Exercice 6

$$\boxed{\frac{du}{dt} + \frac{1}{\tau}u = \frac{1}{\tau}e}$$

$\underline{E} = E_m e^{j\varphi}$

$\underline{e} = E_m e^{j(\omega t+\varphi)}$

$e = E_m \cos(\omega t+\varphi)$

SP : $u = U_m \cos(\omega t + \varphi')$

$\underline{u} = U_m e^{j(\omega t+\varphi')}$ $\quad \underline{U} = U_m e^{j\varphi'}$

1. $$j\omega \underline{U} + \frac{1}{\tau}\underline{U} = \frac{1}{\tau}\underline{E}$$

2. $$\underline{E} - \underline{U_R} - \underline{U} = 0$$

$$\underline{E} - R\underline{I} - \underline{U} = 0$$

$\underline{U} = \frac{1}{jC\omega}\underline{I}$

$\underline{I} = jC\omega \underline{U}$

$$\underline{E} - RjC\omega\underline{U} - \underline{U} = 0$$

En divisant par $\tau = RC$:

$$\frac{\underline{E}}{RC} - j\omega\underline{U} - \frac{\underline{U}}{RC} = 0$$

$$j\omega\underline{U} + \frac{1}{\tau}\underline{U} = \frac{1}{\tau}\underline{E}$$

(Résultat précédent)

3) $$\underline{U}(1 + jRC\omega) = \underline{E}$$

$$\underline{U} = \frac{\underline{E}}{1 + jRC\omega}$$

ou $$\underline{U} = \frac{\underline{E}}{1 + j\tau\omega}$$

4) $$U_m = |\underline{U}| = \frac{E}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}$$

$$\mathrm{Arg}(\underline{U}) = \arg\left(\frac{\underline{E}}{1 + jRC\omega}\right)$$

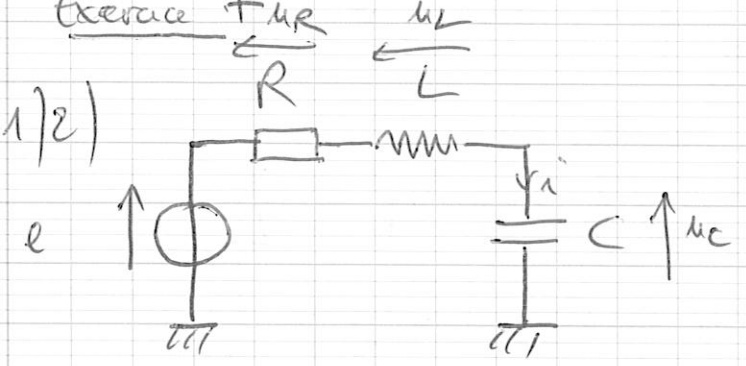
$$\varphi' = \varphi - \arctan(RC\omega)$$

ou

$$\varphi' = \varphi - \arctan(\tau\omega)$$

Exercice 7

1)2)



$$e - u_R - u_L - u_C = 0 \quad (1)$$

avec : $u_R = Ri$ $\qquad q = C u_C$

$u_L = L\frac{di}{dt}$ $\qquad i = i_C = C\frac{du_C}{dt} = \frac{dq}{dt}$

$$(1) \Rightarrow e - R\frac{dq}{dt} - L\frac{d^2q}{dt^2} - \frac{q}{C} = 0$$

$\div L$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}q = \frac{e}{L}$$

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = \frac{e}{L}$$

$$\ddot{q} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{e}{L}$$ Forme canonique.

Identification : $\begin{cases} \frac{R}{L} = \frac{\omega_0}{Q} \\ \frac{1}{LC} = \omega_0^2 \end{cases}$ $\qquad Q = \omega_0\frac{L}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

(*) Resolution avec les impédances complexes

3) $R \Leftrightarrow h$

$L \Leftrightarrow m$

$C \Leftrightarrow \frac{1}{k}$

$q \Leftrightarrow x$

$e \Leftrightarrow F$

On obtient : $\ddot{x} + \frac{h}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{F}{m}$

Impedance elec $= \underline{Z} = \frac{\underline{u}}{\underline{i}}$

Impedance méca $= \frac{\underline{F}}{\underline{v}}$

4) $\ddot{q} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{e}{L}$

Passage en complexes :

$$\ddot{\underline{q}} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{\underline{q}} + \omega_0^2 \underline{q} = \frac{\underline{e}}{L}$$

$$-\omega^2 \underline{q} + \frac{\omega_0}{Q} i\omega \underline{q} + \omega_0^2 \underline{q} = \frac{\underline{E_M}}{L} e^{i\omega t}$$

$$\left(-\omega^2 + i\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2\right)\underline{q} = \frac{E_M}{L} e^{i\omega t}$$

$$\left(-\omega^2 + i\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2\right)\underline{q_M}\, \cancel{e^{i\omega t}} = \frac{\underline{E_M}}{L} \cancel{e^{i\omega t}}$$

$$\underline{q_M} = \frac{\frac{E_M}{L}}{-\omega^2 + i\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$\underline{E_M} = E_M$

$$i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow \underline{i} = \frac{d}{dt}(\underline{q}) = i\omega \underline{q}$$

$$\Rightarrow \underline{I_M} = i\omega \underline{q_M}$$

On obtient :

$$\underline{I_M} = \frac{i\omega\frac{E_M}{L}}{-\omega^2 + i\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad \begin{matrix}(\div i\omega)\\(\div i\omega)\end{matrix}$$

$$= \frac{\frac{E_M}{L}}{+i\omega + \frac{\omega_0}{Q} - i\frac{\omega_0^2}{\omega}} \quad \begin{matrix}(\div \omega_0)\\(\div \omega_0)\end{matrix}$$

$$= \frac{\frac{E_M}{L\omega_0}}{i\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{1}{Q} - i\frac{\omega_0}{\omega}}$$

$$= \frac{\frac{E_M}{L\omega_0}}{\frac{1}{Q} + i\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

Amplitude Complexe Associée à l'intensité

Identification à la forme

$$\underline{V_M}(u) = \frac{\omega_0 X_0}{\frac{1}{Q} + i\left(u - \frac{1}{u}\right)} \quad \left(u = \frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

$\downarrow$

$\underline{I_M}(u)$

$$I_M = |\underline{I}_M| = \frac{\frac{E_M}{L\omega_0}}{\sqrt{\left(\frac{1}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (2)$$

I_M max pour $\underline{\omega = \omega_0}$ Pulsation de résonance / $\underline{f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}}$ Fréquence de résonance

$$I_{M\,max} = \frac{\frac{E_M}{L\omega_0}}{\sqrt{\left(\frac{1}{Q}\right)^2}} = \frac{E_M}{L\omega_0} \times Q$$

$$= \frac{E_M}{\frac{1}{\sqrt{LC}} L} \times \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{E_M}{L} \times \sqrt{LC} \times \frac{1}{R} \times \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\underline{I_{M\,max} = \frac{E_M}{R}} \quad (\text{CQFD})$$

Amplitude à la résonance

5) Difficile !

On cherche les 2 valeurs de ω pour lesquelles

$$I_M = \frac{I_{M\,max}}{\sqrt{2}} = \frac{E}{\sqrt{2}R}$$

ou $\sqrt{\left(\frac{1}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} = \sqrt{2}$ (dénominateur de (2) égal à $\sqrt{2}$ au lieu de 1 à la résonance.

Il faut :

$$\left(\frac{1}{Q}\right)^2 = \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$$

$$\pm\frac{1}{Q} = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \quad \times\omega$$

$$\pm\frac{1}{Q}\omega = \frac{\omega^2}{\omega_0} - \omega_0 \quad \times\omega_0$$

$$\pm\frac{1}{Q}\omega_0\omega = \omega^2 - \omega_0^2$$

$$\omega^2 \pm \frac{1}{Q}\omega_0\,\omega - \omega_0^2 = 0$$

$$\omega^2 \pm \frac{\omega_0}{Q}\omega - \omega_0^2 = 0$$

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

$$\omega_{1,2} = \frac{\pm\frac{\omega_0}{Q} \pm\sqrt{\Delta}}{2}$$

les 2 ω positives sont :

$$\omega_{1,2} = \frac{\pm\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$\omega_1 = \frac{-\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\Delta}}{2} \qquad \omega_2 = \frac{\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\Delta}}{2}$$

largeur de la bande passante :

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\Delta}}{2} - \frac{-\frac{\omega_0}{Q} + \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$\underline{\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}}$$ largeur de la Bande passante associée à la résonance (en pulsations ω).

$$\underline{\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi}}$$ (en fréquences f)

(*) Exercice 7 : Résolution avec les impédances complexes

Loi des mailles :

$$\underline{E} - \underline{U_R} - \underline{U_L} - \underline{U_C} = 0 \quad (1)$$

avec :

$$\underline{U_R} = R\underline{I}$$
$$\underline{U_L} = jL\omega \underline{I}$$
$$\underline{Q} = C.\underline{U_C} \rightarrow \underline{U_C} = \frac{\underline{Q}}{C}$$
$$\underline{I} = jC\omega \underline{U_C}$$

(1) devient :

$$\underline{E} - R\underline{I} - jL\omega\underline{I} - \underline{U_c} = 0$$

$$\underline{E} - jRC\omega\underline{U_c} - jL\omega \times jC\omega \underline{U_c} - \underline{U_c} = 0$$

$$\underline{E} - jR\cancel{C}\omega\frac{\underline{Q}}{\cancel{C}} + LC\omega^2\frac{\underline{Q}}{C} - \frac{\underline{Q}}{C} = 0$$

$$\underline{E} - \underline{Q}\left(jR\omega - L\omega^2 + \frac{1}{C}\right) = 0$$

$$\underline{E} = \underline{Q}\left(jR\omega - L\omega^2 + \frac{1}{C}\right)$$

$$\boxed{\underline{Q} = \frac{\underline{E}}{jR\omega - L\omega^2 + \frac{1}{C}}}$$

** identification

Précédemment nous avons obtenu :

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = \frac{e}{L}$$

Passage en complexes :

$$q \rightarrow \underline{q}$$
$$\dot{q} \rightarrow j\omega\underline{q}$$
$$\ddot{q} \rightarrow -\omega^2\underline{q}$$

On obtient :

$$-\omega^2\underline{q} + \frac{R}{L}j\omega\underline{q} + \frac{1}{LC}\underline{q} = \frac{\underline{e}}{L}$$

$$q\left(-\omega^2+\frac{R}{L}j\omega+\frac{1}{LC}\right)=\frac{e}{L}$$

$$q=\frac{\frac{e}{L}}{-\omega^2+\frac{R}{L}j\omega+\frac{1}{LC}}\begin{matrix}(\times L)\\(\times L)\end{matrix}$$

$$\boxed{q=\frac{e}{-L\omega^2+Rj\omega+\frac{1}{C}}}$$

(**) Identification

$e(t) = E_M \cos \omega t$

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

$= \underline{E} e^{j\omega t}$

$\Rightarrow \underline{E} = E_M$

$q(t) = Q_M \cos(\omega t + \varphi)$

$\underline{q}(t) = Q_M e^{j(\omega t + \varphi)}$

$= Q_M e^{j\varphi} e^{j\omega t}$

$= \underline{Q}_M e^{j\omega t}$

$$\underline{Q}_M = \frac{E_M}{jR\omega - L\omega^2 + \frac{1}{C}}$$

E_M → constante réelle

$jR\omega$ → Terme imaginaire en ω

$-L\omega^2$ → Terme réel en ω^2

$\frac{1}{C}$ → constante réelle

(×C) au Numérateur et au Dénominateur

On identifie à :

$$\underline{Q}_M = \frac{A}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}} \quad (1)$$

(cours p. 12)

avec $x = \frac{\omega}{\omega_0}$

A → Constante réelle

1 → constante réelle $= 1$

$-x^2$ → Terme réel en ω^2

$j\frac{x}{Q}$ → Terme imaginaire en ω

$$\underline{Q}_M = \frac{CE_M}{jRC\omega - LC\omega^2 + 1} \quad (2)$$

On identifie (1) et (2) :

$$\begin{cases} A = CE_M \\ \cancel{j}RC\cancel{\omega} = j\frac{x}{Q} = j\frac{\omega}{Q\omega_0} \Rightarrow RC = \frac{1}{Q\omega_0} \quad (3) \\ -LC\cancel{\omega^2} = -x^2 = -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \Rightarrow LC = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (4) \end{cases}$$

On obtient :

(4) $\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

(3) $Q = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{\sqrt{LC}}{RC} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

(★★★) Identification → Terme imaginaire pur

$$\underline{I_M} = \frac{j\omega \frac{E_M}{L}}{-\omega^2 + j\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

→ Terme réels

Terme réel en ω^2 — Terme imaginaire en ω

On identifie à :

(Cours p.12)

$$\underline{I_M} = \frac{B}{1 + jQ\left(x - \frac{1}{x}\right)} \quad (1) \text{ avec } x = \frac{\omega}{\omega_0}$$

→ Terme réel.

Terme réel $= 1$ — Terme imaginaire en ω — Terme imaginaire en $\frac{1}{\omega}$

$\div \left(j\omega\frac{\omega_0}{Q}\right)$ au Num et Dénom

ou $\underline{I_M} = \dfrac{B}{1 + jQ\frac{\omega}{\omega_0} - jQ\frac{\omega_0}{\omega}}$

$$\underline{I_M} = \frac{\frac{E_M}{L} \times \frac{Q}{\omega_0}}{j\frac{\omega}{\omega_0}Q + 1 - jQ\frac{\omega_0}{\omega}}$$

Exercice 13 : Accéléromètre d'un stabilisateur d'images

1.2.

BAME : $\vec{P} = m\vec{g} = mg\vec{u_z}$ Poids

$\vec{F} = -k(l - l_0)\vec{u_z}$ Force de rappel élastique

$= -k(z - l_0)\vec{u_z}$

$\vec{f} = -\alpha\vec{v} = -\alpha\dot{z}\vec{u_z}$

PFD :

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a}_{M/R_T}$$

$$mg\vec{u_z} - k(z - l_0)\vec{u_z} - \alpha\dot{z}\vec{u_z} = m\vec{a}_{M/R_T}$$

$$= m(\ddot{z} + \ddot{z}_0)\vec{u_z}$$

1\. Justification :

$$\vec{AM} = \vec{AO} + \vec{OM}$$

En dérivant :

$$\vec{v}_{M/R_T} = \vec{v}_{O/R_T} + \vec{v}_{M/R_{app}}$$

En dérivant :

$$\vec{a}_{M/R_T} = \vec{a}_{O/R_T} + a_{M/R_{app}}$$

$$= (\ddot{z}_0 + \ddot{z})\vec{u_z}$$

On obtient sur $\vec{u_z}$:

$$mg - k(z - l_0) - \alpha\dot{z} = m\ddot{z} + m\ddot{z}_0$$

$$mg + kl_0 - m\ddot{z}_0 = m\ddot{z} + \alpha\dot{z} + kz$$

En divisant par m :

$$g + \frac{k}{m}l_0 - \ddot{z}_0 = \ddot{z} + \frac{\alpha}{m}\dot{z} + \frac{k}{m}z$$

ou

$$\frac{k}{m}\underbrace{\left(\frac{mg}{k} + l_0\right)}_{z_{eq}} - \ddot{z}_0 = \ddot{z} + \frac{\alpha}{m}\dot{z} + \frac{k}{m}z$$

Avec : $\left| \begin{array}{l} z_0(t) = Z_0 \cos \omega t \\ \dot{z}_0(t) = -\omega Z_0 \sin \omega t \\ \ddot{z}_0(t) = -\omega^2 Z_0 \cos \omega t \end{array} \right.$

$$\left| \begin{array}{l} z = Z + z_{eq} \\ \dot{z} = \dot{Z} + 0 \\ \ddot{z} = \ddot{Z} + 0 \end{array} \right.$$

On obtient :

$$\frac{k}{m} z_{eq} + \omega^2 Z_0 \cos(\omega t) = \ddot{z} + \frac{\alpha}{m}\dot{z} + \frac{k}{m} z$$

ou

$$\cancel{\frac{k}{m} z_{eq}} + \omega^2 Z_0 \cos(\omega t) = \ddot{Z} + \frac{\alpha}{m}\dot{Z} + \frac{k}{m} Z + \cancel{\frac{k}{m} z_{eq}}$$

$$\underline{\omega^2 Z_0 \cos(\omega t) = \ddot{Z} + \frac{\alpha}{m}\dot{Z} + \frac{k}{m} Z}$$

ω_0 = Pulsation Propre.

Q = facteur de qualité.

On identifie :

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \underline{\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{\alpha}{m} \Rightarrow \underline{Q = \omega_0 \frac{m}{\alpha} = \frac{1}{\alpha}\sqrt{mk}}$$

3. $\omega^2 \underline{Z}_0 = -\omega^2 \underline{Z}_m + i\omega \frac{\omega_0}{Q} \underline{Z}_m + \omega_0^2 \underline{Z}_m$

$$\underline{Z}_0 \cdot \omega^2 = \underline{Z}_m \left(\omega_0^2 - \omega^2 + i \frac{\omega\omega_0}{Q} \right)$$

On divise par ω_0^2 :

$$\underline{Z}_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \underline{Z}_m \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + i \frac{\omega}{\omega_0 Q}\right)$$

$$\underline{Z}_0 \cdot x^2 = \underline{Z}_m \left(1 - x^2 + i \frac{x}{Q}\right)$$

On obtient :

$$\underline{Z}_m = \frac{\underline{Z}_0 x^2}{(1-x^2)+i\frac{x}{Q}}$$

$$Z_m = |\underline{Z}_m| = \frac{Z_0 x^2}{\sqrt{(1-x^2)^2+\left(\frac{x}{Q}\right)^2}}$$

Filtre passe-haut.

4. En divisant Numérateur et Dénominateur par x^2 :

$$Z_m = \frac{Z_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{x^2}-1\right)^2+\left(\frac{1}{Qx}\right)^2}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\left(1-\frac{1}{x^2}\right)^2+\frac{1}{Q^2x^2}}}$$

Maximum obtenu lorsque :

$$\frac{d}{dx}\left(\left(1-\frac{1}{x^2}\right)^2+\frac{1}{Q^2x^2}\right)=0$$

$$2\times\frac{2}{x^3}\times\left(1-\frac{1}{x^2}\right)-\frac{2}{Q^2x^3}=0$$

$$\frac{4}{x^3}\left(1-\frac{1}{x^2}-\frac{1}{2Q^2}\right)=0$$

$$1-\frac{1}{2Q^2}=\frac{1}{x^2}$$

$$\frac{2Q^2-1}{2Q^2}=\frac{1}{x^2}$$

$$x^2=\frac{2Q^2}{2Q^2-1}$$

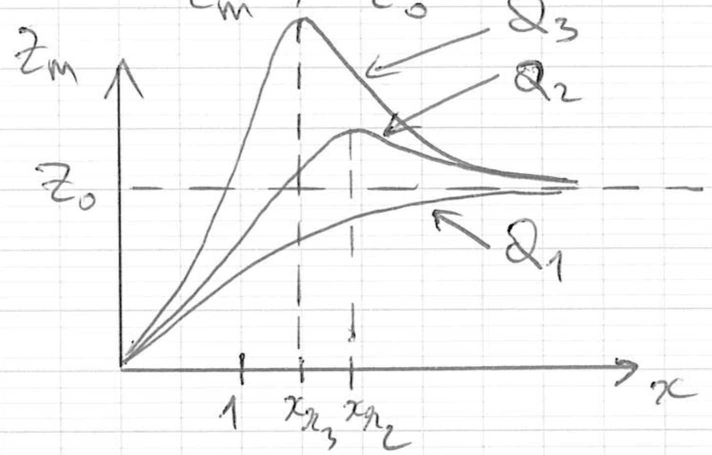
$$x=x_r=\sqrt{\frac{2Q^2}{2Q^2-1}} > 1$$

5. BF : $x \to 0$

$Z_m \to 0$

HF : $x \to \infty$

$Z_m \to Z_0$



6. On veut $Z_m = Z_0$ sur la + grande plage de fréquences possibles.

$\Rightarrow$ ω_0 la + basse possible

$\Rightarrow$ Régime critique $Q = \frac{1}{2}$.

Exercice 14

1) $$\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 X_0 \cos(\omega t)$$

$\downarrow$ Passage en complexes

$$\ddot{\underline{x}} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{\underline{x}} + \omega_0^2 \underline{x} = \omega_0^2 X_0 e^{j\omega t}$$

$$\dot{\underline{x}} = i\omega \underline{x}$$
$$\ddot{\underline{x}} = -\omega \underline{x}$$

$$-\omega^2 \underline{x} + \frac{\omega_0}{Q} i\omega \underline{x} + \omega_0^2 \underline{x} = \omega_0^2 X_0 e^{j\omega t}$$

$$\underline{x}\left(-\omega^2 + \frac{\omega_0}{Q} i\omega + \omega_0^2\right) = \omega_0^2 X_0 e^{j\omega t}$$

$$\underline{X}_M \cancel{e^{j\omega t}}\left(-\omega^2 + i\omega\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2\right) = \omega_0^2 X_0 \cancel{e^{j\omega t}}$$

Amplitude complexe :

$$\underline{X}_M = \frac{\omega_0^2 X_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\frac{\omega_0}{Q}}$$

2) Amplitude réelle.

$$X_M = |\underline{X}_M| = \frac{\omega_0^2 X_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\omega\frac{\omega_0}{Q}\right)^2}}$$

3) Déphasage

$$\varphi = \arg(\underline{X}_M) = -\arctan\frac{\omega\frac{\omega_0}{Q}}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Remarque : $$\varphi(\omega_0) = -\arctan\left(\frac{\frac{\omega_0^2}{Q}}{\underbrace{\omega_0^2 - \omega_0^2}_{\to\,\infty}}\right) \longrightarrow -\frac{\pi}{2}$$

$$\varphi(\omega_0) \to -\frac{\pi}{2}.$$

4) On lit : * Pour $\varphi = -\frac{\pi}{2}$
$\underline{\omega_0 = 5{,}5 \text{ rad.s}^{-1}}$ (graphe de gauche).

* $X_{M\,max}$ obtenu pour $\omega = \omega_R = 4 \text{ rad.s}^{-1}$ (graphe de droite).

On sait que :

$$u_R = \frac{\omega_R}{\omega_0} = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

$$\left(\frac{\omega_R}{\omega_0}\right)^2 = 1 - \frac{1}{2Q^2}$$

$$\frac{1}{2Q^2} = 1 - \left(\frac{\omega_R}{\omega_0}\right)^2$$

$$2Q^2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_R}{\omega_0}\right)^2}$$

$$Q^2 = \frac{1}{2 - 2\left(\frac{\omega_R}{\omega_0}\right)^2}$$

$$\underline{Q} = \sqrt{\frac{1}{2 - 2\left(\frac{\omega_R}{\omega_0}\right)^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2 - 2\left(\frac{4}{5{,}5}\right)^2}} \simeq \underline{1}$$

ou

Pour $\omega = \omega_0$, $X_M(\omega_0) \simeq 1{,}8$ et $X_M(0) \simeq 1{,}8$ (graphe de droite).

$$Q = \frac{X_M(\omega_0)}{X_M(0)} = \frac{1{,}8}{1{,}8} = 1$$