsation réduite, pour différents facteurs de qualité

Quel que soit la valeur du facteur de qualité $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$, la résonance en tension aux bornes du condensateur dans un circuit RLC série se traduit par un déphasage entre la tension de sortie aux bornes du condensateur et la tension d'entrée aux bornes du générateur qui vaut $-\pi/2$.

2.2 Résonance en mécanique

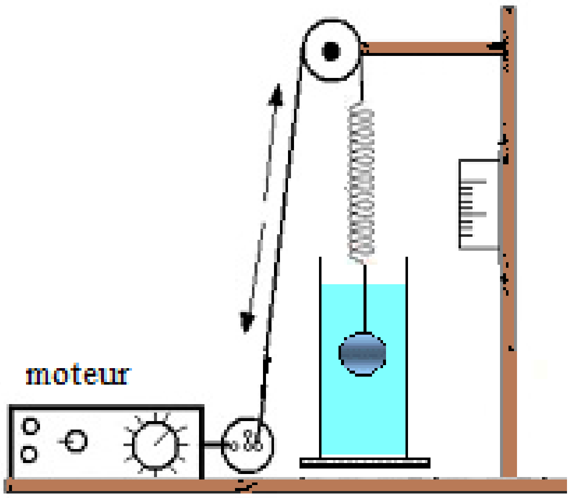
Du fait de l'analogie entre électricité et mécanique mise en évidence dans le cas des oscillateurs libres, on s'attend à pouvoir observer le phénomène de résonance en mécanique également, sous la forme d'une **résonance en élongation** qui correspondrait à une **résonance en tension** et une **résonance en vitesse** qui correspondrait à une **résonance en intensité**.

Les systèmes du deuxième ordre concernés peuvent être modélisés par une masse accrochée à un ressort en présence de frottements fluides linéaires, soumise à une excitation mécanique sinusoïdale.

Nous admettrons que les analogies mises en évidence en régime libre restent valides en régime sinusoïdal forcé, ce qui nous évitera de reprendre toute la démarche entreprise pour le circuit RLC. La suite du paragraphe est consacrée à des considérations qualitatives.

Réaliser l'étude de la résonance mécanique en classe n'est pas si aisé. Pour le régime libre, on accrochait une masse à un ressort, lui-même accroché à un bâti fixe. Ici, il faudrait que l'extrémité du ressort qui était accrochée au bâti soit excitée sinusoïdalement.

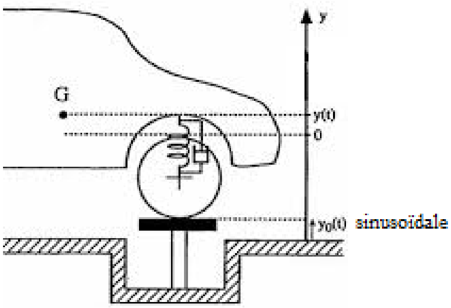
Un exemple d'un dispositif permettant de se placer dans ces conditions particulières est schématisé ci-dessous :



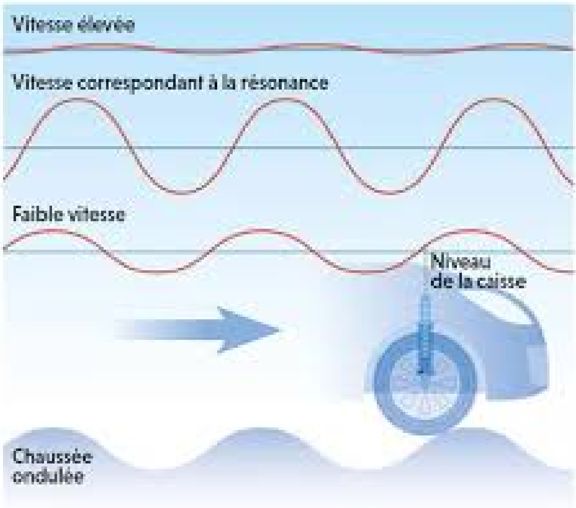
Grâce à un moteur et une poulie, on produit des oscillations sinusoïdales.

Voici le lien vers une animation qui modélise cette expérience :
https ://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Oscillateurs/ressort_rsf.php

Dans un laboratoire de sciences de l'ingénieur, on peut aussi rencontrer des dispositifs similaires à celui schématisé ci-dessous :



Le vérin qui fait osciller sinusoïdalement la plate-forme simule la situation où un véhicule roulerait sur un sol avec un profil sinusoïdal :



Dans ce cas assez improbable, pour éviter la résonance il faudrait soit rouler lentement, soit très vite lorsqu'on passe l'obstacle, ce qui est moins intuitif.

Comme toute fonction peut être décomposée en somme de fonctions sinusoïdales (par **série de Fourier** ou transformée de Fourier), c'est le cas notamment pour une excitation quelconque : on n'est donc jamais à l'abri du phénomène de résonance, qui peut s'avérer dangereux, non seulement pour les véhicules, mais pour les constructions. Les séismes ou le vent peuvent potentiellement provoquer une résonance et faire s'effondrer de grands ouvrages, si une des composantes sinusoïdales du signal possède la bonne fréquence et n'a pas une amplitude suffisamment faible.