Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - DIPÔLES ET FILTRAGE

2022-2023

Bibliographie :

Table des matières

1 Condensateurs **3**
1.1 Mise en évidence qualitative . . . 3
1.2 Propriétés énergétiques (qualitatif) . . . 3
1.3 Charge et décharge à travers une résistance : comportement en régime transitoire . . . 3
1.4 Comportement en régime sinusoïdal forcé . . . 4
1.5 Application : filtrage passif . . . 5

2 Bobines **5**
2.1 Mise en évidence qualitative . . . 5
2.2 Propriétés énergétiques - Surtension (qualitatif) . . . 6
2.3 Établissement du courant dans un circuit RL et mesure d'une inductance . . . 6
2.4 Mesure d'une inductance . . . 6

3 Circuit RLC **7**
3.1 Optimisation du facteur de qualité via un amplificateur de gain unitaire . . . 7
3.2 Oscillations forcées . . . 7

Dans les leçons d'électronique que vous devez savoir présenter, vous serez amenés à monter et analyser des circuits électroniques passifs simples. Il est important pour cela d'être à l'aise sur les différentes lois qui les régissent, que cela soit pour une étude transitoire comme fréquentielle. Il est donc utile de pouvoir les retrouver rapidement dans la littérature, par exemple dans des livres de CPGE. Celles-ci ne seront pas rappelées dans le présent polycopié, et il est donc conseillé de s'entraîner à les retrouver, et vérifier leur bonne compréhension à chaque étape.

Notez que la simplicité apparente des schémas électroniques est malheureusement trompeuse car lors de tout montage réel, il est important de garder en tête les impédances effectives des générateurs et des appareils de mesure, ainsi que les défauts des composants réels par rapport à leur description idéale (en particulier les bobines et les condensateurs, le facteur le plus important étant la résistance des bobines).

Les deux premières parties s'intéressent à l'étude des condensateurs et bobines. Chacun de ces dipôles, associé à une résistance, permet de construire des filtres passifs du premier ordre, RC ou RL. La troisième partie étudie des circuits RLC comportant à la fois des condensateurs et des bobines, formant des filtres passifs du deuxième ordre.

1 Condensateurs

Il en existe de divers types : composants discrets non polarisés, boîtes à décade, boîtes permettant l'association de plusieurs condensateurs en parallèle (quelle est la capacité résultante de cette association ?), condensateurs électrochimiques polarisés de plus forte capacité (attention à leur sens d'utilisation pour ne pas les claquer !).

1.1 Mise en évidence qualitative

Alimenter une LED haute luminosité sous une tension d'environ 5 V, en série avec un condensateur de capacité de 1 mF (préalablement déchargé). Pour décharger le condensateur, on le court-circuitera à l'aide d'un fil. Lorsqu'on enlève le fil de court-circuit, on observe la diminution progressive de l'intensité lumineuse émise par la LED. Lorsque le condensateur est chargé, plus aucun courant ne circule dans le circuit et la LED est éteinte.

1.2 Propriétés énergétiques (qualitatif)

Les condensateurs permettent de stocker de l'énergie. Pour l'illustrer, à l'aide d'une alimentation à courant continu, charger un condensateur de capacité 10 F. Débrancher ensuite le condensateur du générateur puis le brancher aux bornes d'une LED. On observe que le condensateur permet d'allumer la LED (c'est le principe du flash des appareils photos). Lorsque le condensateur est déchargé, la LED s'éteint.

1.3 Charge et décharge à travers une résistance : comportement en régime transitoire

Réaliser le montage de la figure ci-dessous. Le générateur est en mode créneaux de période $T = 1/f$ d'amplitude minimale $-V_0$ et d'amplitude maximale $+V_0$. L'équation différentielle donnant la tension aux bornes du condensateur U_c est $\frac{\mathrm{d}U_c(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau}U_c(t) = \frac{1}{\tau}E_{\mathrm{GBF}}(t)$ avec $\tau = RC$. Lorsque le condensateur bascule de $-V_0$ à $+V_0$ à l'instant t_1 la tension aux bornes du condensateur s'écrit $U_c(t) = -V_0 + 2V_0\left(1 - e^{-(t-t_1)/\tau}\right)$. Lorsque le condensateur bascule de $+V_0$ à $-V_0$ à l'instant t_2 la tension aux bornes du condensateur s'écrit $U_c(t) = V_0 - 2V_0\left(1 - e^{-(t-t_2)/\tau}\right)$.

Pour observer la charge et la décharge complète du condensateur, il faut que la période $T = 1/f$ soit grande devant la durée caractéristique de charge et de décharge du condensateur $\tau = RC$. À titre d'exemple, on peut choisir $R = 10\,\mathrm{k\Omega}$, $C = 50\,\mathrm{nF}$ ce qui donne $\tau = 5\,10^{-4}\,\mathrm{s}$. Dans ce cas, pour satisfaire la condition $T \gg \tau$ on choisira une fréquence de 100 Hz pour le générateur. L'amplitude crête à crête du générateur est de 5 volts.

Visualiser à l'aide de l'oscilloscope la tension aux bornes du GBF ainsi que la tension aux bornes du condensateur. À l'aide des curseurs de l'oscilloscope mesurer le temps que met la tension aux bornes du condensateur pour

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

atteindre 63.2 % de sa valeur maximale. Ce temps correspond à τ. Comparer votre mesure expérimentale de τ à la valeur estimée à partir des valeurs de R et C.

Nous allons maintenant utiliser le logiciel Latis Pro pour acquérir la tension aux bornes du condensateur en fonction du temps lors de sa charge. On laissera l'oscilloscope branché pour s'assurer que tout se passe bien. Brancher la sortie du GBF sur l'entrée EA0 de la carte d'acquisition et la tension aux bornes du condensateur sur la voie EA1. Choisir EA0 comme source de déclenchement en sens montant avec un seuil à 0V. Pour les paramètres expérimentaux, sélectionner 2500 points et un temps d'échantillonnage de $2\,\mu$s, soit une durée d'acquisition totale de 5 ms. Lancer ensuite l'acquisition pour obtenir les courbes EA0 et EA1. Modéliser la charge du condensateur à l'aide de la formule ci-dessus. En extraire τ et comparer la valeur obtenue à la valeur estimée à partir des valeurs de R et C. On utilisera l'outil de modélisation de Latis Pro. Entrer un modèle utilisateur de la forme $-A+2A(1-e^{-X/B})$ et choisir de bonnes valeurs initiales pour les paramètres d'ajustement A et B (A = 2.5 et B = 5e-4 avec les valeurs expérimentales suggérées ci-dessus).

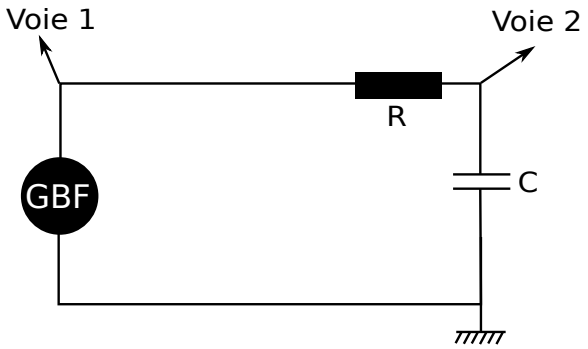

FIGURE 1 – Circuit RC

1.4 Comportement en régime sinusoïdal forcé

Le montage de la figure ci-dessous vous permet de mesurer simultanément à l'oscilloscope les tensions aux bornes du condensateur et de la résistance (et de déduire de cette dernière mesure le courant dans le circuit). Le transformateur d'isolement est nécessaire, car il permet d'imposer librement l'emplacement de la masse dans le circuit secondaire, qui est initialement en "masse flottante". Sans ce dernier, il est clair que la résistance serait court-circuitée car les masses du GBF et de l'oscilloscope sont reliées via leurs prises de terre. Attention à cependant garder en tête que ce transformateur d'isolement rajoute des bobines dans le circuit, qui peuvent jouer un rôle à haute fréquence !

Effectuer le montage, vérifier que les phases du courant et de la tension sont décalées de $\frac{\pi}{2}$, estimer la capacité du condensateur. Utiliser une fréquence de l'ordre de $1/RC$ (pourquoi ?).

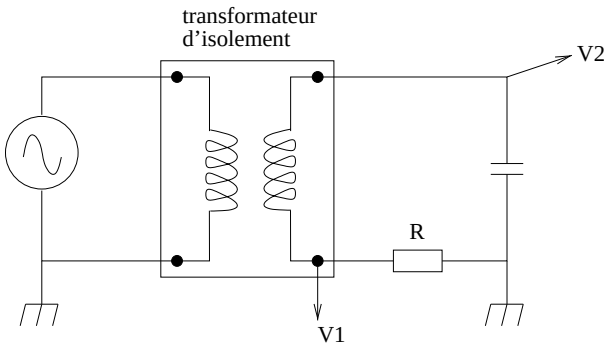

FIGURE 2 – S'affranchir de la masse du GBF

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

1.5 Application : filtrage passif

Écrire la fonction de transfert des deux filtres de la figure ci-dessous. De quels types sont-ils (passe-bas, passe-bande, passe-haut...) ? De quel ordre ?

Faire une étude expérimentale détaillée du filtre passe-bas, en branchant un GBF à l'entrée du circuit et en observant à l'oscilloscope les signaux d'entrée et de sortie. Vous pouvez notamment chercher la fréquence caractéristique du filtre, pour laquelle le module de la fonction de transfert est divisé par $\sqrt{2}$ par rapport à sa valeur maximale, et comparer cette fréquence à la valeur attendue. Pour plus de précision vous pouvez utiliser deux voltmètres en mode AC à la place de l'oscilloscope ainsi qu'un phase-mètre pour mesurer le déphasage relatif.

Observer la courbe de Lissajous en mode XY, faire varier la fréquence de part et d'autre de la fréquence caractéristique. Comment déduire la phase de la fonction de transfert à partir de cette figure ?

Quelle est l'allure du signal de sortie si l'on applique à l'entrée du filtre passe-bas une tension en créneaux de fréquence bien plus élevée que la fréquence caractéristique du filtre ?

Vous pouvez aussi étudier quantitativement l'évolution de la fonction de transfert (module et phase) en relevant une série de points à différentes fréquences. Noter que la notion de diagramme de Bode est explicitement hors programme en BCPST.

Pour une visualisation rapide de l'allure de la fonction de transfert en fonction de la fréquence, vous pouvez utiliser la fonction wobbulation (balayage) du GBF : cette fonction permet de faire évoluer la fréquence de sortie du générateur au cours du temps. A un instant donné la fréquence est proportionnelle à une tension de rampe interne qui est récupérable sur une des prises BNC du GBF (nommée généralement "sweep out"). En reliant cette dernière à la voie 1 de l'oscilloscope et en mettant la sortie du filtre sur la voie 2, l'enveloppe de la figure observée en mode XY vous donne l'allure de la dépendance en fréquence du module de la transmittance. On peut éventuellement rajouter un détecteur de crête (avec une diode et un circuit RC) à la sortie du filtre pour récupérer l'enveloppe du signal. Consulter les ouvrages pour plus de détails.

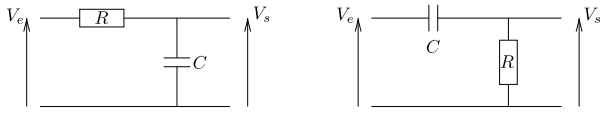

FIGURE 3 – Filtres RC

2 Bobines

Plusieurs types de bobine sont à votre disposition : composants discrets, boîtes à décade, bobines Leybold pour transformateur démontable, bobine de cuivre enroulée sur support de bois avec noyau de fer. L'étude des propriétés des bobines n'est plus explicitement au programme des classes préparatoire, mais il vous faut tout de même avoir quelques notions. Le principal défaut des bobines par rapport à leur comportement idéal est une résistance effective qui peut être importante, due à la longueur de fil parcouru en DC. On peut l'obtenir en appliquant la loi d'Ohm locale au fil parcouru par le courant. Cette résistance augmente à haute fréquence en raison de l'effet de peau.

2.1 Mise en évidence qualitative

Alimenter une ampoule mignonnette en série avec une inductance d'environ 2 H (prendre deux bobines à noyau de fer en série). Qu'observe-t-on à la fermeture du circuit ?

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

2.2 Propriétés énergétiques - Surtension (qualitatif)

Faire circuler un courant d'environ 1 A (contrôler à l'ampèremètre) dans un circuit formé d'un interrupteur et d'une inductance d'environ 1 H. Observer l'étincelle sur l'interrupteur à l'ouverture du circuit. Vous pouvez aussi observer le même phénomène en remplaçant l'interrupteur par une lime sur laquelle on fait glisser une pointe (utiliser une pince crocodile pour connecter la lime).

Ce phénomène de surtension est utilisé dans les ballasts d'allumage des "tubes néons". Réaliser le circuit de gauche de la figure ci-dessous, avec une tension du générateur nettement inférieure à celle d'allumage du néon, observer son illumination à l'ouverture du circuit.

Le circuit de droite de la figure permet aussi de mettre en évidence ce phénomène ; à quoi sert la diode ? Attention à la placer dans le bon sens.

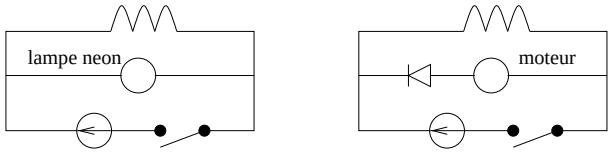

FIGURE 4 – Propriétés énergétiques des bobines

Remarque : Les deux parties qui suivent sont facultatives. Commencez par réaliser les expériences sur le circuit RLC avant de vous y attaquer.

2.3 Établissement du courant dans un circuit RL et mesure d'une inductance

Cette expérience est conceptuellement similaire à celle d'observation de la charge du condensateur dans une résistance (et peut donc être omise si vous manquez de temps) : on réalise un circuit comprenant un interrupteur, une résistance et une bobine, et on mesure à l'ordinateur la tension aux bornes de la résistance (pour en déduire le courant). À la fermeture de l'interrupteur le régime permanent s'établit avec une constante de temps que l'on peut déterminer par un ajustement de la courbe mesurée.

2.4 Mesure d'une inductance

Le montage de la figure ci-dessous vous permet de montrer que la tension aux bornes d'une inductance est proportionnelle à la dérivée de l'intensité du courant qui la traverse, et de déterminer son inductance L. Réaliser ce montage en prenant par exemple une bobine sur support d'inductance 47 mH et pour R une résistance de 5 kΩ. La source est un GBF en triangles de fréquence 5 kHz, on observe à l'oscilloscope la tension aux bornes de R (proportionnelle au courant) et aux bornes de l'inductance. Le transformateur d'isolement est nécessaire pour ne pas avoir de problème de masse entre le GBF et l'oscilloscope. Vérifier que la valeur de L déterminée à partir du rapport entre la dérivée du courant et la tension aux bornes de l'inductance est en accord avec celle indiquée sur la plaquette. Observer l'évolution des signaux quand on change légèrement l'amplitude et la fréquence du signal du GBF.

Remarque : Dans cette expérience le choix des valeurs des composants et de la fréquence est assez crucial. On veut que la tension aux bornes de la bobine soit très proche de Ldi/dt, c'est-à-dire que l'on puisse négliger la tension ri due à la résistance interne de la bobine. Il faut donc travailler à une fréquence telle que $L\omega \gg r$. D'autre part on veut que le courant soit le plus proche possible d'un signal triangulaire. En considérant le circuit comme un filtre passe-bas on peut montrer que cela est vrai si la condition $(r+R) \gg L\omega$ est respectée.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

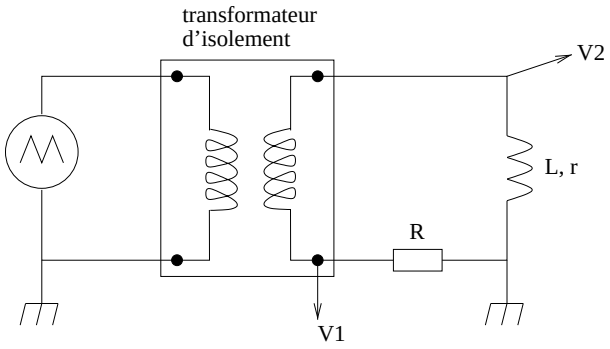

FIGURE 5 – S'affranchir de la masse du GBF pour un circuit RL

3 Circuit RLC

Remarque préliminaire : Il existe deux circuits RLC : le montage RLC série et le circuit RLC en parallèle. Dans ce TP nous nous concentrons sur le circuit RLC série.

3.1 Optimisation du facteur de qualité via un amplificateur de gain unitaire

Lors de l'étude des circuits RLC, il peut être difficile d'obtenir un facteur de qualité quelque peu supérieur à l'unité dans les circuits réels. Le facteur de qualité étant d'autant plus élevé que la résistance totale du circuit est petite, il est important de minimiser celle-ci. Or, les GBF ont une résistance de sortie de 50Ω, et les bobines d'inductance importante ont généralement une résistance de quelques centaines d'Ohm. Une des façons de diminuer au maximum la résistance totale du circuit est de ne pas rajouter de résistances additionnelles au circuit, ou alors simplement une résistance très basse (de quelques dizaines d'Ohm) pour effectuer les mesures d'intensité, résistance qu'on peut également faire varier pour étudier le circuit pour différentes valeurs de R. Une possibilité complémentaire est l'utilisation d'un amplificateur de gain 1 dont l'impédance de sortie est inférieure à 1 Ohm. En procédant ainsi, on s'affranchit de la résistance du GBF. Dans les montages ci-dessous, la source est la combinaison d'un GBF et d'un amplificateur de gain 1.

3.2 Oscillations forcées

Vous pouvez à présent réaliser le montage de la figure ci-dessous et faire l'étude complète de la fonction de transfert de ce filtre.

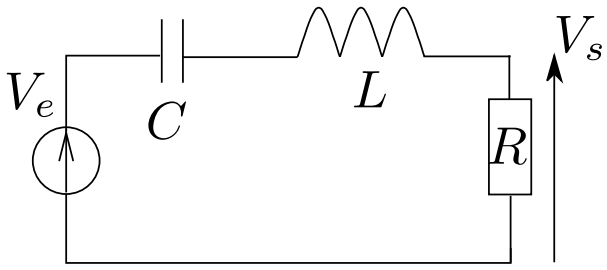

FIGURE 6 – Oscillations forcées d'un circuit RLC (Utilisez des composants ajustables : boîtes à décades)

Note sur le choix des composants

- Choisir L et C pour avoir une fréquence propre d'environ 10 kHz.
- Choisir R pour avoir un facteur de qualité assez grand. Il est nécessaire de tenir compte de toutes les sources de résistance du circuit (cf discussion sur l'optimisation du facteur de qualité). Le fait que la résistance de la

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

bobine augmente avec le carré de la fréquence pour des fréquences élevées peut être une source d'incertitude importante.

Les astuces pour faire un montage bien contrôlé

- Toujours utiliser la synchronisation sur le signal d'horloge du GBF pour éviter la désynchronisation du signal aux faibles amplitudes.
- L'inductance précise d'une bobine varie avec la fréquence, il existe un appareil de mesure spécifique pour la déterminer (RLC-mètre), mais il ne prend les mesures qu'à certaines fréquences (ex : 100 Hz, 1 KHz, 10 kHz). Si vous souhaitez réalisez une comparaison quantitative entre théorie et expérience, visez une fréquence de résonance ou de coupure égale à la fréquence de mesure de l'appareil.
- Une solution alternative à l'utilisation d'un suiveur (éventuellement plus simple pour des élèves mais attention aux valeurs des composants) est d'utiliser un pont diviseur de tension 40 Ω/10 Ω en sortie du GBF. C'est la solution privilégiée dans le Quaranta.
- Utiliser un phasemètre pour repérer la résonance ou la fréquence de coupure d'un circuit, c'est la méthode la plus précise (mais elle ne dispense pas de l'observation en amplitude pour l'aspect pédagogique).
- Utiliser un fréquencemètre pour mesurer la fréquence d'excitation si elle n'est pas donnée par le GBF, ne pas utiliser la fréquence indiquée par l'oscilloscope numérique qui est peu précise.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.