

# Oscillateurs en régime sinusoïdal forcé

## Sommaire

<b>I Exemple d'oscillateur : circuit RLC série en RSF</b>	<b>2</b>
I/A Présentation	2
I/B Étude de l'intensité	2
I/C Étude de la tension $u_C$	6
<b>II Exemple d'un oscillateur mécanique en RSF</b>	<b>9</b>
II/A Présentation	9
II/B Étude de l'élongation	10
II/C Résonance en vitesse	11
<b>III Synthèse</b>	<b>12</b>

## Capacités exigibles

- |                                                                                                   |                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité.                   | <input type="checkbox"/> Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase. |
| <input type="checkbox"/> Oscillateur électrique ou mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. | <input type="checkbox"/> Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.                                                  |

## L'essentiel

### Définitions

- |                                                       |   |
|-------------------------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> E7.1 : RLC série en RSF      | 2 |
| <input type="checkbox"/> E7.2 : Résonance             | 4 |
| <input type="checkbox"/> E7.3 : Bande passante        | 4 |
| <input type="checkbox"/> E7.4 : Ressort amorti en RSF | 9 |

### Propriétés

- |                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <input type="checkbox"/> E7.1 : Amplitude complexe $\underline{I}$   | 2  |
| <input type="checkbox"/> E7.2 : $i(t)$ RLC série en RSF              | 3  |
| <input type="checkbox"/> E7.3 : Résonance en intensité RLC série     | 4  |
| <input type="checkbox"/> E7.4 : Bande passante et facteur de qualité | 5  |
| <input type="checkbox"/> E7.5 : Amplitude complexe $\underline{U}_C$ | 6  |
| <input type="checkbox"/> E7.6 : $u_C(t)$ RLC série en RSF            | 7  |
| <input type="checkbox"/> E7.7 : Résonance en tension du RLC série    | 7  |
| <input type="checkbox"/> E7.8 : Amplitude complexe $\underline{X}_C$ | 10 |
| <input type="checkbox"/> E7.9 : $x(t)$ ressort amorti en RSF         | 10 |
| <input type="checkbox"/> E7.10 : Résonance en élongation             | 11 |
| <input type="checkbox"/> E7.11 : Amplitude complexe $\underline{V}$  | 11 |
| <input type="checkbox"/> E7.12 : Résonance en vitesse                | 12 |

### Démonstrations

- |                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <input type="checkbox"/> E7.1 : Amplitude complexe $\underline{I}$   | 2  |
| <input type="checkbox"/> E7.2 : $i(t)$ RLC série en RSF              | 3  |
| <input type="checkbox"/> E7.3 : Résonance en intensité RLC série     | 4  |
| <input type="checkbox"/> E7.4 : Bande passante et facteur de qualité | 5  |
| <input type="checkbox"/> E7.5 : Amplitude complexe $\underline{U}_C$ | 7  |
| <input type="checkbox"/> E7.6 : $u_C(t)$ RLC série en RSF            | 7  |
| <input type="checkbox"/> E7.7 : Résonance en tension du RLC série    | 8  |
| <input type="checkbox"/> E7.8 : Amplitude complexe $\underline{X}_C$ | 10 |
| <input type="checkbox"/> E7.9 : Amplitude complexe $\underline{V}$   | 11 |

### Points importants

- |                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| <input type="checkbox"/> E7.1 : À retenir pour $\underline{I}$   | 6  |
| <input type="checkbox"/> E7.2 : À retenir pour $\underline{U}_C$ | 9  |
| <input type="checkbox"/> E7.3 : Synthèse résonances              | 12 |

Parmi les systèmes soumis à une excitation sinusoïdale, les oscillateurs ont une place d'importance par l'émergence d'une propriété remarquable : celle de la **résonance**. Regardons deux exemples.

## I Exemple d'oscillateur : circuit RLC série en RSF

### I/A Présentation

#### Définition E7.1 : RLC série en RSF

On s'intéresse au circuit suivant, composé d'une résistance, d'une bobine et d'un condensateur  $C$ , alimentés par un GBF. On suppose une phase nulle pour le signal entrant :

$$e(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad \text{ainsi} \quad u_C(t) = U_C \cos(\omega t + \varphi_u) \quad \text{et} \quad i(t) = I \cos(\omega t + \varphi_i)$$

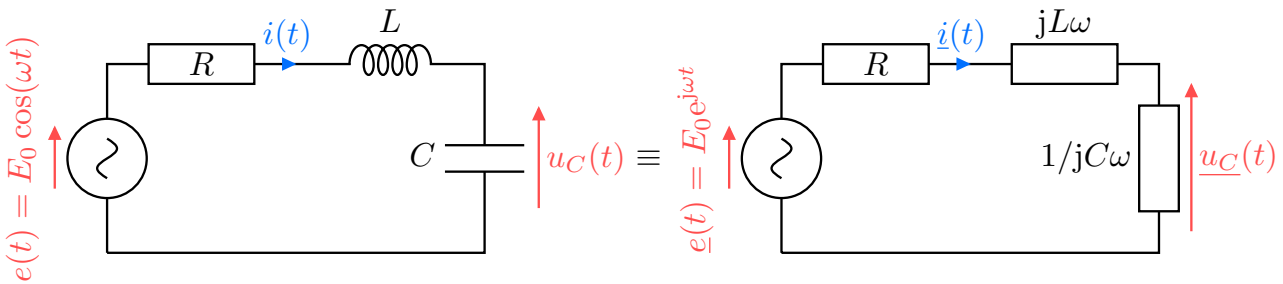


FIGURE E7.1 – RLC série en RSF.

### I/B Étude de l'intensité

#### I/B) 1 Amplitude complexe

#### Propriété E7.1 : Amplitude complexe $\underline{I}$

L'amplitude complexe de l'intensité dans un RLC série s'écrit :

$$\underline{I}(x) = \frac{E_0/R}{1 + jQ \left( x - \frac{1}{x} \right)} \quad \text{avec} \quad x = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

#### ♥ Démonstration E7.1 : Amplitude complexe $\underline{I}$

Pour étudier le comportement de l'intensité, on va comme d'habitude se ramener à une seule maille avec une impédance équivalente

$$\begin{aligned} E_0 &= \underline{Z}_{\text{eq}} \underline{I} = \left( R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega} \right) \underline{I} \\ \Leftrightarrow \underline{I} &= \frac{E_0}{R + j \left( L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)} \quad \left. \begin{array}{l} 1/j = -j \\ \text{Forme canonique} \end{array} \right\} \\ \Leftrightarrow \underline{I} &= \frac{E_0/R}{1 + j \left( \frac{L}{R}\omega - \frac{1}{RC\omega} \right)} \end{aligned}$$

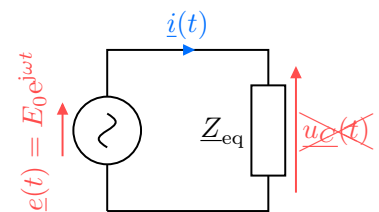


FIGURE E7.2

On identifie alors :

$$\frac{L}{R} = \frac{Q}{\omega_0} \quad \text{et} \quad \frac{1}{RC} = Q\omega_0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\frac{1}{RC}}{\frac{L}{R}} = \frac{Q\omega_0}{\frac{Q}{\omega_0}} \Leftrightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{et} \quad \frac{L}{R} \times \frac{1}{RC} = Q^2 \Leftrightarrow Q^2 = \frac{1}{R^2} \frac{L}{C}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}} \quad \text{et} \quad \boxed{Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

D'où le résultat. ■

### I/B) 2 Solution réelle

#### Propriété E7.2 : $i(t)$ RLC série en RSF

L'intensité réelle s'écrit donc  $i(t) = I(x) \cdot \cos(\omega t + \varphi_i(x))$

##### Amplitude réelle

$$I(x) = |\underline{I}| = \frac{E_0/R}{\sqrt{1 + Q^2 \left(x - \frac{1}{x}\right)^2}}$$

##### Phase

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

avec  $\varphi_i \in \left]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right[$

#### ♥ Démonstration E7.2 : $i(t)$ RLC série en RSF

##### Amplitude réelle

C'est évident.

##### Phase

$$\varphi_i = \underbrace{\arg(E_0/R)}_{=0} - \arg\left(1 + jQ \left(x - \frac{1}{x}\right)\right)$$

$$\Rightarrow \tan(\varphi_i) = -\tan(\arg(\underbrace{1}_{\text{Re}>0} + jQ \left(x - \frac{1}{x}\right)))$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\varphi_i = -\arctan\left(Q \left(x - \frac{1}{x}\right)\right)} \quad \text{avec} \quad \boxed{\varphi_i \in \left]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right[}$$

### I/B) 3 Notion de résonance et bande passante

Par l'étude de l'amplitude, on retrouve bien que  $\underline{I}$  ne dépend pas des conditions initiales, mais bien de l'amplitude d'entrée et surtout **dépend de la pulsation**. Notamment, on trouve que

$$I \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0 \quad \text{et} \quad I \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0$$

Ainsi, il y a une valeur particulière de pulsation telle que l'amplitude est maximale : c'est ce qu'on appelle la **résonance**.

### Définition E7.2 : Résonance

Un oscillateur forcé présente une résonance si l'**amplitude de ses oscillations est maximale** pour une **fréquence de forçage finie et non nulle**.

La fréquence correspondante est appelée **fréquence de résonance**  $f_r$  (ou  $\omega_r$  ou  $x_r$ ).

Soit, pour une amplitude complexe  $\underline{X}(\omega)$ ,

$$\exists \text{résonance} \Leftrightarrow \boxed{\exists \omega_r \neq (0, +\infty) : X(\omega_r) = X_{\max}}$$

La représentation de l'amplitude en fonction de la pulsation est donc piquée autour de son maximum  $X_{\max}$  à la pulsation de résonance  $\omega_r$ . Ce pic peut être plus ou moins fin, ce que l'on caractérise par la **bande passante**

### Définition E7.3 : Bande passante

C'est le domaine de pulsations du forçage défini par :

$$\text{bande passante} \triangleq \{\omega \mid X(\omega) \geq X_{\max, \text{eff}} = \frac{X_{\max}}{\sqrt{2}}\}$$

On définit alors :

◇  $\omega_1$  et  $\omega_2$  les **pulsations de coupure**, telles que

$$X(\omega_{1,2}) = \frac{X_{\max}}{\sqrt{2}}$$

◇ la **bande passante**  $\Delta\omega = |\omega_2 - \omega_1|$  ;

◇ l'**acuité de la résonance**  $\omega_r / \Delta\omega$ .

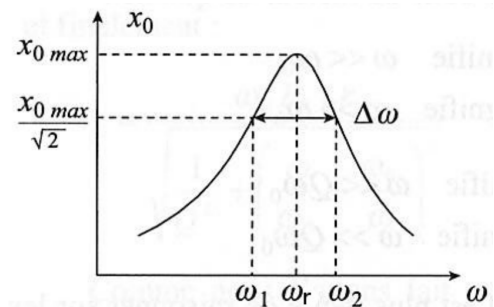


FIGURE E7.3 – Bande passante et pic de résonance.

## I/B) 4 Comportements à la résonance

### ♥ Propriété E7.3 : Résonance en intensité RLC série

La pulsation de résonance en intensité est :

$$\boxed{\omega_r = \omega_0} \Leftrightarrow \boxed{x_r = 1}$$

#### Amplitude de résonance

$$I(x_r) = I_{\max} = \frac{E_0}{R}$$

#### Phase à la résonance

$$\varphi_i(x_r) = 0$$

### ♥ Démonstration E7.3 : Résonance en intensité RLC série

#### Amplitude de résonance

On trouve la résonance en trouvant le **maximum de l'amplitude réelle**.

Ici, comme le numérateur est constant, il suffit d'avoir le **dénominateur minimal** :

$$I(x_r) = I_{\max} \Leftrightarrow \underbrace{1 + Q^2 \left( x_r - \frac{1}{x_r} \right)^2}_{\geq 0} \text{ minimal}$$

$$\Leftrightarrow Q^2 \left( x_r - \frac{1}{x_r} \right)^2 = 0 \Leftrightarrow x_r = \frac{1}{x_r}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{x_r = 1} \quad \text{ou} \quad \boxed{\omega_r = \omega_0}$$

### Phase à la résonance

On reprend l'étude de l'argument faite précédemment :

$$\tan(\varphi_i(x_r)) = -Q \left( x_r - \frac{1}{x_r} \right) = 0 \Leftrightarrow \boxed{\varphi_i(x_r) = 0} \quad \text{car} \quad \varphi_i \in \left] -\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right[$$

### I/B) 5 Bande passante et facteur de qualité

Nous avons déterminé l'amplitude et la phase du signal, ainsi que la pulsation de résonance. Pour finir de caractériser la résonance, il ne reste qu'à déterminer la bande passante.

#### ♥ Propriété E7.4 : Bande passante et facteur de qualité

Plus le facteur de qualité est grand, plus la résonance est sélective. On relie la bande passante à la pulsation propre et au facteur de qualité *via* la relation :

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

On retrouve l'acuité de la résonance.

#### ♥ Démonstration E7.4 : Bande passante et facteur de qualité

On cherche donc les pulsations de coupure réduites telles que  $I(x_k) = I_{\max, \text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$  :

$$\begin{aligned} I(x_k) &= \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \\ \Leftrightarrow \frac{E_0/R}{\sqrt{1 + Q^2 \left( x_k - \frac{1}{x_k} \right)^2}} &= \frac{E_0/R}{\sqrt{2}} && \left. \begin{array}{l} \text{On remplace} \\ \text{On isole} \end{array} \right\} \\ \Leftrightarrow Q^2 \left( x_k - \frac{1}{x_k} \right)^2 &= 1 \\ \Leftrightarrow Q \left( x_k - \frac{1}{x_k} \right) &= \pm 1 \\ \Leftrightarrow Q x_k^2 - Q &= \pm 1 \\ \Leftrightarrow Q x_k^2 \mp x_k - Q &= 0 && \left. \begin{array}{l} \times x_k \\ -\pm = \mp \end{array} \right\} \end{aligned}$$

On a alors deux trinôme, soit quatre racines possibles.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta &= 1 + 4Q^2 \\ \Rightarrow x_{i,\pm} &= \frac{\pm 1 \pm \sqrt{1 + 4Q^2}}{2Q} && \left. \begin{array}{l} \text{Solutions} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

On ne garde que les racines positives, sachant que  $\boxed{\sqrt{1 + 4Q^2} > 1}$  :

$$x_1 = x_{k,-,+} = \frac{1}{2Q} \left( -1 + \sqrt{1 + 4Q^2} \right) \quad \text{et} \quad x_2 = x_{k,+,+} = \frac{1}{2Q} \left( 1 + \sqrt{1 + 4Q^2} \right)$$

puis on obtient la bande passante en calculant la différence  $|x_2 - x_1|$  :

$$x_2 - x_1 = \frac{1 + \sqrt{1 + 4Q^2} - (-1 + \sqrt{1 + 4Q^2})}{2Q} \Leftrightarrow \Delta x = \frac{1}{Q} \Leftrightarrow \Delta w = \frac{\omega_0}{Q}$$

■

### Important E7.1 : À retenir pour $\underline{I}$

- ◇ Il n'y a **aucune condition** pour avoir résonance : celle-ci existe peu importe le facteur de qualité ;
- ◇ La **pulsation de résonance** est égale à la **pulsation propre** ;
- ◇ L'**amplitude maximale** ne **dépend pas** de  $Q$  ;
- ◇ La **phase à la résonance** est **nulle**.

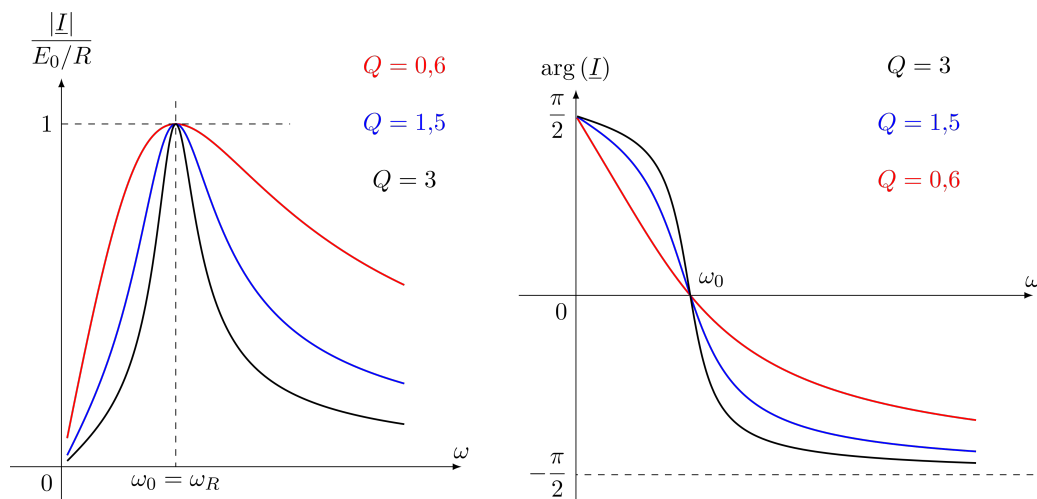


FIGURE E7.4 – Amplitude et phase en fonction de  $Q$  pour  $\underline{I}$  en RLC série.

## I/C Étude de la tension $u_C$

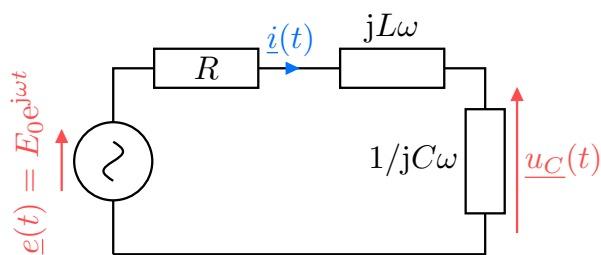
On repart du circuit en complexes, avec  $\underline{u}_C(t) = \underline{U}_C e^{j\omega t}$  et  $\underline{e}(t) = E e^{j\omega t}$ , et on applique le pont diviseur de tension.

**I/C) 1** Amplitude complexe  $\underline{U}_C$

### Propriété E7.5 : Amplitude complexe $\underline{U}_C$

L'amplitude complexe de la tension du condensateur d'un RLC série s'écrit :

$$\underline{U}_C(x) = \frac{E_0}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}} \quad \text{avec} \quad x = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

♥ Démonstration E7.5 : Amplitude complexe  $\underline{U}_C$ FIGURE E7.5 – RLC série : étude de  $\underline{u}_C$ .

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \frac{1/jC\omega}{R + jL\omega + 1/jC\omega} E_0 \\ \Leftrightarrow \underline{U} &= \frac{E_0}{1 - (LC\omega)^2 + jRC\omega} \\ \Leftrightarrow \underline{U} &= \frac{E_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j\frac{\omega}{Q\omega_0}} \end{aligned}$$

(multiplication par  $\times jC\omega$ )  
 $\omega_0$  et  $Q$  ■

## I/C) 2 Solution réelle

Propriété E7.6 :  $u_C(t)$  RLC série en RSF

La tension réelle s'écrit donc  $u_C(t) = U_C(x) \cdot \cos(\omega t + \varphi_u(x))$

## Amplitude réelle

$$U(x) = |\underline{U}| = \frac{E_0}{\sqrt{(1 - x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2}}$$

## Phase

$$\tan(\varphi_u(x)) = -\frac{x}{Q(1 - x^2)}$$

avec  $\varphi_u \in ]-\pi; 0[$

♥ Démonstration E7.6 :  $u_C(t)$  RLC série en RSF

## Amplitude réelle

C'est évident.

## Phase

$$\begin{aligned} \varphi_u &= \underbrace{\arg(E_0)}_{=0} - \arg\left(1 - x^2 + j\frac{x}{Q}\right) \\ &\Rightarrow \tan(\varphi_u) = -\tan\left(\overbrace{\arg\left(1 - x^2 + j\frac{x}{Q}\right)}^{\in ]0; \pi[}\right) \\ &\quad \text{avec } \underbrace{\operatorname{Re} \leq 0}_{\text{et } \underbrace{\operatorname{Im} > 0}} \\ \Leftrightarrow \tan(\varphi_u(x)) &= -\frac{x}{Q(1 - x^2)} \\ \text{avec } \varphi_u &\in ]-\pi; 0[ \quad \blacksquare \end{aligned}$$

## I/C) 3 Comportements à la résonance

## ♥ Propriété E7.7 : Résonance en tension du RLC série

La résonance en tension n'existe pas toujours :

$Q \leq 1/\sqrt{2}$  : pas de résonance, l'amplitude est maximale pour

$$x = 0 \quad \text{et} \quad U(0) = E_0$$

$Q > 1/\sqrt{2}$  : La résonance existe, l'amplitude est maximale pour

$$\boxed{x_r = \frac{1}{Q} \sqrt{Q^2 - \frac{1}{2}} < 1} \quad \text{et} \quad \boxed{U(x_r) = \frac{QE}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}}$$

$Q > 5$  :

$$\boxed{x_r \approx 1} \Leftrightarrow \boxed{\omega_r \approx \omega_0} \quad \text{et} \quad \boxed{U(x_r) \approx QE}$$

### ♥ Démonstration E7.7 : Résonance en tension du RLC série

#### Condition de résonance

On trouve le maximum de l'amplitude quand le dénominateur est **non nul** et minimal, c'est-à-dire

$$U(x_r) = U_{\max} \Leftrightarrow (1 - x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2 \text{ minimal}$$

Soit  $X = x^2$ , et  $f(X) = (1 - X)^2 + \frac{X}{Q^2}$ , la fonction que l'on cherche à minimiser : on cherche  $X_r$  tel que sa **dérivée s'annule**, c'est-à-dire

$$\begin{aligned} f'(X_r) &= 0 \\ \Leftrightarrow -2(1 - X_r) + \frac{1}{Q^2} &= 0 && \left. \begin{array}{l} \text{On dérive} \\ \text{On isole} \end{array} \right\} \\ \Leftrightarrow X_r - 1 &= -\frac{1}{2Q^2} \Leftrightarrow X_r = 1 - \frac{1}{2Q^2} \\ \Leftrightarrow x_r &= \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \Leftrightarrow \boxed{x_r = \frac{1}{Q} \sqrt{Q^2 - \frac{1}{2}}} && \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} X_r = x^2 \end{aligned}$$

ce qui n'est défini **que si**  $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Si  $Q < \frac{1}{\sqrt{2}}$ , alors le maximum se trouve en  $\omega = 0$ , ce qui n'est **pas une résonance** puisqu'il n'y a alors **pas d'excitation**.

#### Amplitude de résonance

On calcule alors  $f(X_r)$  en injectant la solution :

$$\begin{aligned} f(X_r) &= \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right)\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right) \\ \Leftrightarrow f(X_r) &= \left(\frac{1}{2Q^2}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} - \frac{1}{2Q^4} \\ \Leftrightarrow f(X_r) &= \frac{1}{4Q^2} - \frac{2}{4Q^4} + \frac{1}{Q^2} \\ \Leftrightarrow f(X_r) &= \frac{1}{Q^2} - \frac{1}{4Q^4} \\ \Leftrightarrow \boxed{f(X_r) &= \frac{1}{Q^2} \left(1 - \frac{1}{4Q^2}\right)} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Même dénominateur} \\ \text{On calcule} \\ \text{On factorise} \end{array} \right\}$$

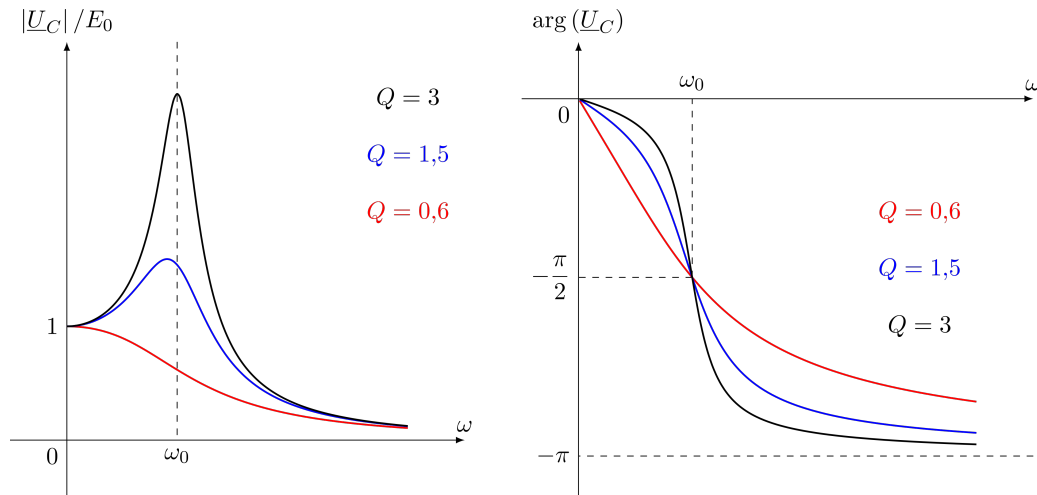
Dans  $U(x)$  :

$$\begin{aligned} \Rightarrow U(x_r) &= \frac{E_0}{\sqrt{f(X_r)}} \\ \Leftrightarrow U(x_r) &= \frac{E_0}{\frac{1}{Q} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} \\ \Leftrightarrow U(x_r) &= \frac{QE_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \sqrt{\quad} \\ \text{Simplifie} \end{array} \right\}$$



**Important E7.2 : À retenir pour  $\underline{U}_C$** 

- ◇ Il y a une condition pour avoir résonance,  $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$ , elle s'obtient par étude de fonction ;
- ◇ La pulsation de résonance est différente de la pulsation propre mais s'en rapproche avec  $Q \nearrow$  ;
- ◇ L'amplitude maximale dépend de  $Q$  :  $Q \nearrow \Rightarrow U_{\max} \nearrow$  ;
- ◇ La phase à la résonance est quelconque ;
- ◇ La phase à la pulsation propre est  $\varphi_u(\omega_0) = -\frac{\pi}{2}$  ;

FIGURE E7.6 – Amplitude et phase en fonction de  $Q$  pour  $\underline{I}$  en RLC série.**II Exemple d'un oscillateur mécanique en RSF****II/A Présentation****Définition E7.4 : Ressort amorti en RSF**

- ◇ **Système** : point matériel  $M$  de masse  $m$  relié à un ressort horizontal idéal.
- ◇ **Référentiel** :  $\mathcal{R}_{\text{sol}}$  terrestre supposé galiléen ;
- ◇ **Repère** :  $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y)$  avec  $\vec{u}_y$  ascendant vers le haut
- ◇ **Repérage** :

$$\overrightarrow{OM}(t) = \ell(t) \vec{u}_x ; \vec{v}(t) = \dot{\ell}(t) \vec{u}_x ; \vec{a}(t) = \ddot{\ell}(t) \vec{u}_x$$

**Bilan des forces :**

- 1) Poids  $\vec{P} = -mg \vec{u}_y$  ;
- 2) Réaction du support  $\vec{R} = R \vec{u}_y$  ;
- 3) Force de HOOKE  $\vec{F}_{\text{ressort}} = -k(\ell(t) - \ell_0) \vec{u}_x$  ;
- 4) Force de frottement fluide  $\vec{F}_{\text{frott}} = -\alpha \dot{x}(t) \vec{u}_x$  ;
- 5) Force excitatrice  $\vec{f}_e = F_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x$ .

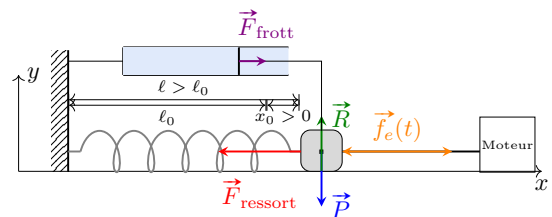


FIGURE E7.7 – Schéma du ressort en RSF.

## II/B Étude de l'élongation

### II/B) 1 Amplitude complexe $\underline{X}$

#### Propriété E7.8 : Amplitude complexe $\underline{X}_C$

L'amplitude complexe de l'élongation d'un ressort en RSF s'écrit :

$$\underline{X} = \frac{F_0/k}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}} \quad \text{avec} \quad x = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha}$$

#### Démonstration E7.8 : Amplitude complexe $\underline{X}_C$

Avec le PFD :

$$\Leftrightarrow m \begin{pmatrix} \frac{d^2\ell}{dt^2} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k(\ell(t) - \ell_0) - \alpha \frac{d\ell}{dt} + F_0 \cos(\omega t) \\ -mg + R \end{pmatrix}$$

La projection sur  $\vec{u}_y$  montre que  $\vec{R} = -\vec{P}$ . Sur l'axe  $\vec{u}_x$ , avec le changement de variable  $x(t) = \ell(t) - \ell_0$ , on trouve

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos(\omega t) \Leftrightarrow$$

$$\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos(\omega t) \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{et} \quad \frac{\omega_0}{Q} = \frac{\alpha}{m} \Rightarrow Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha}$$

En passant en complexes,  $\left( (j\omega)^2 + \frac{\omega_0}{Q} j\omega + \omega_0^2 \right) \underline{X} = \frac{F_0}{m}$

$$\Leftrightarrow \left( -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0 Q} + 1 \right) \underline{X} = \frac{F_0}{\omega_0^2 m}$$

$$\Leftrightarrow \underline{X} = \frac{F_0/k}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}}$$

$$\begin{array}{l} \div \omega_0^2 \\ \downarrow \\ m\omega_0^2 = k \\ x = \omega/\omega_0 \end{array}$$

■

#### Attention E7.1 : Attention notation !

Il peut arriver très vite de confondre  $x(t)$  la position et  $x = \omega/\omega_0$  la pulsation réduite... faites attention.

### II/B) 2 Solution réelle

#### Propriété E7.9 : $x(t)$ ressort amorti en RSF

L'élongation réelle s'écrit donc  $x(t) = X \cdot \cos(\omega t + \varphi_u)$

##### Amplitude réelle

$$X(x) = |\underline{X}| = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1 - x^2)^2 + \left(\frac{x}{Q}\right)^2}}$$

##### Phase

$$\tan(\varphi_x(x)) = -\frac{x}{Q(1 - x^2)}$$

avec  $\varphi_u \in ]-\pi; 0[$

## II/B) 3 Comportements à la résonance

## ♥ Propriété E7.10 : Résonance en élongation

La résonance en tension n'existe pas toujours :

$Q \leq 1/\sqrt{2}$  : pas de résonance, l'amplitude est maximale pour

$$x = 0 \quad \text{et} \quad X(0) = \frac{F_0}{k}$$

$Q > 1/\sqrt{2}$  : La résonance existe, l'amplitude est maximale pour

$$x_r = \frac{1}{Q} \sqrt{Q^2 - \frac{1}{2}} < 1 \quad \text{et} \quad X(x_r) = \frac{Q F_0 / k}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$$

$Q > 5$  :

$$x_r \approx 1 \Leftrightarrow \omega_r \approx \omega_0 \quad \text{et} \quad X(x_r) \approx Q \frac{F_0}{k}$$

## II/C Résonance en vitesse

## II/C) 1 Amplitude complexe

♥ Propriété E7.11 : Amplitude complexe V

L'amplitude complexe de la vitesse d'un ressort en RSF s'écrit :

$$\underline{V}(x) = \frac{F_0/\alpha}{1 + jQ \left( x - \frac{1}{x} \right)} \quad \text{avec} \quad x = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha}$$

♥ Démonstration E7.9 : Amplitude complexe V

$$\begin{aligned} v(t) = \frac{dx}{dt} &\Leftrightarrow \underline{V} = j\omega \underline{X} \\ \Leftrightarrow \underline{V} &= \frac{F_0}{k} \frac{j\omega}{1 - x^2 + j\frac{x}{Q}} \\ \Leftrightarrow \underline{V} &= -\frac{F_0}{k} \frac{x\omega_0}{j - jx^2 - \frac{x}{Q}} && \left. \begin{array}{l} \times \frac{j}{j} \\ \omega = x\omega_0 \end{array} \right\} \\ \Leftrightarrow \underline{V} &= \frac{F_0}{k} \cdot \frac{x}{x} \cdot \frac{\omega_0}{\frac{1}{Q} - j\left(\frac{1}{x} - 1\right)} && \left. \begin{array}{l} \text{Factorise par } x \\ \times \frac{Q}{Q} \end{array} \right\} \\ \Leftrightarrow \underline{V} &= \frac{F_0}{k} \cdot \frac{Q\omega_0}{1 + jQ \left( x - \frac{1}{x} \right)} && \left. \begin{array}{l} \frac{Q\omega_0}{k} = \frac{1}{\alpha} \end{array} \right\} \\ \underline{V}(x) &= \frac{F_0/\alpha}{1 + jQ \left( x - \frac{1}{x} \right)} \quad \blacksquare \end{aligned}$$

II/C) 2

 Amplitude réelle

**Propriété E7.12 : Résonance en vitesse**

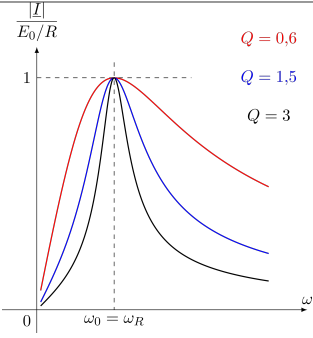
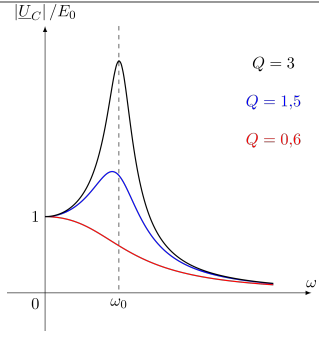
On trouve alors

$$V_{\max} = V(\omega_0) = \frac{F_0}{\alpha} \quad \text{et} \quad V \xrightarrow[\omega \rightarrow 0^+]{\quad} 0 \quad \text{et} \quad V \xrightarrow[\omega \rightarrow +\infty]{\quad} 0$$

De ce résultat, nous observons qu'il **n'y a pas de condition pour avoir résonance en vitesse**, et que **la pulsation de résonance est la pulsation propre du système**.

### III Synthèse

**Important E7.3 : Synthèse résonances**

Grandeur	Intensité/vitesse	Tension/élongation
Existence	Toujours	$Q > 1/\sqrt{2}$
Pulsation de résonance	$\omega_0$	$\omega_r \lesssim \omega_0$
Largeur de résonance	$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$	$\Delta\omega \approx \frac{\omega_0}{Q}$
Aspects à $\omega_r$	Maximum d'amplitude Déphasage nul, $\varphi = 0$	Maximum d'amplitude
Aspects à $\omega_0$	Résonance	Sortie = $Q \times$ entrée Quadrature de phase, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$
Courbes d'amplitude		
Courbes de phase	