PHYSIQUE

Oscillations forcées dans un circuit RLC en série

Introduction :

On a vu précédemment que le circuit RLC en série forme un oscillateur électrique amorti. Lorsqu'on ajoute, en série, un générateur électrique au circuit qui l'alimente d'une tension alternative sinusoïdale, c'est à dire qu'il impose un régime alternatif sinusoïdal à l'oscillateur ; on obtient un régime sinusoïdal forcé.

I. Généralités sur le régime alternatif sinusoïdale :

1) Tension et intensité du courant instantanées :

1-1/ Intensité du courant instantanée :

L'expression de l'intensité du courant alternatif sinusoïdal est :

$$i(t) = Im \times \cos(2\pi Nt + \varphi_i)$$

Im: l'intensité ou amplitude maximale (en A).
φ_i : la phase à l'origine des dates (en rad)
N : la fréquence du courant électrique en (Hz).

1-2/ Tension instantanée :

L'expression de la tension en régime alternatif sinusoïdal est :

$$U(t) = Um \times \cos(2\pi Nt + \varphi_u)$$

Um: tension ou amplitude maximale (en V).
φ_u : la phase à l'origine des dates (en rad)
N : la fréquence de la tension en (Hz).

Remarque :

- Le signe de l'intensité du courant, ainsi que le signe de la tension, changent deux fois par période.
- La relation entre la pulsation ω, la fréquence N et la période T est :

$$\omega = 2\pi.N = \frac{2\pi}{T}$$

2) Grandeurs efficaces :

2-1/ Intensité du courant efficace :

L'intensité du courant efficace d'un courant alternatif ***sinusoïdal*** est notée I et son expression est : $I = \frac{Im}{\sqrt{2}}$ et $Im = I \times \sqrt{2}$

2-2/ Tension efficace:

La tension efficace d'une tension alternatif ***sinusoïdal*** est notée U et son expression est : $U = \frac{Um}{\sqrt{2}}$ et $Um = U \times \sqrt{2}$

Remarque :

La valeur de tension efficace est mesurée par **l'ampèremètre** tandis que ***la valeur maximale*** est donnée par **l'oscilloscope**.

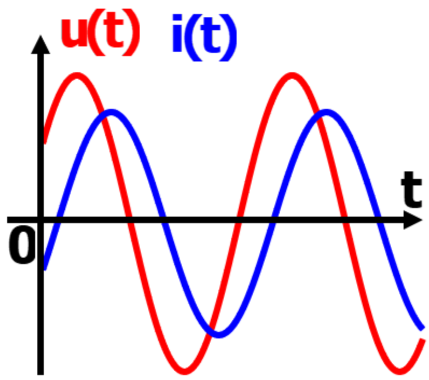
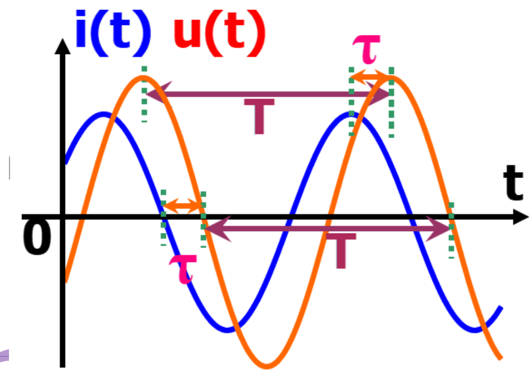
3) *Déphasage entre deux courbes sinusoïdales*

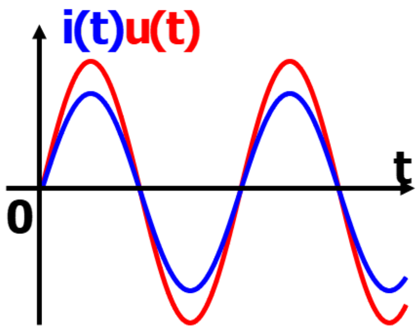
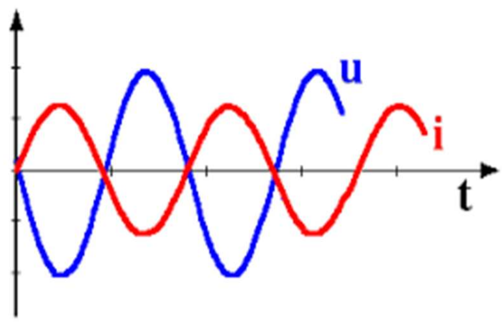
Considérons l'intensité instantanée du courant et la tension électrique instantanée.

$$i(t) = Im \times \cos(\omega t + \varphi_i) \quad \text{et} \quad U(t) = Um \times \cos(\omega t + \varphi_u)$$

On appelle déphasage de u(t) par rapport à i(t) : $\varphi_{u/i} = \varphi_u - \varphi_i$

« Le déphasage permet de savoir le retard ou l'avance de phase entre U(t) et i(t) »

Si U est en avance de phase par rapport à i : $\varphi_{u/i} > 0$	Si U est en retard de phase par rapport à i $\varphi_{u/i} < 0$
	

Si U et i sont en phase : $\varphi_{u/i} = 0$	Si U et i sont en opposition de phase : $\varphi_{u/i} = \pi$
	

Exemple N°1 :

Soient $U(t) = 2\times\cos(100\pi t)$ et $i(t) = 0,04\times\cos\left(100\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

Est-ce que le courant $i(t)$ est en retard ou en avance de phase par rapport à la tension $U(t)$?

$\varphi_i = \frac{\pi}{4}$ et $\varphi_U = 0 \Rightarrow \varphi_{U/i} = \varphi_u - \varphi_i = -\frac{\pi}{4} < 0$

$U(t)$ **est en retard de phase par rapport à** $i(t)$

Exemple N°2 :

Soient $U(t) = -3\times\sin(500\pi t)$ et $i(t) = 0,04\times\cos\left(500\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

Est-ce que la tension $U(t)$ est en retard ou en avance de phase par rapport à le courant $i(t)$?

$$U(t) = -3\times\sin(500\pi t) = 3\times\cos\left(500\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \varphi_U = \frac{\pi}{2} \text{ et } \varphi_i = \frac{\pi}{4}$$

$$\Rightarrow \varphi_{U/i} = \varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{4} > 0$$

$U(t)$ **est en avance de phase par rapport à** $i(t)$

Comment déterminer le déphasage graphiquement ?

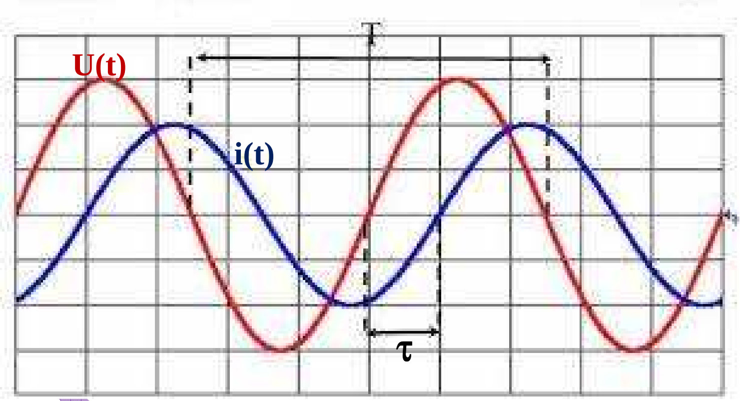
En considérant les conditions initiales. On a : i=0 à t=0 donc $0 = I_m \cdot \cos(\varphi i)$ $\Rightarrow \varphi i = 0$ et dans ce cas le déphasage entre U et i devient $\varphi_{U/i} = \varphi_u$ donc on a :

$$i(t) = Im\times\cos(\omega t) \quad \text{et} \quad U(t) = Um\times\cos(\omega t + \varphi)$$

$\Rightarrow U(t) = Um\times\cos\left(\omega\left(t + \frac{\varphi}{\omega}\right)\right) = Um\times\cos(\omega(t+\tau))$ donc τ le retard temporel $\tau = \frac{\varphi}{\omega}$ avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$

La détermination de τ sur l'écran de l'oscilloscope permet de connaitre la valeur absolue du déphasage :

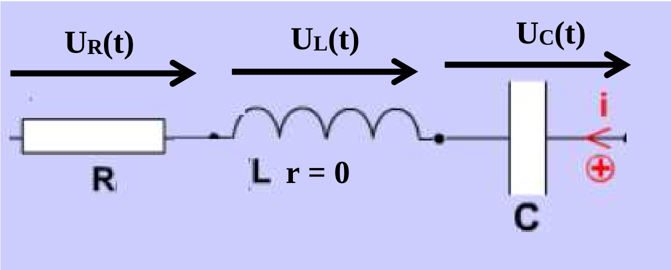
$$|\varphi| = 2\pi\frac{\tau}{T}$$



$$|\varphi| = 2\pi\frac{1div\times S_H}{5div\times S_H} \Rightarrow |\varphi| = \frac{2\pi}{5}$$

Puisque U(t) atteint le maximum avant i(t) donc U(t) est en avance de phase par rapport à i(t) de $\frac{2\pi}{5}$

Remarque :



Soit $i(t) = Im\times\cos(\omega t + \varphi_i)$ avec $\varphi_i = 0 \Rightarrow i(t) = Im\times\cos(\omega t)$

- **La tension aux bornes du conducteur ohmique :**

D'après la loi d'ohm :

$$U_R(t) = R\times i(t) \Rightarrow U_R(t) = R\times Im\times\cos(\omega t) = U_{Rm}\times\cos(\omega t+\varphi_{U_R})$$

Donc $U_{Rm} = R\times I_m$ et $\varphi_{U_R} = \varphi_i$

On dit que : *la tension $U_R(t)$ et le courant i(t) est tours en phase.*

- **La tension aux bornes de la bobine parfaite :**

$$U_L(t) = L\times\frac{di}{dt} \ \ et \ \ i(t) = Im\times\cos(\omega t) \Rightarrow \frac{di}{dt} = I_m\times\omega\times\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$U_L(t) = L\times I_m\times\omega\times\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \text{ sous forme de } U_L(t) = U_{Lm}\times\cos(\omega t+\varphi_{U_L})$$

Donc $U_{Lm} = L\times I_m\times\omega$; $\varphi_i = 0$ et $\varphi_{U_L} = \frac{\pi}{2}$

On dit que : *la tension $U_L(t)$ est en avance de phase de π/2 par rapport au courant i(t).*

- **La tension aux bornes du condensateur :**

$$i(t) = C\times\frac{dU_C}{dt} \Rightarrow dU_C = \frac{1}{C}\times i(t)\times dt \Rightarrow \int dU_C = \frac{1}{C}\times\int i(t)\times dt \text{ donc } U_C(t) = \frac{1}{C}\times\int i(t)\times dt$$

$$U_C = \frac{1}{C}\times Im\times\int\cos(\omega t)\times dt \text{ Sachant que : } \int\cos(A\times y)\times dy = \frac{1}{A}\times\cos\left(A\times y - \frac{\pi}{2}\right)$$

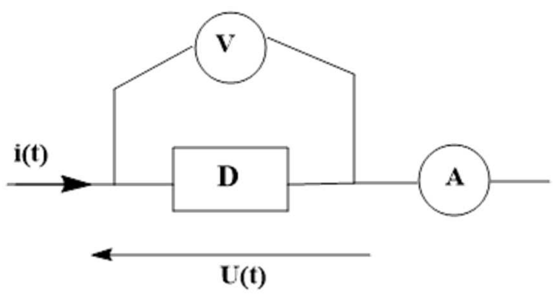
$$\Rightarrow U_C(t) = \frac{Im}{C\times\omega}\times\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ sous forme de } U_C(t) = U_{Cm}\times\cos(\omega t+\varphi_{U_C})$$

Donc $U_{Cm} = \frac{Im}{C\times\omega}$ et ; $\varphi_i = 0$ et $\varphi_{U_C} = -\frac{\pi}{2}$

On dit que : *la tension $U_C(t)$ est en retard de phase de π/2 par rapport au courant i(t).*

II. Les impédances électriques :

1) Impédance d'un dipôle :



$$i(t) = Im\times\cos(\omega t+\varphi_i)$$

$$i(t) = I\times\sqrt{2}\times\cos(\omega t+\varphi_i)$$

$$U(t) = Um\times\cos(\omega t+\varphi_U)$$

$$U(t) = U\times\sqrt{2}\times\cos(\omega t+\varphi_U)$$

$$\boxed{Z = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}}$$

On appelle Z l'impédance d'un dipôle D est le rapport de la tension maximal Um sur l'intensité maximale Im :

Son unité dans le système internationale est Ω

PHYSIQUE

2) Impédance d'un conducteur ohmique :

$$Z_R = \frac{U_{Rm}}{I_m} = \frac{R \times I_m}{I_m} \quad \Rightarrow \boxed{Z_R = R}$$

L'impédance d'une résistance est la résistance elle-même elle ne dépendant pas de la fréquence N.

3) Impédance d'une bobine parfaite :

$$Z_L = \frac{U_{Lm}}{I_m} = \frac{L \times \omega \times I_m}{I_m} \quad \Rightarrow \boxed{Z_L = L \times \omega = 2\pi.N.L}$$

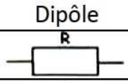
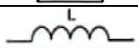
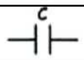
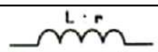
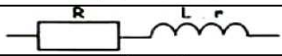
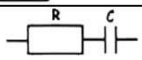
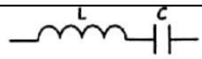
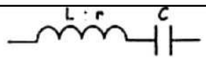
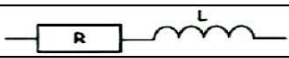
L'impédance Z_L d'une bobine parfaite ou Z_B celle d'une bobine réelle, dépend de la fréquence N.

4) Impédance d'un condensateur :

$$Z_C = \frac{U_{Cm}}{I_m} = \frac{I_m / (C \times \omega)}{I_m} \quad \Rightarrow \boxed{Z_L = \frac{1}{C \times \omega} = \frac{1}{2\pi.N \times C}}$$

L'impédance Z_C d'un condensateur dépend de la fréquence N.

5) Expression de l'impédance des autres dipôles:

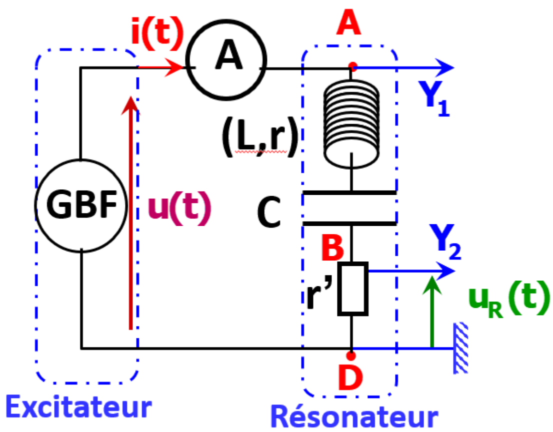
Dipôle	Expression de son impédance
	$Z_R = R$
	$Z_L = L\omega$
	$Z_C = \frac{1}{C\omega}$
	$Z_B = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2}$
	$Z_{R,B} = \sqrt{(R + r)^2 + (L\omega)^2}$
	$Z_{R,C} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(C\omega)^2}}$
	$Z_{L,C} = \left\lvert L\omega - \frac{1}{C\omega} \right\rvert$
	$Z_{B,C} = \sqrt{r^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$
	$Z_{R,B,C} = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$
	$Z_{R,L} = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$

III. Étude expérimentale du circuit RLC série en régime alternatif sinusoïdal:

1) Montage d'étude :

On réalise le montage électrique ci-contre. Le générateur GBF délivre au circuit RLC en série une tension alternative sinusoïdale : $u(t) = U_m \times \cos(\omega t + \varphi_{u/i})$. Il apparaît dans le circuit un courant électrique d'intensité $i(t) = I_m \times \cos(\omega t)$

Les deux entrées Y_1 et Y_2 de l'oscilloscope, nous permet de visualiser la tension $U_R(t)$ aux bornes du conducteur ohmique et la tension u(t)



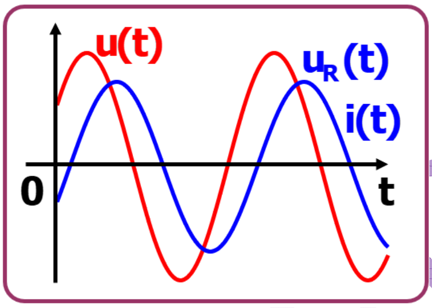
PHYSIQUE

aux bornes du circuit RLC.

D'après la loi d'Ohm, on a :

$$U_R(t) = R \times I(t) \Rightarrow I(t) = \frac{U_R(t)}{R}$$

Donc c'est grâce à un logiciel on visualise l'intensité instantanée i(t) en fonction du temps.



Excitateur : générateur de tension sinusoïdale (GBF par exemple) de pulsation

$$\omega = \omega_e = \frac{2\pi}{T} = 2\pi N \text{ avec la fréquence N variable.}$$

Résonateur : circuit RLC série de pulsation propre $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{2\pi}{T_0}$ et de fréquence propre $N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

Remarque :

Les deux tensions $U_R(t)$ *aux bornes du conducteur ohmique* et U(t) *la tension aux bornes du GBF* ont **la même fréquence N imposée par le GBF**. On dit que les oscillations électriques sont forcées.

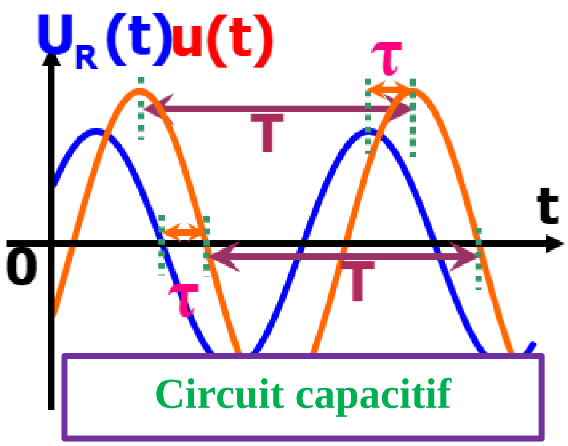
2) ***Résultats de l'expérience*** : ***Trois cas sont possible*** :

- **Cas N°1 : $N < N_0$: fréquence imposée < fréquence propre**

$U_R(t)$ est en avance est en avance de phase par rapport à U(t) donc i(t) est en avance est en avance aussi de phase par rapport à U(t) par conséquent $\Rightarrow \varphi_{U/i} < 0$ Donc

$$\frac{1}{C.\omega} > L.\omega$$

On dit que le circuit est ***capacitif c.à.d L'effet du condensateur l'emport sur effet de la bobine***



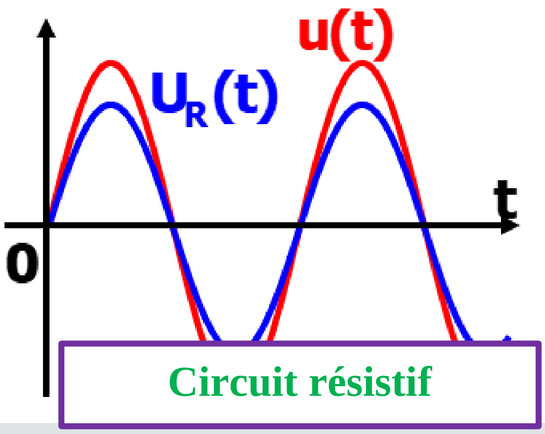
- **Cas N°2 : $N = N_0$: fréquence imposée = fréquence propre**

$U_R(t)$ et U(t) sont en phase donc i(t) et U(t) sont aussi en phase par conséquent

$$\Rightarrow \varphi_{U/i} = 0$$

Donc $\frac{1}{C.\omega} = L.\omega \Rightarrow L.C.\omega^2 = 1$

On dit que le circuit est ***résistif*** et le circuit est en état de ***résonance***

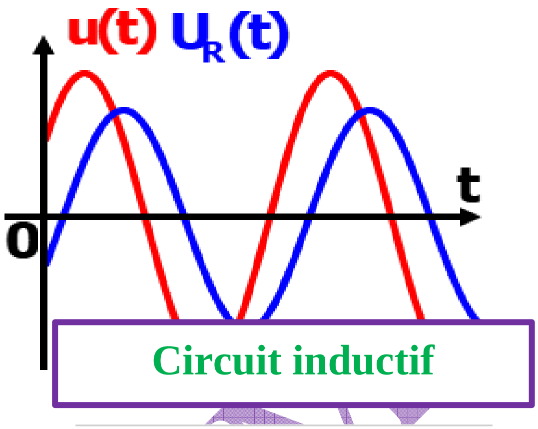


- **Cas N°3 : $N > N_0$: fréquence imposée > fréquence propre**

$U_R(t)$ est en retard de phase par rapport à $U(t)$ donc $i(t)$ est en retard aussi de phase par rapport à $U(t)$ par conséquent $\Rightarrow \varphi_{U/i} > 0$

Donc $L.\omega > \dfrac{1}{C.\omega}$

On dit que le circuit est ***inductif c.à.d***
L'effet de la bobine l'emport sur effet du condensateur



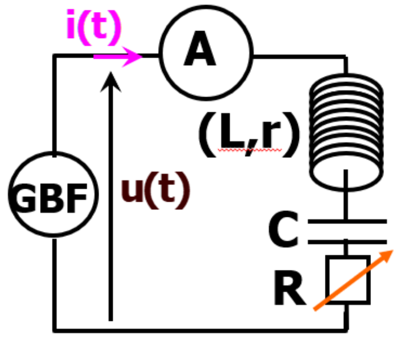
IV. Phénomène de résonance d'intensité.

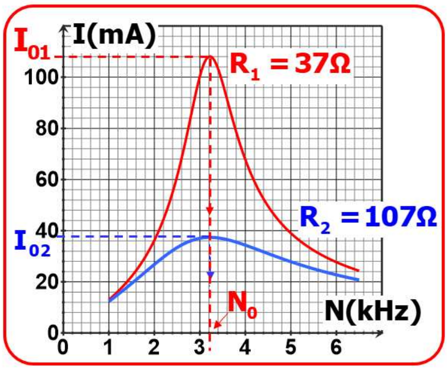
1) *Étude expérimentale*

On réalise le montage électrique ci-dessous ; On fixe la tension efficace U = 4V du générateur GBF, On fait varier la fréquence N du générateur et on mesure l'intensité efficace I du courant. On refait la même expérience pour deux valeurs différentes de la résistance totale R_T

($R_T = R+r$) On obtient le graph ci-contre :

On donne : C = 0,47µF et L = 5,2mH





2) *La fréquence de résonance*

À la résonance, l'intensité efficace du courant prend une valeur maximale I_0 :

$I_0 \simeq 108mA$ pour $R_1 = 37\Omega$ et

$I_0 \simeq 37,5mA$ pour $R_2 = 107\Omega$.

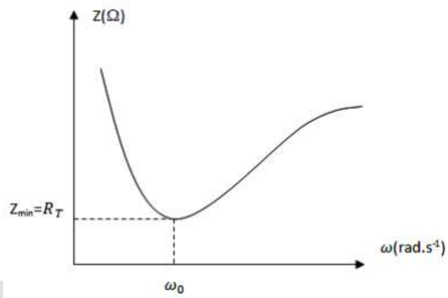
Calculons la fréquence propre N_0 du résonateur : $N_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$$N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,2.10^{-3} \times 0,47.10^{-6}}} = 3067 \text{ Hz}$$

Remarque :

- Lorsque la fréquence N d'excitateur prend une valeur égale à la fréquence propre N_0 du résonateur, l'intensité efficace I du courant qui traverse le circuit sera ***maximale*** et égale à I_0, on dit dans ce cas que ***le circuit RLC série est en résonance d'intensité***.

- A la résonance, l'intensité efficace I du courant est maximale et $Z = Z_{min}$ l'impédance est minimale

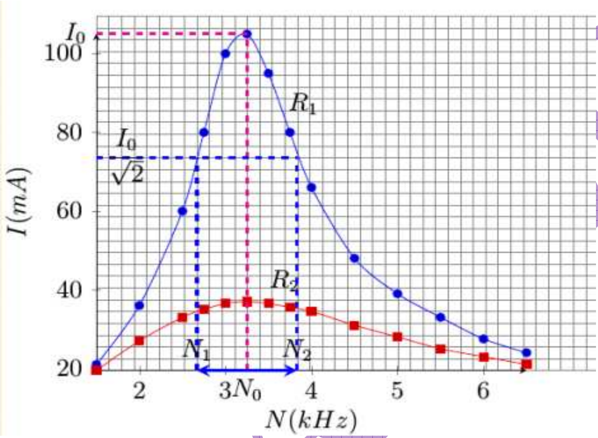


Conclusion : A la résonance

$$\boxed{N = N_0 \ ; \ I = I_0 = \frac{U}{Z_{min}} \text{ courant maximal \& } Z_{min} = R_T \text{ impédance minimale}}$$

3) La bande passante :

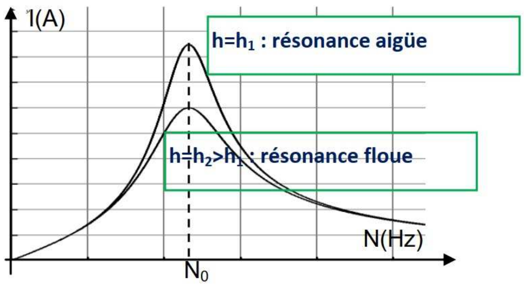
La bande passante, «***à moins trois décibels -3dB***» du dipôle (R,L,C) est définie comme une intervalle continue des fréquences $[N_1;N_2]$ du générateur, pour laquelle l'intensité efficace I du courant vérifie la relation suivante : $I \geq \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.



La largeur de la bande passante $\Delta N = N_2 - N_1$

Remarque :

- Dans le cas où R est **petite** (*amortissement faible*), ***la résonance est aiguë*** que la largeur de la bande passante ΔN est petite.
- Dans le cas où R est **grande** (*amortissement forte*), ***la résonance est floue*** et ΔN est grande.



4) La facteur qualité Q « Coefficient de surtension »:

On définit le facteur de qualité Q par un nombre, sans dimension, comme étant le rapport de la fréquence N_0 par ΔN :

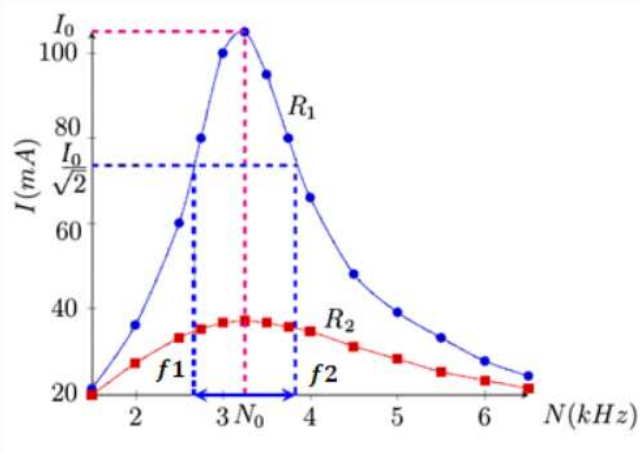
$$Q = \frac{N_0}{\Delta N}$$

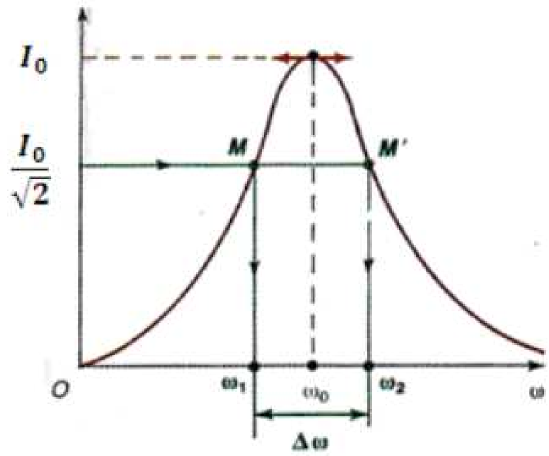
et puisque $\omega = 2\pi N$ donc : $\Delta\omega = 2\pi.\Delta N$: $Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{\omega_0}{\Delta \omega}$

Remarque :

- Dans le cas le cas où R est **petite** le facteur qualité Q est grand.
- Plus Q est grand plus la bande passante est mince et que le circuit est sélectif.

Détermination graphique de Q facteur qualité :





Détermination par calcule de Q facteur qualité :

A la résonance :

$$L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} = 0 \Rightarrow L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad \Delta\omega = \ ?$$

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \text{ lorsque } I(\omega) = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_T^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} = \frac{U}{R_T\sqrt{1+\left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_T}\right)^2}} \text{ et } U = I_0 \times R_T \Rightarrow I = \frac{I_0}{\sqrt{1+\left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_T}\right)^2}}$$

$$\text{lorsque } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \Rightarrow \sqrt{1+\left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_T}\right)^2} = \sqrt{2} \Rightarrow \left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_T}\right)^2 = 1 \Rightarrow \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_T} = \pm 1$$

Ce qui nous donne 2 équations :

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = R_T \quad (1) \quad \text{ou} \quad L\omega - \frac{1}{C\omega} = -R_T \quad (2)$$

$$(1) \Rightarrow LC\omega^2 - R_T C\omega - 1 = 0 \quad \text{ou} \quad (2) \Rightarrow LC\omega^2 + R_T C\omega - 1 = 0$$

$$(1) \Rightarrow \Delta = R_T^2 C^2 + 4LC > 0 \quad \text{ou} \quad (2) \Rightarrow \Delta = R_T^2 C^2 + 4LC > 0$$

$$\omega = \frac{R_T C + \sqrt{\Delta}}{2LC} \text{ et } \omega' = \frac{R_T C - \sqrt{\Delta}}{2LC} < 0 \quad \text{ou} \quad (2) \Rightarrow \omega'' = \frac{-R_T C + \sqrt{\Delta}}{2LC} \text{ et } \omega''' = \frac{-R_T C - \sqrt{\Delta}}{2LC} < 0$$

Donc

$$\omega_1 = \frac{-R_T C + \sqrt{\Delta}}{2LC} \text{ et } \omega_2 = \frac{R_T C + \sqrt{\Delta}}{2LC} \text{ car } \omega_1 < \omega_2 \text{ et } \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R_T}{L}$$

Donc la largeur de la bande passante ne dépend que de la résistance et de l'inductance

$$\boxed{Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{1}{R_T C\omega_0} = \frac{L\omega_0}{R_T} = \frac{1}{R_T}\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Si $Q > 1$: la résonance est aigue.

Si $Q \approx 1$: la résonance est floue.

Remarque :

- Le facteur qualité Q dépend de la résistance du circuit, de la capacité du condensateur et de l'inductance.

- La tension maximale du condensateur à la résonance est :

$$U_{Cm} = \frac{Im}{C\times\omega_0} \Rightarrow U_C = \frac{I_0}{C\times\omega_0} \text{ et } I_0 = \frac{U}{R_T} \Rightarrow U_C = \frac{U}{R_T\times C\times\omega_0} \Rightarrow U_C = Q\times U$$

PHYSIQUE

- La tension maximale aux bornes d'une bobine parfaite à la résonance est :

$$U_{Bm} = L.\omega_0.Im \quad \Rightarrow U_B = L.\omega_0.I_0 \quad \text{et } I_0 = \frac{U}{R} \quad \Rightarrow U_B = U.\frac{L}{R}.\omega_0 \Rightarrow U_B = Q \times U$$

5) Quelque effets de la résonance sur le circuit : Surtension

Expérimentalement lorsque la résonance est aiguë plus Q est grande dans ce cas on a que $U_C > U$ et $U_L > U$ ce qui prouve que à la résonance, il apparaît une ***surtension***. Donc Q est appeler aussi ***le facteur ou le coefficient de surtension***.

C'est un phénomène qui peut créer un certain danger qui peut aller jusqu'à la détérioration des éléments du circuit (L,C) c'est pour cela on doit l'éviter.

❖ **Danger de la surtension :**

- La surtension provoque le claquage du condensateur.
- Etincelles entre les spires de la bobine.
- Risque d'électrocution.

❖ **Protection d'un circuit contre la surtension :**

- Addition des résistances dans le circuit.
- Diminuer la valeur de l'inductance de la bobine.
- Augmenter la valeur de la capaciter du condensateur.

V. La puissance instantanée et la puissance moyenne dans le régime alternatif sinusoïdal.

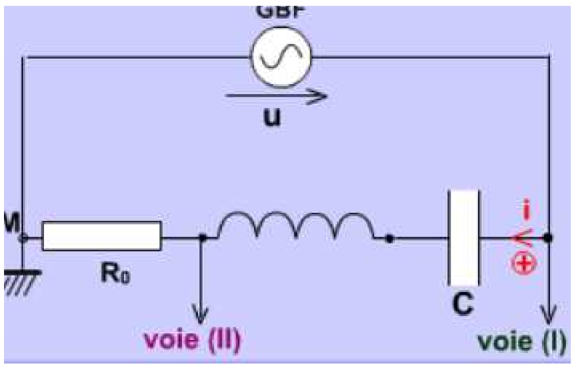
On suppose :

$$i(t) = Im \times \cos(\omega t)$$

$$i(t) = I \times \sqrt{2} \times \cos(\omega t)$$

$$U(t) = Um \times \cos(\omega t + \varphi)$$

$$U(t) = U \times \sqrt{2} \times \cos(\omega t + \varphi)$$



La puissance instantanée :

$$P(t) = U(t) \times i(t) = Um \times Im \times \cos(\omega t) \times \cos(\omega t + \varphi)$$

La puissance moyenne :

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(t)\,dt$$

PHYSIQUE

$$P_m = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T \left(\mathrm{Um}\times\mathrm{Im}\times\cos(\omega t)\times\cos(\omega t+\varphi)\right)dt$$

Or $\cos(A)\times\cos(B) = \frac{1}{2}\left[\cos(A+B)+\cos(A-B)\right]$ donc

$$P_m = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{1}{2}\mathrm{Um}\times\mathrm{Im}\left(\cos(2\omega t+\varphi)+\cos(\varphi)\right)dt = \frac{U\times I}{T}\int_0^T \left(\cos(2\omega t+\varphi)+\cos(\varphi)\right)dt$$

$$P_m = \frac{U\times I}{T}\left[\frac{1}{2\omega}\sin(2\omega t+\varphi)+\cos(\varphi)\times t\right]_0^T$$

$$P_m = \frac{U\times I}{T}\left(\frac{1}{2\omega}\sin\left(2\frac{2\pi}{T}T+\varphi\right)+\cos(\varphi)\times T-\left(\frac{1}{2\omega}\sin(2\omega\times 0+\varphi)+\cos(\varphi)\times 0\right)\right)$$

$$P_m = \frac{U\times I}{T}\left(\frac{1}{2\omega}\sin(4\pi+\varphi)+\cos(\varphi_U)\times T-\frac{1}{2\omega}\sin(\varphi)\right) = \frac{U\times I}{T}\cos(\varphi)\times T$$

$$P_m = U\times I\times\cos(\varphi)$$

P_m : Puissance moyenne en watt W
U : Tension efficace en volte V.
I : Intensité efficace en ampère A
$\cos(\varphi_U)$: ***Facteur de puissance***.

Remarque :

- A la résonance : $\varphi = 0 \Rightarrow \cos(\varphi)=1$ donc $P_m = U\times I$ la puissance moyenne est maximale.
- On a $\cos(\varphi)=\frac{R_T}{Z}$ et $U = Z\times I$ donc $P_m = Z\times I\times I\times\frac{R_T}{Z}$

$$P_m = R_T\times I^2$$

On retrouve la puissance moyenne dissipée par effet joule.

- A la résonance : $I = I_0$ (max) $\Rightarrow P_m = R_T\times I_0^2$ donc la puissance dissipée par effet joule est maximale à la résonance.