

UE OPSFA6.791 Ingénierie

Systemes et capteurs

Présentation des enseignements d'Ingénierie de L3	3
1 TP - Caractérisation de quelques capteurs	9
2 Expérimentation & modélisation. Impédances complexes. Circuits RC et RL.	14
3 Expérimentation & modélisation. Circuits RLC	21

Licence Sciences et Ingénierie

3^{ème} année

Année 2023-2024

Version du 13 janvier 2025

Fabienne Bernard

Anthony JUTON

Patrick RUIZ

Jean-Charles VANEL

Présentation des enseignements d'Ingénierie de L3

Sommaire

1	Contexte et objectifs.....	4
2	Équipe pédagogique.....	5
3	Contenu et modalités d'évaluation. UE OP6.61.....	5
4	Travail demandé et modalités d'évaluation.....	5
4.1	Journal de TP et projet.....	6
4.2	Synthèses RLC.....	6
4.3	Projets.....	7

1 Contexte et objectifs

Les enseignements d'Ingénierie de 3^{ème} année de licence sont optionnels.

UE OPSFA5.774 Ingénierie. Filtrage. (2,5 ECTS -30 heures)

A l'issue de ces enseignements, les étudiants et étudiantes sont capables de :

- utiliser une carte de prototypage rapide de type Arduino afin d'interfacer un ordinateur et un circuit électronique (mesures, contrôle),
- réaliser des circuits réalisant des fonctions simples de filtrage,
- effectuer des mesures de dynamique sur ces systèmes électroniques,
- construire un modèle mathématique du fonctionnement de ces circuits.

Une grande partie de ces enseignements est réalisée sous forme de travaux pratiques d'électronique. Six heures sont consacrées à un mini-projet expérimental.

UE OPSFA6.791 Ingénierie. Systèmes et capteurs. (2,5 ECTS - 30 heures)

A l'issue de cette UE, les étudiants et étudiantes sont capables de :

- construire le modèle de la dynamique d'un système électronique simple (circuits de type RLC),
- reconnaître les différentes fonctions élémentaires d'électronique analogique (amplification / filtrage),
- réaliser des circuits réalisant ces fonctions (et adapter leurs paramètres).

Bien que cette UE utilise en prérequis les notions vues dans l'UE OPSFA5.774 il est possible de rejoindre cette option sans l'avoir suivie.

Une première partie est consacrée à l'association de différentes fonctions de filtrage en travaux pratiques d'électronique.

Une deuxième partie d'une quinzaine d'heures est consacrée à l'approche système à travers un projet innovant d'Ingénierie.

Les objectifs de ce projet sont de :

- imaginer la réalisation d'un système ayant une application concrète,
- concevoir les circuits permettant l'interfaçage à un microcontrôleur (par exemple Arduino) en vue le traitement des signaux de capteurs (de température, optique, ultra-sonores, etc) et éventuellement piloter des actionneurs,
- réaliser et valider le fonctionnement du système.

2 Équipe pédagogique

Anthony JUTON Professeur agrégé à l'ENS Paris-Saclay.

Patrick RUIZ Professeur agrégé à l'IUT de Cachan et à Polytech'Paris-Saclay.

Jean-Charles VANEL Ingénieur CNRS au LPICM et chargé d'enseignement à l'Ecole Polytechnique.

3 Contenu et modalités d'évaluation.

Cet enseignement comprend deux parties :

Partie 1 - 9h Modélisation et travaux pratiques sur les circuits de type RLC et différents capteurs.

Partie 2 - 21h Projet

Plus deux séances d'évaluation d'une durée totale de 3H.

Séance 01	2h	TP Capteurs (rappels)
	1h	<i>Projet : réflexions sur le système</i>
Séance 02	2h	Projet 1 validation du système, identification des fonctions, répartition des rôles, regroupement du matériel et préparation des commandes
Séance 03	2h	Expérimentation & Modélisation RL
	1h	<i>Projet : synoptique et spécifications</i>
Séance 04	2h	Expérimentation & Modélisation RLC Réponse temporelle
	1h	<i>Projet : Gantt et cahier de l'ingénieur</i>
Séance 05	3h	Exp. & Modélisation RLC Réponse fréquentielle
Évaluation	1h	QCM et <i>distribution du devoir de synthèse</i>
Séance 06	3h	Projet 2 et <i>rendu du devoir de synthèse</i>
	à	
Séance 10	3h	Projet 6
Évaluation	2h	Présentation du produit et description technique, démonstration du prototype

4 Travail demandé et modalités d'évaluation

La note de l'UE est composée de 3 contributions :

Note type I - 50% Séance 5 à 10 : suivi du travail en projet, présentation et démonstration.

Note type II - 30% Séance d'évaluation : Test QCM sur les RLC

Notes type III - 20% Journal de TP + une note de synthèse sur les circuits RLC.

4.1 Journal de TP et projet

Cet enseignement est en grande partie expérimental et il est indispensable que vous teniez à jour un espace numérique de travail par binôme ou groupe sur eCampus (zones de dépôt du journal de TP et un espace pour chaque projet).

Le journal de TP doit contenir tout ce qui peut être utile à une tierce personne pour refaire les mêmes expériences.

L'espace dédié au projet est la mémoire de tous les schémas, circuits et mesures que vous avez réalisés : les dépôts doivent être réalisés **au fur et à mesure de chaque séance. Il sera en particulier visé par les enseignant.e.s après chaque séance de projet.**

4.2 Synthèses RLC

Un travail de rédaction vous sera demandé, la problématique à traiter vous sera donnée lors de la séance avant les vacances. Cette problématique aura pour thème les circuits RLC, de leur mise en œuvre pratique à leur modélisation.

Évaluation des synthèses

Une synthèse de qualité répond à la problématique posée sous la forme d'un véritable article scientifique.

Elle répond à la problématique posée si :

- des circuits/schémas/ relevés de mesures donnent des éléments pertinents en réponse à la problématique.
- les interprétations des résultats sont correctes.

La forme est de bonne qualité si :

- le plan est apparent et pertinent,
- les figures sont correctement présentées (axes / légendes/ unités) et citées dans le texte,
- elle fournit des données en quantité raisonnable (pas toutes les mesures, mais en nombre suffisant)
- elle suit les consignes de format (noms, nombre de pages, introduction, etc.)

Une échelle de notation indicative est la suivante :

0/20 Note attribuée en cas d'absence non justifiée ou de plagiat.

- 5/20 Note sanction pour un rendu indigent (une page sans mise en forme ...c'est arrivé !)
- 8/20 Consignes non respectées. Echelles des graphes systématiquement manquantes, conditions expérimentales non précisées. . .
- 11/20 Des informations sont données et présentées correctement mais *l'exploitation des mesures est incorrecte.*
- 15/20 Démarche claire avec quelques erreurs d'interprétations. Présentation de bonne qualité.
- 20/20 Document du niveau d'un article scientifique. Toutes les mesures sont correctes, bien expliquées et exploitées pour répondre à la problématique posée.

4.3 Projets

D'une durée totale de 21h, ces projets d'Ingénierie sont découpés en 3 séances d'une heure et 5 séances de 3H, toujours encadrées par un.e enseignant.e. Ces séances sont consacrées à la conception, la commande, la mise en œuvre et le test d'un système piloté électroniquement grâce un calculateur interconnecté à des capteurs et éventuellement à des actionneurs. La définition des systèmes et des spécifications fait l'objet de 3 créneaux d'1 heure (en séances 2, 3 et 4).

Suivi de projet *A chaque séance, les enseignant.e.s évalueront :*

- Le soin apporté à la réalisation des prototypes (qualité du câblage, choix des instruments de mesure et leur réglage, qualité du code réalisé, lisibilité, modularité)
- L'autonomie (conception : choix de la solution, des composants et des algorithmes, réalisation : capacité à dépanner, à valider chaque sous-fonction séparément)
- le respect des spécifications établies en séance 3 et la tenue d'un journal de projet.

Ce qui constituera la note de suivi de projet.

Soutenances finales Lors des soutenances finales, les étudiant.e.s feront une démonstration du fonctionnement de leur prototype. Ils présenteront aussi oralement leur travail en fournissant la description de l'utilisation du système par un éventuel client, la description technique en détaillant les difficultés surmontées et les résultats des tests de validation des spécifications.

Séance 1

TP - Caractérisation de quelques capteurs

Objectifs de la séance : à l'issue de cette séance, vous serez capable de caractériser des capteurs courants en électronique.

Rappels importants : On attend de vous une prise de notes régulière et précise des dispositifs réalisés, des mesures obtenues et des problèmes rencontrés dans un journal de TP à déposer sur eCampus en pdf. Notez tout ce qui serait utile à une tierce personne pour refaire les mêmes expériences ! Justifiez rigoureusement les modèles électroniques que vous annoncez !

Sommaire

1	Caractéristiques de capteurs.....	10
2	Tracé de la caractéristique fréquentielle d'un capteur	11

1 Caractéristiques temporelles de capteurs

Dans cette partie, on s'intéresse à différents capteurs ou actionneurs électroniques dont des exemples sont donnés sur la figure 1.1 ci-dessous. L'objectif de cette partie est d'étudier les caractéristiques électriques de ces éléments.



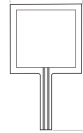
Capteur
ultrasonore



Haut-Parleur



Capteur
d'humidité



Capteur
de pression



Capteur
de lumière

FIGURE 1.1 CAPTEURS À TESTER

Q1 → Proposer et mettre en œuvre un protocole de mesure afin de répondre aux deux questions suivantes pour chacun des capteurs :

Le capteur est-il résistif, capacitif ou inductif ? Quel est l'ordre de grandeur de sa résistance ou de sa capacité ou de son inductance ?

Q2 Synthétiser dans un tableau les informations que vous avez déterminées sur chacun des capteurs.

Quelques informations sur les inductances : l'équation différentielle qui lit la tension aux bornes d'une inductance u_L et le courant i_L qui la traverse s'écrit

$$u(t) = L \frac{di}{dt}$$

, où L est la valeur de l'inductance qui s'exprime en Henry (H)

2 Tracé de la caractéristique fréquentielle d'un capteur

On définit la caractéristique fréquentielle d'un capteur par la grandeur (complexe) :

$$Z(j\omega) = \frac{\underline{U}(j\omega)}{\underline{I}(j\omega)}$$

où $\underline{U}(j\omega)$ désigne l'amplitude complexe de la tension aux bornes du capteur et $\underline{I}(j\omega)$ désigne l'amplitude complexe du courant qui traverse le capteur ; ω est la pulsation en rad/s ; $\omega = 2\pi f$ ou f est la fréquence en Hz.

Q3 Quelle est l'unité de la grandeur $|Z(j\omega)|$?

→ Proposer et mettre en œuvre un protocole de mesure afin de mesurer $|Z(j\omega)|$ pour une pulsation ω donnée.

→ Proposer et mettre en œuvre un protocole de mesure permettant d'afficher la courbe $|Z(j\omega)|$ en fonction de ω , en utilisant le mode "sweep" du GBF.

→ (Si vous avez le temps, voir encadré suivant) Proposer et mettre en œuvre un protocole de mesure afin de réaliser le tracé de la courbe $Z(j\omega)$ en fonction de ω .

Pilotage du GBF avec une horloge externe

- Produire une impulsion d'amplitude 5V et de période correspondant à la durée du balayage souhaitée
- Utiliser le signal précédent pour piloter le GBF. Pour cela :
 - appliquer ce signal sur le connecteur *Entrée* du GBF,
 - régler les paramètres du balayage
 - Mode : trigger
 - Source : external
 - Scope : positive
- Afficher sur l'oscilloscope, le signal numérique de pilotage du GBF et le signal de sortie.
- Établir le coefficient de proportionnalité entre la durée entre le signal de déclenchement et une position donnée en x et la fréquence appliquée par le GBF. Ainsi on peut déduire de la mesure de cette durée la fréquence en abscisse.

Séance 2

Expérimentation & modélisation. Impédances complexes. Circuits RC et RL.

Objectifs de la séance A l'issue de cette séance, vous serez capable de modéliser les circuits électroniques de type RC ou RL à l'aide des amplitudes complexes.

Important : On attend de vous une prise de notes régulière et précise des dispositifs réalisés, des mesures obtenues et des problèmes rencontrés dans un journal de TP à déposer sur eCampus en pdf. Notez tout ce qui serait utile à une tierce personne pour refaire les mêmes expériences ! Justifiez rigoureusement les modèles électroniques que vous annoncez !

Sommaire

1	Les amplitudes complexes de signaux harmoniques . .	14
2	Notion d'impédance complexe, cas d'un condensateur	15
3	Réponse en fréquence d'un circuit.....	16
3.1	Utilisation de la notion impédance complexe pour modéliser un circuit	16
3.2	Expérimentation	17
3.3	Modélisation.....	18

1 Les amplitudes complexes de signaux harmoniques

Rappel de la définition (semestre 5) : on considère un signal (une tension, un courant, ...) harmonique :

$$V_s(t) = S \cdot \cos(\omega t + \phi_s)$$

On a vu qu'une astuce de modélisation consiste à travailler avec les nombres complexes en notant :

$$V_s(t) = \mathcal{R}(S \cdot e^{j(\omega t + \phi_s)}) = \mathcal{R}(\underline{V}_s \cdot e^{j\omega t})$$

$\underline{V}_s \cdot e^{j\omega t}$ est une grandeur complexe dont la partie réelle correspond à un signal sinusoïdal.

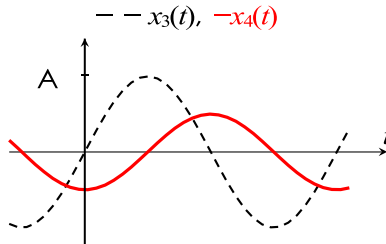
La grandeur $\underline{V}_s = S \cdot e^{j\phi_s}$ est appelée *amplitude complexe* du signal $V_s(t)$. Elle intègre l'*amplitude* du signal sinusoïdal (module du complexe \underline{V}_s) **et** le *déphasage* du signal sinusoïdal (argument ou angle du complexe \underline{V}_s).

Q1 Déterminer l'expression de l'amplitude complexe des signaux suivants :

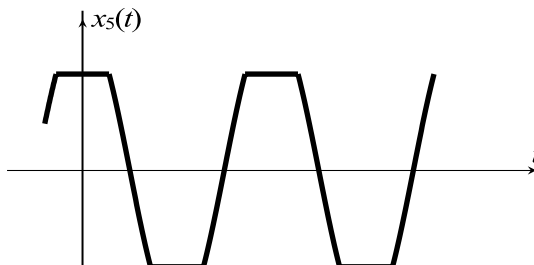
— $x_1(t) = 2 \cdot \cos\left(2\pi 100t + \frac{\pi}{3}\right)$

— $x_2(t) = 5 \cdot \sin(2\pi 300t)$

— Les signaux $x_3(t)$ et $x_4(t)$ dont l'évolution est représentée ci-dessous :



— Le signal $x_5(t)$ représenté ci-dessous (attention, piège!) :



2 Notion d'impédance complexe, cas d'un condensateur

On définit ici l'impédance complexe d'un simple condensateur.

Point de départ : l'équation liant le courant et la tension aux bornes d'un condensateur est :

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

Si la tension appliquée est sinusoïdale $v_C(t) = V_{C_{\max}} \cos(\omega t + \phi_e)$, le courant est lui aussi sinusoïdal, soit :

$$i_C(t) = -C\omega \cdot V_{C_{\max}} \sin(\omega t + \phi_e) = V_{C_{\max}} C\omega \cdot \cos\left(\omega t + \phi_e + \frac{\pi}{2}\right)$$

Utilisation des amplitudes complexes : on peut réécrire $i_C(t)$ et $v_C(t)$ à l'aide de la notation complexe :

$$i_C(t) = R(\underline{I}_C \cdot e^{j\omega t})$$

$$V_C(t) = R(\underline{V}_C \cdot e^{j\omega t})$$

L'équation différentielle conduit à une relation entre les "amplitudes complexes" :

$$\underline{I}_C = jC\omega \underline{V}_C$$

La grandeur

$$\underline{Z}_C(\omega) = \frac{\underline{V}_C}{\underline{I}_C}$$

est appelée *impédance complexe du condensateur*.

D'après l'équation précédente, son expression est :

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

Q2 Que vaut le module de l'impédance complexe quand ω tend vers 0 ? vers l'infini ? Est-ce cohérent avec vos connaissances antérieures sur le condensateur ?

3 Réponse en fréquence d'un circuit

On rappelle ci-dessous les circuits de base, étudiés au semestre 5 :

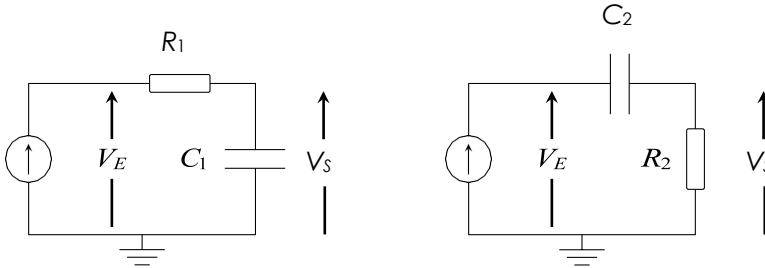


FIGURE 2.1 – Circuits RC et CR

3.1 Utilisation de la notion impédance complexe pour modéliser un circuit

Cette notion d'impédance complexe permet de calculer la réponse en fréquence d'un circuit sans avoir besoin de réécrire l'équation différentielle. Par exemple le circuit RC de la figure 2.1, est schématisé par un circuit à impédance complexe :

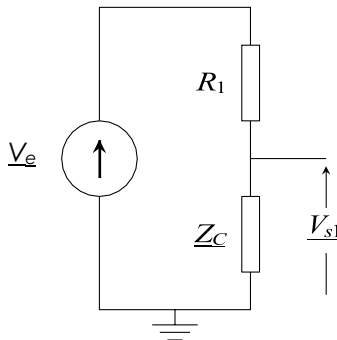


FIGURE 2.2 – Équivalent du circuit RC, utilisant les grandeurs complexes.

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

Le calcul d'un pont diviseur de tension permet d'obtenir l'amplitude complexe de la tension de sortie en fonction de celle de la tension d'entrée comme on le voit ci-dessous.

$$V_S = \frac{Z_C}{R_1 + Z_C} \cdot V_E = \frac{1}{1 + R_1 C_1 j\omega} \cdot V_E$$

Au final on retrouve bien l'expression de la réponse en fréquence établie lors du cours d'Ingénierie du semestre 5 :

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{1}{1 + R_1 C_1 j\omega}$$

Q3 Par cette méthode des impédances complexes, déterminer la réponse en fréquence du filtre CR.

3.2 Expérimentation

→ Réaliser un circuit de type RC ou CR.

Q4 Quel est comportement attendu du circuit : passe-haut ou bien passe-bas ? Quel est le type de signal qu'il faut placer en entrée du circuit pour mesurer la réponse en fréquence du circuit ?

→ Régler le générateur de fonction en mode SWEEP afin que s'affiche l'allure de la réponse en fréquence du circuit sur l'écran de l'oscilloscope. Choisir une durée de balayage de 1s environ. Enregistrer cet oscillogramme sur clé USB sans oublier de noter :

- les réglages du GBF,
- le schéma du circuit,
- et les valeurs des composants qui ont permis d'obtenir cette courbe.

→ Remplacer le condensateur par une inductance.

Q5 Comment l'allure de la réponse en fréquence est-elle modifiée ?

→ Enregistrer cet oscillogramme sur clé USB (sans oublier de noter tout ce qui nécessaire).

3.3 Modélisation

L'équation différentielle qui lie la tension aux bornes d'une inductance u_L et le courant i_L qui la traverse s'écrit :

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

où L est la valeur de l'inductance qui s'exprime en Henry(H)

Q6 Quelle est l'expression de l'impédance complexe d'une inductance ?

Q7 En déduire la réponse en fréquence d'un circuit LR ou RL.

Séance 3

Expérimentation & modélisation. Circuits RLC

Objectifs de la séance : A l'issue de cette séance, vous serez capable de :

- mesurer les caractéristiques d'un filtre passif du deuxième ordre (type R-L-C série),
- identifier les paramètres du circuit en fonction des valeurs des composants.

Important : On attend de vous une prise de notes régulière et précise des dispositifs réalisés, des mesures obtenues et des problèmes rencontrés dans un journal de TP à déposer sur eCampus en pdf. Notez tout ce qui serait utile à une tierce personne pour refaire les mêmes expériences ! Justifiez rigoureusement les modèles électroniques que vous annoncez !

Sommaire

1	Schémas des filtres à étudier	20
2	Expérimentations	21
2.1	Expériences qualitatives	21
2.2	Définition des grandeurs d'intérêt. Mesures	21
3	Modélisation	22
3.1	Modèle « canonique » et définitions complémentaires	22
3.2	Validation du modèle	23

1 Schémas des filtres à étudier

Lors de cette séance, on modélisera les calculs de fonction de transfert des différents filtres qu'il est possible d'obtenir à partir de l'association R-L-C série. Le calcul sera d'abord mené en utilisant les impédances \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 .

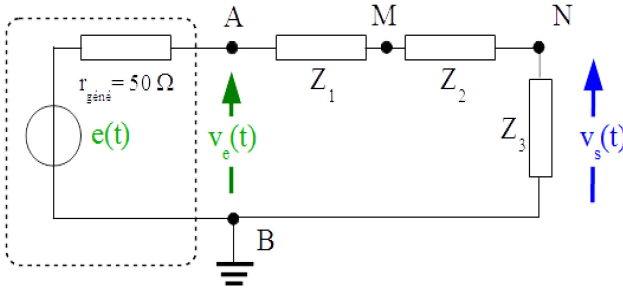


FIGURE 3.1 – Circuit \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 série

Q1 Donner l'expression de

$$\underline{T} = \frac{V_s}{V_e}$$

Q2 Calculer l'expression de l'impédance complexe $\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3$ avec l'une quelconque des combinaisons. Par exemple : \underline{Z}_1 Résistance; \underline{Z}_2 Bobine réelle ; \underline{Z}_3 Capacité.

Q3 Calculer l'expression finale de $\underline{T} = \frac{V_s}{V_e}$ pour \underline{Z}_3 condensateur.

Quel serait l'effet d'une permutation de \underline{Z}_1 et \underline{Z}_2 ?

2 Expérimentations

2.1 Expériences qualitatives

→ Réaliser un filtre RLC (avec Z_3 condensateur) et afficher l'allure de la réponse en fréquence du circuit sur l'oscilloscope.

ex. $R = 1\text{k}\Omega$; $C = 10\text{nF}$; $L = 100\text{mH}$

→ Modifier la valeur de la résistance et observer les modifications apportées au fonctionnement du circuit.

Même question lors d'une modification de la valeur du condensateur.

2.2 Définition des grandeurs d'intérêt. Mesures.

L'amplification statique G_0 (sans unité) d'un circuit est le gain à la fréquence nulle, c'est à dire pour une entrée constante (donc « statique ») :

$$G_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} |T(j\omega)| = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left| \frac{V_S(j\omega)}{V_E(j\omega)} \right|$$

Cette valeur est finie uniquement pour un filtre de type passe-bas.

La fréquence de résonance f_r (en Hz) d'un circuit résonant est la fréquence pour laquelle la réponse en fréquence présente une amplification maximale, notée G_{\max} .

Le coefficient de surtension se calcule uniquement lorsque G_0 est finie. Dans ce cas, c'est la valeur du ratio :

$$\frac{G_{\max}}{G_0} = \frac{\left| \frac{V_S}{V_E} \right|_{\max}}{\left| \frac{V_S}{V_E} \right|_{\omega \rightarrow 0}}$$

On remarque que si $\left| \frac{V_S}{V_E} \right|$ est constante, alors $\frac{G_{\max}}{G_0} = \frac{|V_S|_{\max}}{|V_S|_{\omega \rightarrow 0}}$.

Cette valeur (sans unité) est souvent exprimée en dB.

La pseudo-fréquence d'oscillation f_{osc} (en Hz) est la pseudo-fréquence des oscillations amorties qui apparaissent (dans certains cas) lors d'une modification brusque du signal d'entrée.

Q4 Déterminer les valeurs de ces grandeurs d'intérêt sur votre circuit. Et analyser comment sont modifiées ces grandeurs lors d'un changement des valeurs des différents composants.

3 Modélisation

3.1 Modèle « canonique » et définitions complémentaires

Les formes « canoniques » des fonctions de transfert sont des outils de modélisation très utilisés. L'expression de la fonction de transfert d'un filtre passe-bas dit du deuxième ordre, s'écrit sous la forme :

$$\underline{T}_{bas} = \frac{G_0}{1 + 2m \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right) + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2}$$

Q5 Cette fonction de transfert est-elle bien celle d'un filtre passe-bas ?

Q6 Tracer le tableau de variation de la courbe de $\left| \underline{T}_{bas} \right|$ en fonction de ω (il y a deux cas possibles).

Est-ce cohérent avec les observations précédentes ?

Q7 Un filtre RC est-il un filtre du second ordre? Et un filtre CR, ou LR ?

Les paramètres de cette fonction de transfert sont :

- la pulsation propre $\omega_0 = 2\pi f_0$ (en rad/s)
où f_0 (en Hz) est la fréquence propre,
- le coefficient d'amortissement m (sans unité),
ou le facteur de qualité $Q = \frac{1}{2m}$.

Un résultat remarquable du comportement de ce type de filtre en régime harmonique est le comportement à la fréquence propre f_0 . Le dénominateur est imaginaire pur et est égal à $[2jm] = \left[\frac{j}{Q} \right]$

3.2 Validation du modèle

La fonction de transfert du circuit RLC a pour expression générale :

$$\underline{T} = \frac{V_S}{V_E} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

où le dénominateur est toujours le même : $Z_1 + Z_2 + Z_3$. En notant

$$\underline{Z}_R = R; \underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}; \underline{Z}_L = jL\omega$$

on obtient pour toutes les combinaisons :

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = \underline{Z}_R + \underline{Z}_C + \underline{Z}_L = \frac{1 + jRC\omega + LC(j\omega)^2}{jC\omega}$$

Ce qui donne pour la fonction de transfert :

$$\underline{T} = \underline{Z}_3 \frac{jC\omega}{1 + jRC\omega + LC(j\omega)^2}$$

La forme canonique du second ordre associée à cette forme de fonction de transfert permet d'identifier le dénominateur à :

$$1 + jRC\omega + LC(j\omega)^2 = 1 + 2m \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right) + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2 = 1 + \frac{1}{Q} \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right) + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2$$

Q8 Donner les expressions des paramètres de la forme canonique (amplification statique, fréquence propre, coefficient d'amortissement, facteur de qualité) en fonction des valeurs des composants.

On peut montrer que :

$$f_r = \sqrt{1 - 2m^2} \cdot f_0 \text{ et } f_{osc} = \sqrt{1 - m^2} \cdot f_0$$

et que l'expression du coefficient de résonance est donnée par :

Comparer les valeurs données par le modèle à celles mesurées sur les circuits.