

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

## 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 :

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{Z} \quad \text{avec} \quad Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad \text{et} \quad \underline{E} = E_0$$

#### ♥ 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

FIGURE E7.2

On identifie alors :

 $\Leftrightarrow$ 
 $\Leftrightarrow$ 

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

Phase

avec

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

Amplitude réelle

Phase

C'est évident.

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

et

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 réelle  $X(\omega)$ ,

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 :

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

◇ la **bande passante**

◇ l'**acuité de la résonance**

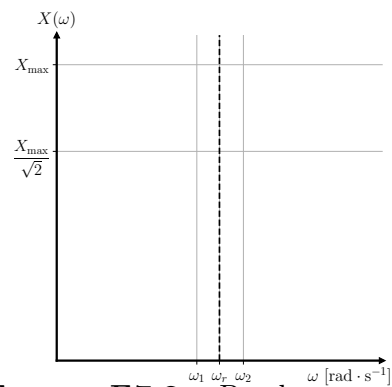


FIGURE E7.3 – Bande passante.

I/B) 4

Comportements à la résonance

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

La pulsation de résonance en intensité est :

$\Leftrightarrow$

Amplitude de résonance

Phase à la résonance

### ♥ 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** :

$\Leftrightarrow$  $\Leftrightarrow$ **Phase à la résonance**

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

**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 :

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  $I(x_k) = I_{\max, \text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$  :

$$\begin{array}{lcl}
 \Leftrightarrow & = & \\
 & = & \text{On remplace} \\
 \Leftrightarrow & = & \text{On isole} \\
 & = & \sqrt{\cdot} \\
 \Leftrightarrow & = & \times x_k \\
 \Leftrightarrow & = & -\pm = \mp \\
 \Leftrightarrow & = & 
 \end{array}$$

On a alors **deux trinômes**, soit **quatre racines possibles**.

$$\begin{array}{lcl}
 \Rightarrow & = & \\
 \Rightarrow & = & \text{Solutions}
 \end{array}$$

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

et

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

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

◇

◇

◇

◇

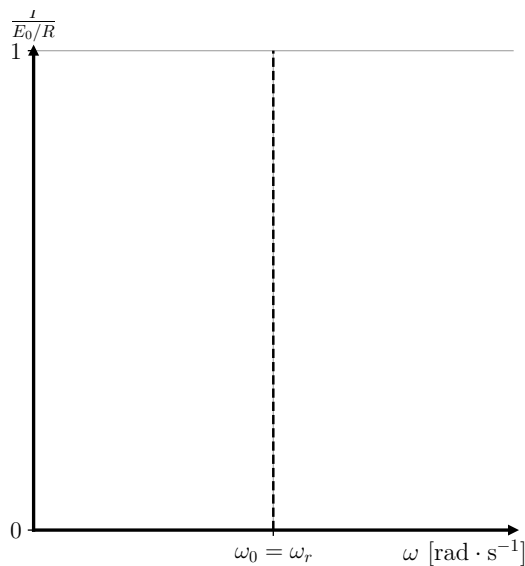


FIGURE E7.4 –  $|\underline{I}|$  selon  $Q$ .

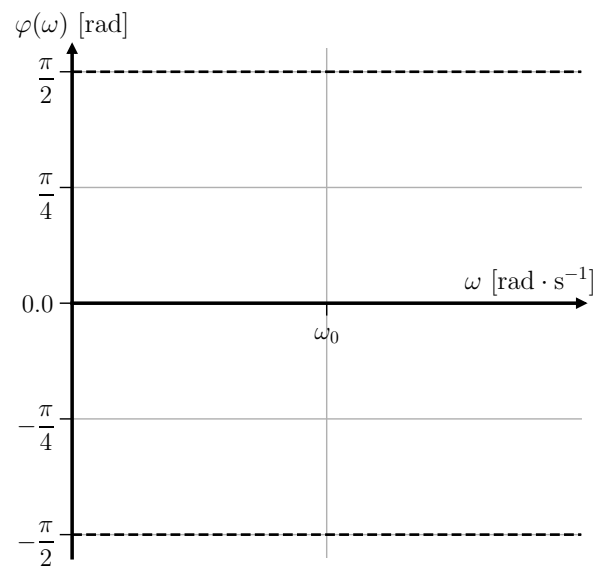


FIGURE E7.5 –  $\arg(\underline{I})$  selon  $Q$ .

## I/C Étude de la tension $u_C$

On repart du circuit en complexes, avec  $\underline{u}_C(t) = \underline{U}e^{j\omega t}$  et  $\underline{e}(t) = Ee^{j\omega t}$ , 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 :

avec

et

et

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

FIGURE E7.6 – RLC série : étude de  $\underline{u}_C$ .

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

Phase

avec

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

Amplitude réelle

Phase

C'est évident.

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

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

$Q > 5$  :

### ♥ 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

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

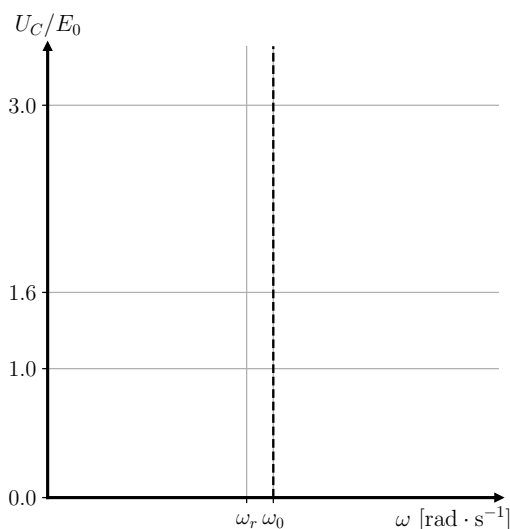
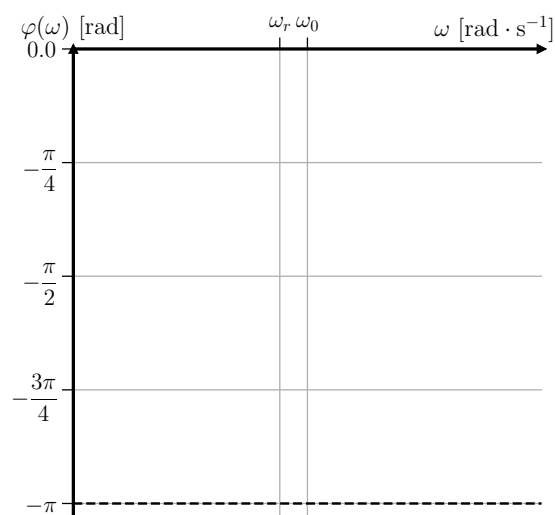
ce qui n'est défini **que si**  $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Si  $Q < \frac{1}{\sqrt{2}}$ , alors le maximum se trouve en  $\omega = 0$ , ce qui n'est **pas une résonance** puisqu'il n'y a alors **pas d'excitation**.

#### Amplitude de résonance

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

Dans  $U(x)$  :



Important E7.2 : À retenir pour  $\underline{U}_C$ FIGURE E7.7 –  $|\underline{U}|$  selon  $Q$ .FIGURE E7.8 –  $\arg(\underline{U})$  selon  $Q$ .

## 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** :

Bilan des forces :

- 1)
- 2)
- 3)
- 4)
- 5)

FIGURE E7.9 – 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 :

avec et et

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

Avec le PFD :

En passant en complexes,

■

### Attention E7.1 : Notations de pulsation réduites

Il peut arriver très vite de confondre  $x(t)$  la position et  $x = \omega/\omega_0$  la pulsation réduite, d'où la notation proposée de  $u = \omega/\omega_0$ , à ne pas confondre avec la tension. Soyez vigilant-es.

II/B) 2 Solution réelle

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

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

Amplitude réelle

Phase

avec

## II/B) 3 Comportements à la résonance

## ♥ Propriété E7.10 : Résonance en élongation

La résonance en élongation n'existe pas toujours :

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

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

$Q > 5$  :

## 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 :

avec

et

et

♥ Démonstration E7.9 : Amplitude complexe V

Propriété E7.12 : Résonance en vitesse

On trouve alors

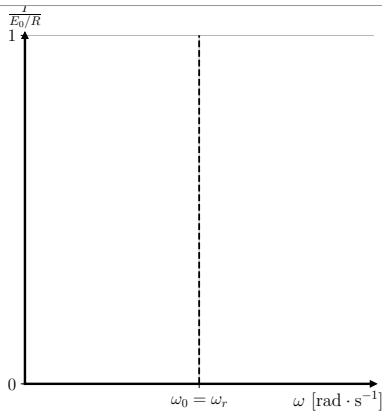
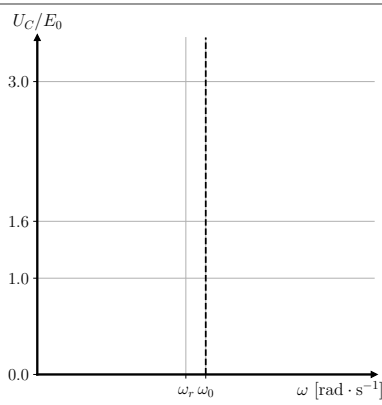
et

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		
Pulsation de résonance		
Largeur de résonance		
Aspects à $\omega_r$		
Aspects à $\omega_0$		
Courbes d'amplitude		
Courbes de phase	