DLST

UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

Travaux Pratiques et Travaux Dirigés

d'électricité en régime alternatif

L1 - Année 2019-2020
UE PHY 201

1 Organisation des Travaux Pratiques

1.1 Objectifs des Travaux Pratiques

Les Travaux Pratiques d'électricité vous permettront de vérifier des lois présentées en cours. De plus, ces TP vous permettront d'apprendre à tirer des conclusions rigoureuses à partir de résultats expérimentaux. Il s'agit là du fondement de toutes les sciences expérimentales : la conclusion d'une expérience doit être prouvée.

Il conviendra donc de mettre en pratique les techniques de calculs d'incertitudes qui vous ont été présentées au 1er semestre. Pour vous aider, nous avons inclus dans ce polycopié un chapitre intitulé « Rappel sur les incertitudes » (pages 3 et suivantes).

Nous avons également inclus un chapitre intitulé « Ce que vous devez savoir faire en TP » qui rappelle :

- toutes les étapes que l'on rencontre au cours d'un travail expérimental et que vous devrez savoir faire pour l'examen terminal de TP,
- ce qu'il convient de mettre dans un compte-rendu de TP.

1.2 Les séances

Il y a 4 séances de TP d'une durée de 3 heures 30 minutes. Les TP s'effectuent en demi-groupe et vous travaillerez en binôme. Tous les TP ont lieu aux 2ème ou 3ème étages du bâtiment B du DLST.

Le planning du semestre de votre groupe est affiché sur le panneau des TP de Physique situé dans le couloir du 3ème étage du bâtiment B du DLST. Il est également consultable sur le site de l'UE PHY201 :

https://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr/courses/PAX2PH21/index.php

(rubrique « Documents »). Pensez à consulter régulièrement ce site.

1.3 L'évaluation

La première séance de TP (« Utilisation de l'oscilloscope numérique ») est une séance d'apprentissage qui ne donnera pas lieu à un compte-rendu. Cependant, si vous ne réalisez pas soigneusement cette séance, vous ne comprendrez rien aux 3 séances suivantes.

Les 3 séances suivantes donneront lieu à un compte-rendu par TP et par binôme. Ce compte-rendu sera rédigé en cours de séance et sera rendu en fin de séance. *Tout ce que vous devez consigner dans un compte-rendu est rappelé un peu plus loin : pensez à vous y référer*.

Les notes de compte-rendu de TP, ainsi que les notes des tests (QCM) faits en TD, constitueront votre note de contrôle continu.

L'examen terminal sera un examen de TP individuel. L'examen a une durée de 2h30 et comporte à la fois une partie théorique et une partie pratique. **L'examen se déroulera donc en salle de TP.**

1.4 La préparation des séances

Chaque séance commence par un paragraphe intitulé « Travail de préparation ». Ce travail devra avoir été effectué individuellement avant la séance : il est indispensable à une bonne compréhension du TP. Le « Travail de préparation » sera ramassé par votre enseignant en début de séance (un devoir par étudiant) et il compte pour 20% dans la note de compte-rendu du TP.

1.5 Le règlement

La présence en TP est obligatoire : comme au premier semestre, vous devrez signer la feuille de présence à chaque séance. En cas d'absence à un TP, il faut :

1) Présenter un justificatif à l'administration (certificat médical, convocation au permis de conduire, ...)

2) Rattraper le TP dans un autre groupe : pour organiser cela, contacter votre enseignant ou le responsable des TP : Alain Drillat (bureau B 315 ou : Alain.Drillat@univ-grenoble-alpes.fr).

Sans rattrapage du TP, la note sera zéro…

2 Ce que vous devez savoir faire en TP et lors de l'Examen de TP

2.1 Pour ne pas perdre de temps

Avant de commencer des mesures, on gagne beaucoup de temps en procédant à une observation rapide et qualitative de la grandeur mesurée, car on peut alors :

- vérifier que l'on obtient bien le phénomène attendu,
- détecter tout de suite les erreurs éventuelles (erreur dans le montage, etc…),
- délimiter la plage intéressante à observer et vérifier que l'on ne sort pas du domaine de fonctionnement normal des appareils,
- choisir tout de suite les échelles des graphes à tracer.

2.2 Les mesures

Le relevé des mesures est l'étape capitale qui conditionne la qualité de tous les résultats ultérieurs. *Le relevé de mesures (tableau) devra toujours être fourni dans le compte-rendu*.

Pour réussir au mieux des mesures, il convient de :

- rechercher la meilleure précision possible (choix du bon calibre des appareils de mesure),
- faire un nombre de mesure suffisant (au moins une douzaine de points),
- tracer le graphe simultanément, car cela permet :
  - ° d'affiner les mesures dans la zone intéressante,
  - ° de multiplier les mesures dans les zones de fortes variations,
  - ° de refaire tout de suite les mesures autour des points qui semblent "bizarres".

2.3 Tracé d'un graphe

Le papier millimétré vous sera fourni.

Un graphe permet d'avoir une vision globale du phénomène étudié et de faire apparaître la loi de variation d'une grandeur physique. Pour qu'il soit "parlant" et facilement utilisable, il faut :

- choisir correctement les échelles : c'est un compromis entre l'utilisation de l'espace disponible sur la feuille et la facilité à manier des échelles simples (on ne doit pas être obligé de prendre une calculatrice pour placer les points),
- graduer les axes, régulièrement, avec des nombres "ronds" (multiples de 1, 2 ou 5),
- préciser, au bout de chaque axe, la grandeur et son unité,
- placer tous les points expérimentaux de manière apparente,
- indiquer les barres d'incertitude sur chaque point si possible (au cours des TP, le temps ne permet pas toujours de le faire),
- tracer la courbe la plus "lisse" possible en tenant compte de l'imprécision des points,
- tracer à la règle les parties qui semblent linéaires,
- mettre un titre explicite.

2.4 Echelles logarithmiques

Pour certains graphes, il est préférable d'effectuer un tracé en échelles logarithmiques (cf. § 8.5. du cours), notamment pour représenter le gain d'un filtre. Un tracé en échelles lin-log ou en échelles log-log ne change pas la physique, mais seulement la représentation d'une fonction.

Pour représenter le gain d'un filtre en fonction de la fréquence, on pourrait tracer $|H|$ en fonction de ω en échelles linéaires. Mais on préfère une représentation en échelles logarithmiques où l'on trace G_u en fonction de $\log10\ (\omega)$. Pour cela, on peut en pratique :

• soit utiliser du papier linéaire (papier millimétré normal) et tracer G_u en fonction de $\log_{10}(\omega)$ (calculer les valeurs de G_u et calculer les valeurs de $\log_{10}(\omega)$ puis les placer respectivement en ordonnée et en abscisse).

• soit utiliser du papier log-log (mais dans ce cas, il faut placer $|H|$ en ordonnée et ω en abscisse. Et on obtient alors un graphe homothétique à $G_u = f(\log_{10}(\omega))$.

• soit utiliser du papier lin-log (ou papier semi-log) : calculer les valeurs de G_u puis placer G_u sur l'axe lin en ordonnée et ω sur l'axe log en en abscisse

Lors de l'examen, vous aurez probablement le choix du papier millimétré. Le dernier type de tracé est recommandé.

2.5 Exploitation d'un graphe - incertitudes

Une fois que la courbe est tracée, les points expérimentaux ne doivent plus être utilisés pour l'exploitation des résultats. En particulier, la pente d'une droite se détermine à partir de deux points (éloignés) appartenant à cette droite et non pas à partir de deux points expérimentaux.

Expérimentalement, on ne peut pas accéder à la valeur rigoureusement exacte d'une grandeur physique, car toute mesure est nécessairement limitée en précision. Estimer cette imprécision permet de connaître la fourchette dans laquelle on est sûr de trouver la vraie valeur.

L'étude des incertitudes se déroule en plusieurs étapes (cf. rappel sur les incertitudes ci-après) :

• déterminer les différentes origines possibles de l'imprécision des mesures,

• calculer les incertitudes des mesures à partir des notices des appareils utilisés, ou les estimer,

• calculer les incertitudes de grandeurs physiques calculées à partir des relations données au S1.

Il faut ensuite s'en servir pour présenter correctement le résultat de la mesure :

• arrondir (majorer) le résultat du calcul d'incertitudes : un seul chiffre significatif,

• arrondir le résultat de la mesure en tenant compte de cette incertitude : pas de décimale de rang inférieur à celle sur laquelle porte l'incertitude,

• présenter le résultat final de la mesure suivi de son incertitude et de son unité.

Exemple : $x = 23{,}5 \pm 0{,}2$ cm ou $x = 235 \pm 2$ mm ou $x = 0{,}235 \pm 0{,}002$ m.

2.6 La rédaction d'un compte-rendu

Un compte-rendu est un travail de communication. En le rédigeant, vous devez avoir à l'esprit qu'il va être lu et qu'il doit être *compréhensible par un lecteur qui n'aurait pas été présent dans la salle lors du TP*. Pour cela, le compte-rendu doit comporter :

• une introduction générale indiquant les objectifs de la séance.

• une description de chacune des expériences avant toute observation et/ou mesure, en précisant tout ce que vous avez fait pour obtenir vos résultats (réglages particuliers, choix des calibres des appareils utilisés, etc....). Aidez-vous d'un schéma chaque fois que c'est possible.

• vos mesures : les mesures doivent être présentées sous forme de tableau. Elles doivent être correctement arrondies (voir plus loin) et doivent être accompagnées de leur incertitude.

• une conclusion qui doit être supportée par un calcul d'incertitudes. C'est à dire qu'il faut :

° vérifier que la valeur théorique tombe dans l'intervalle de la mesure,

° ou, dans le cas d'une comparaison entre 2 mesures, vérifier que les intervalles se recoupent,

° ou, dans le cas où le calcul d'incertitude n'a pas été demandé, calculer l'écart relatif entre les 2 valeurs et vérifier qu'il n'est pas trop important (typiquement inférieur à 5%).

° au cas où l'accord n'est pas bon, on peut remettre le modèle en cause, mais il est en général plus constructif d'être critique vis à vis de son propre travail… c'est à dire qu'il faut rechercher les causes du désaccord (erreur de calcul, incertitudes sous-estimées, erreur systématique), et proposer des améliorations.

3 Rappel sur les incertitudes

3.1 Les incertitudes de mesure - définitions

3.1.1 Modes de détermination d'une grandeur physique (GP)

Pour déterminer une GP, on peut :

• soit effectuer une *mesure*, c'est-à-dire comparer directement la GP à son unité. Par exemple, mesurer une longueur avec un "mètre"

• soit utiliser une *relation physique* qui exprime la GP à déterminer en fonction d'autres GP sur lesquelles on peut effectuer des mesures. Par exemple, déterminer la vitesse moyenne d'un mobile à l'aide de la *relation* V = L/T où L (la distance parcourue) et T (le temps de parcours) sont des GP à mesurer.

Mais quel que soit le mode de détermination d'une GP, on est toujours conduit à effectuer des *mesures* qui sont, par nature, nécessairement entachées d'imprécision.

3.1.2 Les types d'incertitudes de mesure

On distingue :

• **Les erreurs systématiques** (se reproduisant systématiquement de la même manière) qui peuvent être dues :

° aux appareils (décalage de zéro...)

° à la méthode de mesure (ex : montages « à courant vrai » ou « à tension vraie »)

• **Les erreurs aléatoires** (se produisant de façon incontrôlable en prenant une importance variable) qui peuvent être dues :

° aux appareils (frottements mécaniques, bruit de fond électronique, dérive dans le temps, dérive en température...)

° à une définition imprécise de la GP à mesurer (longueur d'une planche coupée de travers, intensité d'un courant électrique fluctuant...)

° à l'expérimentateur (appréciation de lecture d'un vernier, erreur de parallaxe...)

D'une manière générale, on peut dire que :

• **Les erreurs systématiques** sont chiffrables : on peut corriger la valeur trouvée pour la GP.

• **Les erreurs aléatoires** ne sont pas chiffrables de manière précise; tout au mieux on peut en *estimer un ordre de grandeur*, *en valeur absolue*, qui constitue justement ce que l'on appelle *l'incertitude* sur la valeur de la GP et dont l'étude fait l'objet de cette partie du cours.

3.1.3 Incertitude absolue / Incertitude relative

On peut exprimer les incertitudes sous deux formes différentes : absolue ou relative :

• **L'incertitude absolue (IA)** sur une GP, est la *valeur absolue* du plus grand écart *estimé* entre la valeur trouvée par la mesure, x_m, et la valeur vraie, x_v (que l'on ignore évidemment). L'incertitude absolue est notée Δx et elle est toujours positive. Par suite, on peut dire que : $x_v \in [x_m-\Delta x, x_m+\Delta x]$, ce que l'on écrit symboliquement : $x_v = x_m \pm \Delta x$

Exemple : nous voulons mesurer une GP qui est la longueur d'un crayon. Nous disposons pour cela d'une réglette, graduée en mm et parfaitement étalonnée, dont l'origine est exactement à l'une des extrémités de la réglette. On met côte à côte verticalement sur une table, le crayon et la réglette, cette dernière reposant sur son extrémité-origine de manière à rendre négligeable l'erreur sur la position du zéro. On constate alors que l'autre bout du crayon se trouve entre les graduations 116 et 117 mm de la réglette, sans que l'on puisse être plus précis, en raison de la parallaxe.

Il est donc raisonnable de poser d'une part : $x_m = 116{,}5$ mm et, sachant que l'on a nécessairement : $116 \text{ mm} < x_v < 117 \text{ mm}$, il est également raisonnable d'estimer que $\Delta x \approx 0{,}5$ mm. On écrira donc : $x_v = 116{,}5 \pm 0{,}5$ mm.

• **L'incertitude relative (IR)** sur une GP est le rapport de l'IA de cette GP : Δx, à la *valeur absolue* de la valeur trouvée par la mesure $|x_m|$. Elle s'écrit donc $\Delta x/|x_m|$. C'est une grandeur toujours positive qui s'exprime souvent en %.

Exemple : dans l'exemple précédent, l'IR est 0,5 / |116,5| = 0,00429 soit : $\Delta x / |x_m| \approx 0{,}4\%$.

3.2 Le calcul des incertitudes

3.2.1 Cas d'une GP mesurée directement avec un appareil de mesure

L'incertitude de l'appareil ou son mode de calcul est indiqué par le fabricant. Il faut donc consulter la notice de l'appareil. Il existe essentiellement deux types d'incertitudes instrumentales :

• **La précision est donnée sous la forme d'un simple pourcentage**

Ce pourcentage est alors directement l'IR.

Exemple : la résistance d'une boite de résistances est indiquée sur son boitier : 0,2% pour la plupart de celles utilisées en TP ; on a donc $\Delta R/R = 0{,}2\%$ **quelle que soit R** (aucun calcul à faire) et l'IA est alors : $\Delta R = (0{,}2 / 100) \times R$.

• **Les appareils numériques (cf. posters en salles de TP)**

L'incertitude est donnée sous la forme d'un pourcentage auquel s'ajoute un chiffre parfois suivi de la lettre « D » (pour « digit »). Ce chiffre est alors à multiplier par la sensibilité de l'appareil (la plus petite variation que l'appareil peut détecter, donc l'unité de la plus petite décimale affichée).

Exemple : on mesure avec un ampèremètre numérique un courant de 12,54 mA et le fabricant indique pour ce calibre une précision de 0,3% + 2D. Soit : $\Delta I = [(0{,}3/100) \times 12{,}54] + [2 \times 0{,}01] = 0{,}05762$ mA que l'on arrondira (un seul chiffre significatif) à 0,06 mA. Finalement on écrira : $I = 12{,}54 \pm 0{,}06$ mA.

3.2.2 Calcul à partir du tracé d'un graphe

Sur un graphe, chaque point du graphe possède une incertitude à la fois en abscisse et en ordonnée (ex : graphe de la caractéristique d'un dipôle en électricité, U = f(I) : U et I sont issus de mesures et ont donc chacun une incertitude). L'incertitude de chaque point est alors représentée sur le graphe par un rectangle dont le point est le centre et dont la largeur et la longueur ont pour valeurs 2 ΔU et 2 ΔI (on parle de « barres d'erreurs »). Lorsqu'on trace la courbe de tendance il faudra faire en sorte que chaque rectangle soit traversé par la courbe.

Dans le cas particulier où le graphe est une droite, et qu'on cherche à déterminer l'incertitude sur le coefficient directeur « a » de cette droite, il convient de tracer les 2 droites de pentes extrêmes (min et max) mais qui passent chacune **par tous les rectangles**. L'incertitude Δa de la pente a sera donnée par $\Delta a = \frac{a_{max}-a_{min}}{2}$ et a sera donnée par $a = \frac{a_{max}+a_{min}}{2}$.

En TP, on n'aura en général pas le temps de placer les barres d'erreurs sur chacun des points du graphe et l'incertitude ne sera qu'estimée.

3.2.3 Cas d'une grandeur physique non directement mesurée

Procédé général :

Soit une grandeur physique G dépendant de plusieurs autres grandeurs x, y, z, … : $G = f(x,y,z)$. A chaque grandeur x, y, z est associée une incertitude ΔX, Δy, Δz. Pour calculer l'incertitude ΔG sur G, on réalise un calcul par propagation de l'erreur :

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\Delta z\right)^2}$$

Cas simple où G est une somme (ou une différence) de grandeurs physiques : G = x + y ou G = x - y :

On a alors : $\Delta G = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$

Cas simple où G est proportionnelle à une grandeur physique : G = kx :

On a alors : $\Delta G = k\ \Delta x$.

Cas simple où « G » est un produit (ou un quotient) de grandeurs physiques : G = x.y ou G = x/y :
On a alors : $\frac{\Delta G}{G} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2}$

N.B. : quelle que soit l'incertitude, on passe de l'incertitude relative à l'incertitude absolue en multipliant par G : $\Delta G = G \times \frac{\Delta G}{G}$

Exemple :

On détermine une résistance en faisant le rapport de la tension électrique U sur l'intensité I : R = U/I

L'incertitude relative de la résistance est donnée par l'expression : $\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$

3.3 Conclusion : « calculer les incertitudes, à quoi ça sert ? »

3.3.1 Ca sert à conclure rigoureusement

Soit M la mesure d'une GP. En général le travail demandé en TP consiste à comparer M avec la valeur que prévoit la théorie. Et la conclusion consiste donc à dire si l'accord entre les deux est bon ou non. Grâce au calcul d'incertitude, on obtient un critère rigoureux pour conclure : il suffit de vérifier si la valeur théorique tombe ou ne tombe pas dans l'intervalle de mesure [M-ΔM ; M+ΔM].

Au cas où ce ne soit pas le cas, il conviendra d'essayer d'en trouver la raison : erreur de calcul, incertitude sous-estimée... ou (plus rarement en TP) théorie inadaptée.

3.3.2 Ca sert à présenter un résultat correctement arrondi

• 1ère règle : comment arrondir le calcul d'incertitudes

Les calculs d'incertitudes sont toujours issus d'estimations, soit données par le fabricant de l'appareil de mesure, soit effectuées par vous-même. Le résultat d'un calcul à partir de données aussi peu précises, ne peut pas être précis. On prendra donc l'habitude de l'arrondir pour ne lui conserver qu'***un seul chiffre*** (ce chiffre est appelé « chiffre significatif », c'est à dire chiffre qui a du sens).

Ex : on réalise une mesure x = 119,35 mm, et la calculatrice donne une incertitude : Δx = 1,823792 mm. Il faut alors arrondir : Δx = 2 mm ou Δx = 0,2 cm ou encore Δx = 0,002 m (notez que dans ces 2 derniers cas, les zéros ne sont pas significatifs : ils n'apparaissent qu'à cause de l'unité choisie).

• 2ème règle : comment arrondir le résultat du calcul d'une GP (les chiffres significatifs)

Les décimales d'un rang inférieur à l'incertitude ne peuvent pas être connues compte-tenu de cette incertitude : ils ne sont pas « significatifs ». Il ne faut donc pas les écrire : la ***dernière décimale que l'on doit écrire est celle sur laquelle porte l'incertitude***.

En reprenant l'exemple ci-dessus : si x = 119,35 mm avec Δx = 2 mm, il faudra arrondir : x = 119 mm.

Notez bien que ce n'est pas une question de nombre de chiffres après la virgule : la virgule peut se déplacer à volonté – il suffit de changer d'unité – et ce n'est pas parce qu'on change l'unité avec laquelle on présente le résultat, que l'on change la précision de la mesure...

Finalement dans l'exemple précédent, il conviendra d'écrire : x = 119 ± 2 mm ou x = 11,9 ± 0,2 cm ou encore : x = 0,119 ± 0,002 m

Enoncés de Travaux Pratiques

Travaux Pratiques - Séance E1 : Utilisation de l'oscilloscope numérique

La première partie du TP vous permettra de découvrir les principales fonctions de l'oscilloscope. La seconde partie vous permettra d'effectuer des mesures sur un circuit simple. Ce TP constitue une étape essentielle pour mesurer et interpréter les phénomènes étudiés dans les TP suivants.

Comme pour les autres séances, il convient de préparer ce TP en répondant aux questions posées dans le § « travail de préparation ». Vous devrez, en cours de séance, vérifier les prévisions que vous aurez faites.

1 Principe de l'appareil

L'oscilloscope que vous allez utiliser au cours des séances qui vont suivre est un oscilloscope numérique à mémoire. Les réglages de l'oscilloscope sont expliqués en détail dans le polycopié intitulé « Oscilloscope numérique Tektronix TDS 210 » disponible en permanence dans les salles de TP, mais aussi par exemple ici :

http://materiel-physique.ens-lyon.fr/BDD/job/BDD/Notices/N037-001.pdf

Référez-vous régulièrement à de document.

Sur cet oscilloscope, les courbes que vous verrez apparaître à l'écran ne sont pas continues comme dans le cas d'un oscilloscope à balayage : elles sont le résultat d'un échantillonnage de 2500 points de mesure (répartis sur la largeur de l'écran) qui donnent l'impression d'une courbe continue.

2 Travail de préparation

2.1 Réglages préliminaires

On suppose qu'un GBF (Générateur Basse Fréquence) est branché sur la voie I de l'oscilloscope, qu'il est réglé sur la fonction « signal en créneaux » à une fréquence f = 1000 Hz et qu'il délivre une tension de 6,0 V crête à crête.

2.2 Vos prévisions

• Dessiner avec précision la forme du signal que vous souhaiteriez voir apparaître sur l'écran.

• Imaginons que l'on observe à l'écran, 16 périodes du signal, son amplitude maximale, mais pas son amplitude minimale, et que le signal défile sur l'écran. Préciser quels réglages il faut effectuer et quelles valeurs il faut donner à ces paramètres pour obtenir un signal stable et complètement visible à l'écran.

3 Réglages de l'appareil

Pour éviter la difficulté supplémentaire liée à la masse, qui sera abordée dans la 2ème séance, on utilisera ici un GBF « à masse flottante » le GF4.

• Réglages préliminaires : déroulez le menu « AFFICHAGE » et réglez le contraste à votre convenance. Si les indications à l'écran ne sont pas dans une langue qui vous convient, déroulez le menu « UTILITAIRE » et choisissez la langue que vous souhaitez.

• Brancher la sortie du GBF à la voie I (« CH 1 ») de l'oscilloscope. Choisir une tension sinusoïdale et régler la fréquence à environ 1 kHz et une amplitude moyenne (bouton d'amplitude à mi-course).

• Appuyer sur la touche « AUTOSET » de l'oscilloscope : celui-ci va prendre des réglages par défaut qui doivent lui permettre d'afficher le signal à l'écran.

• Quelles sont les unités des deux axes ?

• A quoi correspondent les deux tensions et la durée indiquées en bas à gauche de l'écran ? Le vérifier en tournant les 3 boutons de réglage correspondants.

• Déroulez deux fois le menu « CH 2 ». Que constatez-vous ? Refaites un « AUTOSET ». Conclusion ?

• Déroulez le menu « CH 1 ».

3.1 Couplage

• Pour comprendre le rôle du couplage, tourner le bouton « Décalage » (appelé parfois « offset ») du GBF. Ceci permet de rajouter une tension continue à la tension sinusoïdale délivrée par le GBF.

• Repérer la position 0 Volt sur l'écran de l'oscilloscope, et passer de la position « CC » à la position « CA ». Que constatez-vous ?

• Placez-vous en couplage « CC ».

3.2 Position

Avec « AUTOSET », si vous n'observez qu'une seule voie, la tension sera centrée à l'écran. Si vous observez deux voies, les traces seront décalées pour ne pas se superposer. Mais vous pouvez ensuite les déplacer à volonté.

• Vérifiez-le en tournant les curseurs « Position » de déplacement vertical.

• Observer également l'effet du curseur « Position » de déplacement horizontal.

• Se remettre en « AUTOSET ».

3.3 Déclenchement

Le réglage du seuil de déclenchement (« NIVEAU TRIGGER ») est un réglage essentiel d'un oscilloscope. C'est lui qui permet d'obtenir un signal stable à l'écran, condition nécessaire à son observation et aux mesures.

• Déplacez le NIVEAU et observez le déplacement de la petite flèche située à droite de l'écran, ainsi que l'indication en bas à droite de l'écran. Conclusion ?

• Que se passe-t-il lorsque le niveau devient supérieur à l'amplitude de la tension ?

• Placez le NIVEAU dans une position où le signal est stable. Remarquez la petite flèche placée au haut de l'écran : elle indique l'instant du déclenchement. Quelle est la valeur de la tension à cet instant-là ? Comparez avec la valeur indiquée en bas à droite de l'écran. Conclusion ?

• Déroulez le menu « trigger » et réglez le déclenchement sur un « front descendant ». Quelle différence observez-vous à l'écran ? Observez le petit signe en bas à droite de l'écran : il indique si le front est « montant » ou « descendant ».

• Observez ce qui se passe lorsque vous déclenchez sur la voie II.

<u>Remarque 1</u> : en mode « AUTOSET », la synchronisation (= déclenchement) est réglée par défaut sur un front montant au passage d'une valeur seuil égale à 50% de la valeur crête à crête (= différence entre la valeur maximum et la valeur minimum) du signal.

<u>Remarque 2</u> : il est parfois nécessaire de faire déclencher le signal que l'on cherche à observer en fonction d'une base de temps extérieure (par exemple le générateur), afin d'étudier le comportement d'une partie du circuit ou d'observer un signal trop faible pour déclencher le balayage : c'est le mode « TRIG EXT » qui impose de connecter cette référence à l'entrée appropriée sur l'oscilloscope.

3.4 Mode d'acquisition

• Déroulez le menu « ACQUISITION ».

Par défaut, le mode d'acquisition est réglé sur « NORMAL ». L'oscilloscope effectue alors constamment des acquisitions et les affiche à l'écran, ce qui donne l'impression d'un signal continu comme avec un oscilloscope analogique. Mais lorsque le signal est de mauvaise qualité ou a une amplitude très faible, il est intéressant, pour diminuer le bruit de fond, d'effectuer un grand nombre d'acquisitions et d'en faire la moyenne. C'est ce qui est réalisé en sélectionnant la fonction « MOYENNAGE ».

• Sélectionnez « MOYENNAGE » et « 128 » et observez la diminution du bruit de fond.

(Un autre mode que vous n'aurez pas à utiliser dans ces TP, est le mode « MONOCOUP » (menu « TRIGGER »), qui permet d'afficher à l'écran l'acquisition d'un évènement unique).

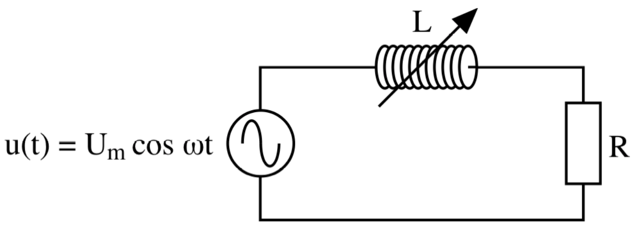
4 Mesures

4.1 Circuit

• Réaliser le montage ci-dessous où le GBF utilisé sera le GF4, et où R sera réglée à 200 Ω et L à 0,13 H.

• Branchez l'oscilloscope pour observer la tension aux bornes du générateur sur la voie I et la tension aux bornes de la résistance sur la voie II.

• Représentez le circuit et indiquez clairement les branchements de l'oscilloscope.



4.2 Mesure d'une tension

Les mesures sont grandement simplifiées avec l'oscilloscope numérique, puisqu'un grand nombre d'entre elles sont effectuées automatiquement.

• Déroulez le menu « MESURES » et observez les différentes mesures que l'appareil est capable d'effectuer automatiquement.

• Réglez la tension délivrée par le GBF à 6,0 V crête à crête ($U_{C\text{-}C} = 6{,}0$ V), soit une amplitude $U_m = 3{,}0$ V, et la fréquence à $f = 200$ Hz.

Remarque : quand la tension n'est pas périodique, l'appareil ne peut pas effectuer de mesures automatiques. Il convient alors d'effectuer les mesures « à la main ». Pour vous aider dans cette tâche, on utilise le menu « CURSEURS ».

On rappelle qu'une mesure de tension à l'oscilloscope est le produit de la distance d lue à l'écran et du calibre C (qui s'exprime en V/cm) : M = d.C

• Mesurez la tension crête à crête à l'aide des curseurs et comparez le résultat avec la mesure automatique. Estimez l'incertitude de lecture Δd. Calculez l'incertitude relative de lecture $\frac{\Delta d}{d}$. Quel calibre convient-il de choisir pour minimiser l'incertitude ?

• Les indications du constructeur sur la précision de l'appareil sont données à la fin du polycopié « oscilloscope numérique Tektronix TDS 210 ». Calculez l'incertitude relative totale $\frac{\Delta U_{C\text{-}C}}{U_{C\text{-}C}}$ sur la mesure de $U_{C\text{-}C}$ et en déduire l'incertitude absolue $\Delta U_{C\text{-}C}$. Conclusion : cette précision vous semble-t-elle bonne ?

• Mesurez cette tension avec un voltmètre numérique. Expliquez le résultat obtenu. Vérifiez votre explication en mesurant U_{eff} avec l'oscilloscope.

4.3 Mesure d'une période

• Le constructeur du générateur « GF4 » indique une incertitude relative de 3% sur l'appareil (lorsqu'il est neuf...). Calculer l'incertitude absolue sur f.

• Mesurer la période T' et la fréquence f' du signal à l'oscilloscope.

• A l'aide des indications du constructeur de l'oscilloscope, calculer l'incertitude relative totale $\frac{\Delta T'}{T'}$ sur la mesure de T'. Conclusion : cette précision vous semble-t-elle bonne ?

• En déduire l'incertitude absolue sur f'.

• Ces incertitudes suffisent-elles à expliquer la différence entre f et f' ? (si non, vous avez le droit de demander au responsable des TP de changer votre GBF...).

4.4 Mesure d'un déphasage

• Observez simultanément U_{GBF} et U_R. Quelle est la tension en avance ? A quoi le voyez-vous ?

• Mesurez le décalage horaire τ entre les 2 tensions en utilisant les curseurs, et en déduire le déphasage (en degrés et en radians) de la tension délivrée par le GBF par rapport au courant.

5 Application : impédance d'une bobine

Dans cette dernière partie, on se propose de retrouver expérimentalement l'expression de l'impédance d'une bobine.

On rappelle que l'impédance $Z = |\underline{Z}|$ d'un dipôle est le rapport entre l'amplitude de la tension à ses bornes et l'amplitude de l'intensité du courant qui le traverse.

Le montage est le même que précédemment.

• Quelles tensions doit-on observer pour faire cette étude ?

• Branchez les deux voies de l'oscilloscope pour mesurer ces deux tensions. Représentez le schéma du montage.

• Réglez la fréquence à 100 Hz. Faites varier l'amplitude de la tension délivrée par le GBF et observez les variations des amplitudes des deux tensions mesurées. Qualitativement (à l'oeil) que pensez-vous des variations du rapport U_{Bm}/I_m ?

Ce résultat est intéressant car il va vous permettre de faire varier U_{GBFm} au cours des mesures sans que cela change la valeur de Z (par exemple, si l'une des deux tensions devient trop petite et que le bruit de fond affecte la qualité de sa mesure, vous pourrez augmenter l'amplitude de la tension délivrée par le GBF pour augmenter cette tension et diminuer l'influence du bruit de fond).

• En faisant varier la fréquence dans la gamme 100 à 1000 Hz, et en vous aidant des consignes du paragraphe « tracé d'un graphe », en début de ce polycopié, tracer la courbe des variations de l'impédance de la bobine en fonction de f.

• En faisant varier l'inductance à fréquence fixe (f = 200 Hz), tracer la courbe des variations de Z en fonction de L.

• Conclusion : à partir des résultats expérimentaux précédents, proposer une expression littérale pour Z.

Travaux Pratiques - Séance E2 :
Le résonateur électrique

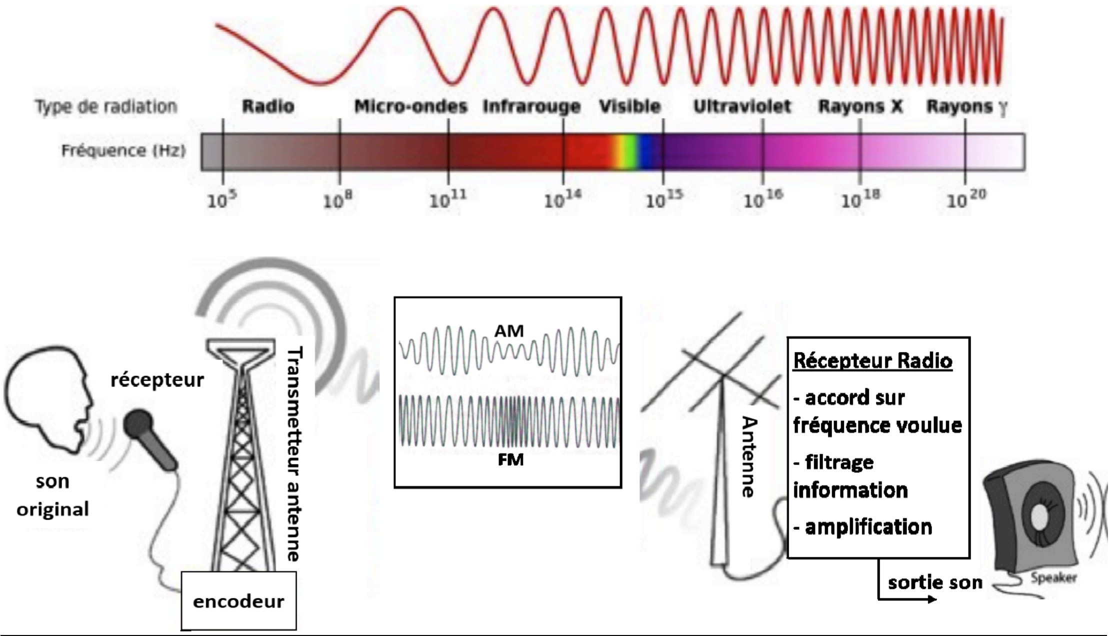
Ce TP doit être préparé en rédigeant le « travail de préparation » demandé en début d'énoncé. Ce travail préparatoire est individuel, et il sera ramassé en début de séance par l'enseignant. En cours de séance, vous devrez rédiger un compte-rendu de TP par binôme, qui sera ramassé en fin de séance.

Dans cette séance on vous propose d'étudier un phénomène très important en électrocinétique en courant alternatif : le phénomène de résonance.

On pourra se référer au polycopié de cours qui est accessible sur Chamilo à l'adresse : https://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr/courses/PAX2PH21/index.php

1 Exemple d'application : le récepteur radio

Le schéma qui suit illustre comment une onde radio voyage depuis une station émettrice jusqu'à un récepteur radio :

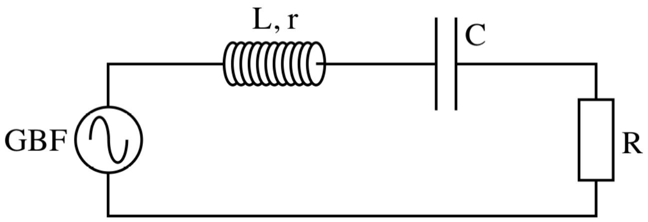


Une onde stationnaire ne transporte aucune information à moins qu'elle ne soit modulée, c'est pourquoi le signal est modifié pour transmettre l'information désirée. Deux modulations (manières de coder un signal) sont utilisées en radiophonie : la modulation de fréquence (FM) et la modulation d'amplitude (AM). Le récepteur radio qui reçoit le signal de l'antenne s'accorde sur la fréquence recherchée, filtre les informations superflues et amplifie le signal, de sorte qu'il puisse être reproduit par un haut-parleur. Au cœur du récepteur radio se trouve un circuit résonant (type RLC) qui répond à une fréquence donnée en fonction de sa capacité C et de son inductance L.

Chaque station de radio émet une onde électromagnétique avec une fréquence bien déterminée. Pour la capter, le circuit résonant est mis en vibration forcée par l'intermédiaire de l'antenne qui capte toutes les ondes électromagnétiques arrivant jusqu'à elle. Pour écouter une seule station, on doit donc accorder la fréquence propre du circuit résonant avec la fréquence de l'émetteur désiré, en faisant varier la capacité d'un condensateur variable (opération effectuée en agissant sur le bouton de recherche des stations). D'une façon générale, tous les systèmes de radiocommunications, qu'ils soient émetteur ou récepteur, utilisent des résonateurs pour « filtrer » les fréquences des signaux qu'ils traitent : circuit RLC, résonateurs à quartz, résonateurs céramique, etc.

2 Travail de préparation

On considère le montage suivant où le Générateur Basse Fréquence délivre une tension sinusoïdale :



• En observant à l'oscilloscope les variations de la tension aux bornes de la résistance, quelle grandeur physique observe-t-on indirectement ?

• Écrire la loi des mailles pour ce circuit R, L, C série.

• Déduire de la méthode des nombres complexes, les expressions de :

- $\underline{Z}$ l'impédance complexe du circuit
- $Z = |\underline{Z}|$ l'impédance réelle du circuit
- I_m l'amplitude de l'intensité
- θ le déphasage entre la tension aux bornes du GBF et l'intensité
- f_0 la fréquence de résonance.

• Donner l'allure de la courbe $I_m = f(\omega)$.

• Discuter les rôles de R, L et C sur l'allure de cette courbe.

• Définir la bande passante et établir l'expression de sa largeur.

• Rappeler l'expression du facteur de qualité Q du circuit en fonction de la fréquence de résonance f_0 et de la largeur de la bande passante Δf.

• Que devient Z à haute fréquence ? A basse fréquence ? Expliquer pourquoi on parle alors respectivement de « circuit inductif » et de « circuit capacitif ».

Au cours de la séance, vous allez réaliser un résonateur capable de détecter un signal électrique sinusoïdal de fréquence $f_0 = 400$ Hz. Pour éviter la détection d'autres signaux de fréquences proches, la largeur de sa bande passante devra être de l'ordre de $\Delta f \approx 100$ Hz.

Vous disposerez des composants suivants :

- 8 condensateurs de capacités : 10; 22; 33; 47; 82; 100; 220 nF et 1 μF.
- Inductance L variable continûment de 0,13 H à 1,1 H (ou 1,3 H) ; résistance interne : 11,5 Ω.
- R variable de 10 Ω à 122,21 kΩ de 10 Ω en 10 Ω.

Quelles valeurs devez-vous choisir pour R, L et C ? (plusieurs choix sont possibles). Expliquez votre raisonnement.

3 Réalisation d'un résonateur

• Faire le schéma du montage proposé dans le travail de préparation, en précisant le branchement des 2 voies de l'oscilloscope (vous allez tracer $I = f(f)$ en veillant à maintenir l'amplitude de la tension du GBF constante tout au long des mesures).

Rappelez les valeurs choisies pour R, L et C.

• Utiliser le GBF numérique. Avant de faire le montage, vérifiez que le GBF numérique et l'oscilloscope ont tous les deux une prise de terre et donc que leur masse est la terre. Qu'est-ce que cela vous impose :

- dans la réalisation du circuit ?
- dans le branchement de l'oscilloscope ?

• Réaliser le montage (attention à la masse du GBF).

3.1 Résonance d'intensité

• Pour obtenir la valeur de la fréquence de résonance demandée, comme la lecture de L est très peu précise, on peut se placer à la fréquence de résonance désirée, puis ajuster la valeur de L jusqu'à obtenir les 2 tensions en phase.

• Tracer la courbe de la variation de l'amplitude de l'intensité en fonction de la fréquence : $I = f(f)$ sur papier millimétré (aidez-vous des consignes données dans le paragraphe « tracé d'un graphe », en début de ce polycopié).

Attention à garder l'amplitude de la tension du GBF constante tout au long des mesures.

• Déterminer graphiquement la fréquence de résonance f_0.

• Déterminer les fréquences de coupure f_1 et f_2.

• Mesurer la largeur Δf de la bande passante. Que constatez-vous ? (L'explication d'une éventuelle grosse différence sera donnée dans la suite de la séance.)

• En déduire la valeur de Q, le facteur de qualité du circuit.

• Comparez la valeur de Q que vous obtenez avec celles obtenues par les autres binômes. Conclusion : quel est l'effet de la résistance sur l'acuité de la résonance ?

3.2 Déphasage

• Tracer sur une autre feuille de papier millimétré, la courbe de la variation du déphasage de la tension aux bornes du GBF par rapport à l'intensité, en fonction de la fréquence : $\theta(f)$. Attention au signe de ce déphasage.

• A partir de la courbe obtenue, déterminer graphiquement la fréquence de résonance f_0. Cette valeur est-elle en accord avec la précédente ?

• Comment peut-on lire la largeur de la bande passante sur ce graphe ? Déterminer graphiquement la largeur de la bande passante. Cette valeur est-elle en accord avec la précédente ?

3.3 Détermination de la résistance r de la bobine

• Régler le GBF à la fréquence de résonance (pour faciliter le réglage, mettez l'oscilloscope en mode XY dans le menu « affichage »).

• Revenir en mode Y(t) et mesurer les tensions aux bornes de la résistance et du GBF. Pourquoi ces deux tensions sont-elles différentes ?

• Dessiner le diagramme de Fresnel ou des impédances complexes à cette fréquence.

• En déduire la valeur de r. Comparer ce résultat avec l'indication du fabricant et la mesure directe de r à l'ohmmètre. Que constatez-vous ?

• Calculer Δf avec cette valeur expérimentale de r et comparer avec les valeurs expérimentales obtenues dans les 2 paragraphes précédents. Conclusion ?

3.4 Déphasage à une fréquence de coupure

• Régler le GBF à la fréquence de coupure expérimentale f_2, lue sur le graphe $I = f(\omega)$. Théoriquement, quelle doit être la valeur de θ, à cette fréquence ?

• Mesurer θ. Calculer son incertitude. Comparer avec la valeur théorique : l'accord est-il satisfaisant ?

• Mesurer les tensions efficaces aux bornes de la résistance, du GBF, de la bobine et du condensateur. Pour quelle raison êtes-vous obligés de modifier le montage pour mesurer ces deux dernières tensions ?

• A l'aide d'un compas, construire sur une feuille de papier millimétré le diagramme de Fresnel (ou le diagramme des impédances complexes) à cette fréquence f_2 et à l'échelle. En déduire la valeur de θ. Comparer avec la valeur précédente : l'accord est-il satisfaisant ?

3.5 Etude du phénomène de surtension (si le temps le permet)

• Brancher l'oscilloscope aux bornes du condensateur et du GBF.

• Faire varier la fréquence et décrire les variations de l'amplitude de la tension aux bornes du condensateur. Que constatez-vous ?

• Mesurer le facteur de surtension $S = U_{Cm}/U_{GBFm}$ à la résonance (*ce phénomène sera étudié en détail en séance de TD).*

• Comparer à la valeur de Q obtenue au § 3.1. Conclusion ?

Travaux Pratiques - Séance E3 :
Les filtres passe-haut, passe-bas et passe-bande

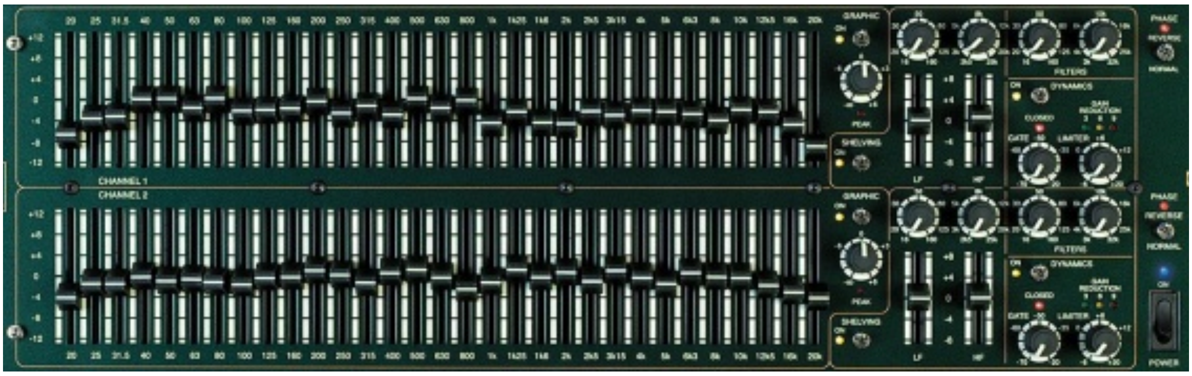
Ce TP doit être préparé en rédigeant le « travail de préparation » demandé en début d'énoncé. Ce travail est individuel, et il sera ramassé en début de séance par l'enseignant. En cours de séance, vous devrez rédiger un compte-rendu de TP par binôme, qui sera ramassé en fin de séance.

Dans cette séance on va étudier divers filtres. Une application extrêmement répandue des filtres consiste à diriger les fréquences hautes, médium ou basses d'un signal audio, vers différents hauts parleurs adaptés à chaque gamme de fréquence (resp. « tweeter », « medium » ou « woofer »).

On pourra se référer au polycopié de cours qui est accessible sur le site Chamilo de l'UE à l'adresse : https://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr/courses/PAX2PH21/index.php

1 Exemple d'application : l'égaliseur audio

Un égaliseur (ou equalizer en anglais) est un appareil ou un logiciel de traitement du son. Il permet d'atténuer ou d'accentuer une ou plusieurs bandes de fréquences composant un signal audio. Ce type de traitement peut être mis en oeuvre lors de la prise de son (notamment lors de concerts ou spectacles hors studios d'enregistrement), ou au moment du mixage ou de la sonorisation.



Un signal sonore est constitué d'une multitude de fréquences réparties sur un large spectre. L'être humain adulte peut percevoir des signaux entre 20 Hz et 20 kHz environ.

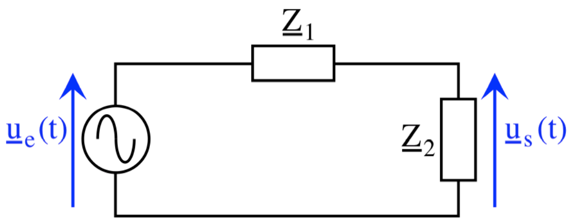
Utilisés dans les amplificateurs HiFi, les autoradios ou les téléviseurs, les égaliseurs contiennent des filtres électroniques (passe-haut, passe-bas ou passe-bande) permettant de réduire, voire de supprimer, tout ou partie d'une gamme de fréquences du signal audio.

Les égaliseurs peuvent ainsi atténuer ou au contraire renforcer la "présence" de certaines fréquences (par ex : un instrument de musique ou une voix) sans trop générer de nuisances (souffle, bruit de fond, saturation, etc.). Notons que les filtres passe-haut et passe-bas sont aussi utilisés dans le traitement d'images, afin de réaliser des transformations dans le domaine fréquentiel, pour supprimer le bruit numérique ou d'augmenter la netteté apparente.

2 Travail de préparation

2.1 Pont diviseur de tension

• On considère le circuit suivant dont la tension d'entrée est notée $u_e(t)$ et où $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$ sont les impédances complexes des composants. En supposant que le courant qui circule dans Z_1 et Z_2 est le même, montrer que : $\underline{u}_s(t) = \dfrac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}\,\underline{u}_e(t)$



2.2 Application : filtre RC passe-bas

On appelle filtre passe-bas, un filtre qui « laisse passer » les basses fréquences : un filtre passe-bas idéal est tel qu'au-dessus d'une fréquence particulière (appelée fréquence de coupure) la tension de sortie (et donc la fonction de transfert) est nulle.

Dans ce paragraphe, $\underline{Z}_1$ est une résistance R et $\underline{Z}_2$ est un condensateur de capacité C.

• Donner l'expression du rapport $H(\omega) = |\underline{H}(\omega)| = \left|\dfrac{\underline{u}_s(t)}{\underline{u}_e(t)}\right|$, qui est le module de la **fonction de transfert** du filtre : $\underline{H}(\omega)$.

• Donner l'allure du graphe de $H(\omega)$.

• Sachant qu'on appelle pulsation de coupure ω_c la pulsation pour laquelle $|\underline{H}(\omega_c)| = \dfrac{1}{\sqrt{2}}$, déterminer l'expression de ω_c. Commentez ce résultat.

• Sachant que dans la partie expérimentale, vous aurez à réaliser un filtre ayant une fréquence de coupure f_c d'environ 1300 Hz, et sachant que vous disposez de 8 condensateurs de capacités 10; 22; 33; 47; 82; 100; 200 nF et 1 μF, et de 4 boites de résistances « AOIP » (boite de résistances variables) : x10, x100, x1000, x10 000 Ω, quelles valeurs faut-il choisir pour R et C ? (plusieurs choix sont possibles).

2.3 Filtre RC passe-haut.

On appelle filtre passe-haut, un filtre qui « laisse passer » les hautes fréquences : un filtre passe-haut idéal est tel qu'au-dessous d'une fréquence particulière (appelée fréquence de coupure) la tension de sortie (et donc la fonction de transfert) est nulle.

• Comment choisir $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$ pour obtenir un filtre passe-haut avec seulement une résistance et un condensateur ? (on pourra raisonner à partir du circuit passe-bas du § 2.2, en remarquant que la somme des tensions aux bornes de $\underline{Z}_1$ et de $\underline{Z}_2$ est nécessairement égale à la tension du générateur, quelle que soit la fréquence).

• Donner les expressions de la fonction de transfert du filtre passe-haut et de sa pulsation de coupure.

• Donner l'allure du graphe du module de sa fonction de transfert.

2.4 Définition du gain d'un filtre en décibels

Le « gain en puissance » G_P (qui est distinct du gain en tension) d'un filtre s'écrit : $G_P = 10 \log_{10}\left(\dfrac{P_s}{P_e}\right)$. Il s'exprime en déciBel (symbole dB).

C'est le rapport entre la puissance moyenne fournie au circuit d'utilisation en sortie, et la puissance moyenne d'entrée que le filtre reçoit. Cette définition est liée au fait que ces puissances peuvent varier dans de très grandes proportions (comparez la puissance très faible du son émis par une personne qui chuchote avec le bruit de la sonorisation d'un spectacle en plein air).

Si l'on cherche à comparer des tensions, on peut supposer que ces puissances sont appliquées chacune aux mêmes résistances d'entrée et sortie, de sorte que :

$$P_s = \left|\frac{u_s^2}{R}\right| \qquad \text{et} \qquad P_e = \left|\frac{u_e^2}{R}\right|$$

On en déduit la définition du gain en tension (toujours exprimé en dB) : $G_u = 10 \log_{10}\left|\frac{u_s^2}{u_e^2}\right|$

soit :
$$G_u = 20 \log_{10}\left|\frac{u_s}{u_e}\right| = 20 \log_{10} |\underline{H}(\omega)|$$

C'est cette définition du gain que vous aurez à utiliser.

• Calculer G_u à la fréquence de coupure ω_c (c'est à dire faire l'application numérique).

3 Filtre RC – Diagramme de Bode (ou Courbe de Gain)

Dans ce qui suit, la moitié de votre groupe va étudier le filtre passe-bas décrit dans le travail de préparation (§ 1.2) et l'autre moitié va étudier le filtre passe-haut du paragraphe 1.3.

• Faire le schéma du montage et réaliser votre montage en utilisant un GBF avec prise de terre et avec R = 100 Ω et C = 1,22 μF.

• Préciser comment faire pour avoir un condensateur de capacité C = 1,22 μF à partir des condensateurs disponibles sur la table.

• Mesurez R et C au multimètre et calculez la fréquence de coupure f_c, ainsi que Δf_c.

• En vous aidant des consignes données dans le paragraphe « tracé d'un graphe », en début de ce polycopié), tracer G_u en fonction de $\log_{10} f$ sur un papier millimétré, dans la gamme 20 Hz – 20 kHz.

• Déterminer la valeur de la fréquence de coupure expérimentale de votre filtre. Comparer ce résultat avec la valeur prévue : l'accord est-il satisfaisant ?

• Tracer l'asymptote et mesurer sa pente ainsi que la fréquence à laquelle elle coupe l'axe des abscisses.

• Etablir l'expression théorique de l'asymptote. A quelle fréquence coupe-t-elle l'axe des abscisses ? Comparer les résultats théoriques et expérimentaux de la pente et de la fréquence de coupure : les accords sont-ils satisfaisants ?

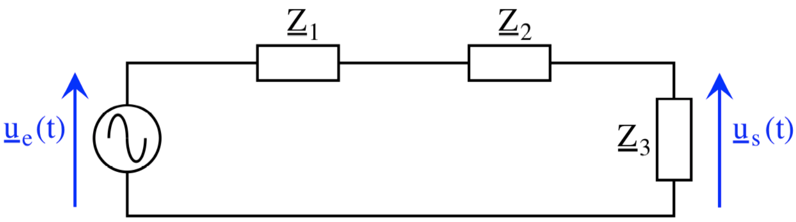
• Comparez vos résultats avec ceux d'un binôme ayant étudié l'autre type de filtre (allure du diagramme de Bode, fréquence de coupure, asymptote, ...)

4 Filtre passe-bande

On pourrait réaliser un filtre passe-bande en connectant en série un filtre passe-haut et un filtre passe bas (avec $\omega_{c\ passe\text{-}haut} < \omega_{c\ passe\text{-}bas}$). Ceci peut être obtenu plus simplement avec un circuit unique comportant une inductance et une capacité. En pratique, il s'agit du même circuit que celui étudié dans le TP E2 (« résonateur électrique »), mais on va s'intéresser ici à la tension aux bornes de la résistance, que l'on va comparer à la tension d'alimentation u_e du circuit.

4.1 Diagramme de Bode d'un filtre passe-bande

• Réaliser le montage ci-dessous, où $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ et $\underline{Z}_3$ sont respectivement une bobine, un condensateur et une résistance tels que L = 0,13 H, C = 1,22 μF et R = 100 Ω.



• En vous aidant des consignes du paragraphe « tracé d'un graphe » au début de ce polycopié, tracer G_u en fonction de $\log_{10} f$ sur une feuille de papier millimétré (ou G_u en fonction de f sur une feuille de papier semi-logarithmique : cf. § 2.4. page 2) dans la gamme 20 Hz – 10 kHz.

• Lire G_{max} sur votre graphe (valeur maximum de G_u) et la fréquence f_0 correspondante.

• Lire sur votre graphe les fréquences f_1 et f_2 pour lesquelles $G_u = G_{max} - 3\text{dB}$.

Calculer $\Delta f = |f_2 - f_1|$

• Tracer les asymptotes aux basses et aux hautes fréquences et déterminer graphiquement leurs pentes.

• Lire sur votre graphe les fréquences f_3 et f_4 pour lesquelles ces asymptotes coupent l'axe des abscisses.

4.2 Exploitation des résultats

• Etablir l'expression de la fonction de transfert $\underline{H}$ du filtre, puis celle du gain.

• En déduire l'expression de G_{max} la valeur maximum du gain et de la fréquence f_0 correspondante. A quoi correspond cette fréquence ?

• Déduire de votre valeur expérimentale de G_{max} la valeur de la résistance interne r de la bobine. Comparer aux valeurs obtenues lors de la séance E2 : remarquer que r peut changer significativement en fonction de L (à cause de l'influence du noyau de fer de la bobine).

• Calculer la valeur de la fréquence du maximum et comparer avec la valeur expérimentale. L'accord est-il satisfaisant ? Comparer également avec la valeur de f_0 obtenue lors de la séance E2 : l'accord est-il satisfaisant ?

• Sachant qu'aux fréquences de coupure, on a : $H = \frac{H_{max}}{\sqrt{2}}$, (voir cours) montrer que la largeur de la bande passante est donnée par l'expression $\Delta f = \frac{R+r}{2\pi L}$. Calculer sa valeur théorique et comparer à sa valeur expérimentale ainsi qu'au résultat obtenu lors de la séance E2 : conclusion ?

• Etablir les expressions théoriques des asymptotes aux hautes et aux basses fréquences.

• Comparer les pentes expérimentales de ces 2 asymptotes avec les pentes théoriques : l'accord est-il satisfaisant ?

• Constater que l'asymptote aux basses fréquences coupe l'axe des abscisses à la fréquence de coupure d'un circuit RC (de même on pourrait montrer que l'asymptote aux hautes fréquences coupe cet axe à la fréquence de coupure du circuit RL). Comment peut-on expliquer ce résultat ? Comparer votre valeur expérimentale f_3 (si vous avez étudié le filtre passe-haut) ou votre valeur expérimentale f_4 (si vous avez étudié le filtre passe-bas) à celles obtenue pour le montage précédent : l'accord est-il satisfaisant ?

• En raisonnant sur le circuit RLC étudié ci-dessus, indiquez comment, à partir d'un signal électrique audio, on pourrait séparer les fréquences hautes, médium et basses, vers différents hauts parleurs adaptés à chaque gamme de fréquence.

Travaux Pratiques - Séance E4 :
Utilisation d'un filtre résonant pour filtrer une fréquence

Ce TP doit être préparé en rédigeant le « travail de préparation » demandé en début d'énoncé. Ce travail de préparation est individuel, et il sera ramassé en début de séance par l'enseignant. En cours de séance, vous devrez rédiger un compte-rendu de TP par binôme, qui sera ramassé en fin de séance.

Dans cette séance nous allons réaliser et utiliser un filtre résonant.

On pourra se référer au polycopié de cours qui est accessible sur le site Chamilo de l'UE à l'adresse : https://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr/courses/PAX2PH21/index.php

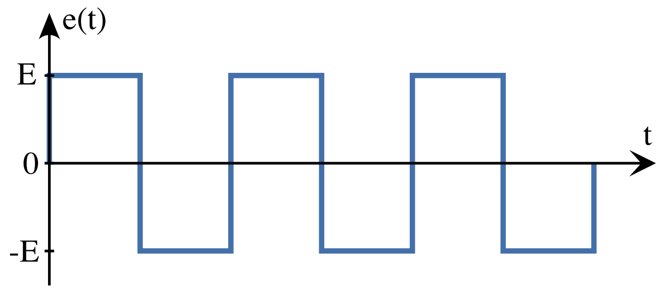
Pour les décompositions en série de Fourier, voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Série_de_Fourier ou : http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Elec/Fourier/fourier1.html

1 Décomposition de Fourier

Un filtre résonant permet de sélectionner une fréquence particulière dans un signal qui en comporte plusieurs. Par exemple, un récepteur radio permet de sélectionner une station émettrice donnée dans un espace où coexistent de nombreux signaux de diverses fréquences. Pour illustrer cela, on va extraire (ou filtrer) certaines fréquences d'un signal « poly-fréquentiel ».

On peut montrer mathématiquement que tout signal périodique peut être décomposé en série de Fourier. Une série de Fourier est une somme de sinusoïdes dont les fréquences, les amplitudes et les phases permettent la reconstruction du signal périodique d'origine.

Considérons le signal en créneaux e(t) suivant :



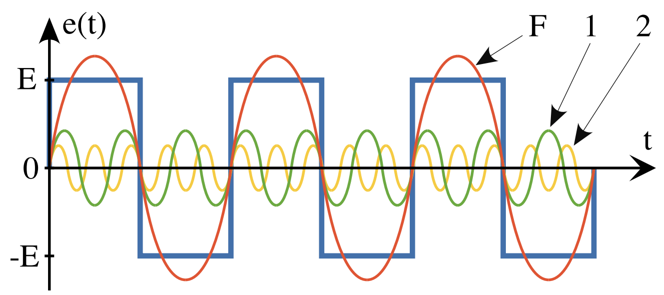
Ce signal de pulsation $\omega_o = 2\pi/T$ et d'amplitude E se décompose en une somme de sinusoïdes :

$$e(t) = \frac{4E}{\pi}\left[\sin(\omega_o t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega_o t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega_o t) + \frac{1}{7}\sin(7\omega_o t) + \cdots\right]$$

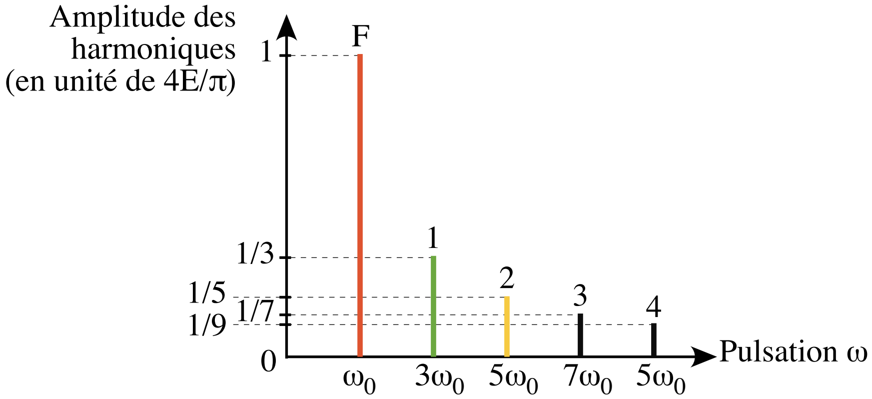
Pour ce signal en créneaux, cette somme ne contient que les harmoniques n impairs (pulsations ω_o, $3\omega_o$, $5\omega_o$, …) et leurs amplitudes diminuent comme 1/n. Sur la figure suivante, on a représenté (à l'échelle) le mode fondamental et les deux premiers harmoniques :

- Fondamental : sinusoïde de pulsation ω_o et d'amplitude $4E/\pi \approx 1{,}27$ E (sinusoïde notée 'F')
- 1^er Harmonique : sinusoïde de pulsation $3\omega_o$ et d'amplitude ⅓ $(4E/\pi) \approx 0{,}424$ E (sinusoïde '1')
- 2^ème Harmonique : sinusoïde de pulsation $5\omega_o$ et d'amplitude ⅕ $(4E/\pi) \approx 0{,}254$ E (sinusoïde '2')

En observant la courbe ci-dessous, on peut se convaincre que la somme du Fondamental et des 2 premiers Harmoniques ressemble déjà beaucoup au signal en créneaux de départ.



Il est courant de représenter un signal dans le domaine spectral : on trace alors l'amplitude du mode Fondamental et des Harmoniques en fonction de la pulsation. Pour un signal en créneaux, le graphe est le suivant :

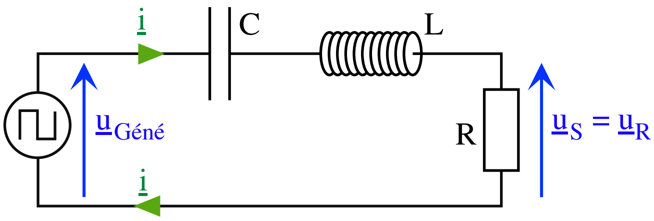


Dans ce TP, on va utiliser un filtre Passe-Bande de gain 1, ajustable en fréquence, pour sélectionner les Harmoniques d'un signal créneaux et déterminer leurs coefficients de Fourier.

2 Travail de préparation

2.1 Filtre RLC série

Au cours de ce TP, on va utiliser un filtre RLC série :



• Rappeler qualitativement pourquoi ce filtre coupe les basses et les hautes fréquences.

• Exprimer puis calculer la valeur théorique du centre de la Bande-Passante de ce filtre : f_o (faire le calcul avec les valeurs C = 220 nF, R = 30 Ω et L ≈ 0,1 Henry).

2.2 Résistance interne de la bobine

• Indiquer comment on peut déterminer la valeur de la résistance interne de la bobine r_b, en se plaçant à la fréquence de résonance f_o (représenter schématiquement le diagramme de Fresnel).

• En supposant toujours que l'on est à la fréquence de résonance f_o, établir l'expression littérale du rapport r_b/R en fonction de $\underline{u}_{Géné}$ et de $\underline{u}_R$ seulement.

• Calculer la valeur du facteur de qualité, Q pour r_b = 20 Ω.

2.3 Calcul théorique de l'atténuation du premier harmonique ($3\omega_o$)

• A partir de l'expression de la fonction de transfert du filtre RLC :

$$\underline{H}(\omega) = \frac{1}{1+jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

calculer le module de $\underline{H}$ pour le premier harmonique (à $\omega = 3\omega_o$). Calculer aussi l'atténuation en dB.

• En déduire l'amplitude théorique de la première Harmonique (à $\omega = 3\omega_o$) qui doit être présente dans le signal filtré (signal de sortie).

• Tracer alors le graphe théorique du signal filtré (aux bornes de $\underline{u}_R$) dans le domaine spectral (semblable à la dernière figure du paragraphe 1) : il s'agit de représenter l'amplitude des sinusoïdes présentes dans le signal (en unité de 4E/π) en fonction de la pulsation.

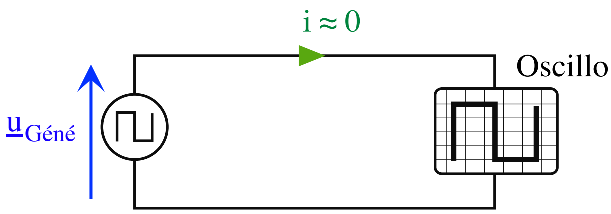
• Commenter la qualité du filtrage : quelle partie du signal « passe-t-elle » et quelle partie du signal est-elle « coupée » ?

3 Travail en séance

3.1 Réglage du générateur

On utilisera un générateur modèle 'Iso-Tech' ou 'Française d'Instrumentation' délivrant une tension en créneaux, d'amplitude E = 1 volt (et de fréquence proche du kilo-Hertz). Pour passer d'un signal sinusoïdal à un signal en créneaux, appuyer sur le bouton « wave » du générateur.

Régler le générateur à l'aide du circuit suivant :



Vérifier que la mesure par l'oscilloscope de la tension crête-à-crête (en mode « Mesure ») est bien de 2 volts. Représenter schématiquement le signal observé à l'oscilloscope. Remarque : l'impédance de l'oscilloscope étant très grande (≥ 10 MΩ), le courant qui circule dans ce circuit est très faible, comme indiqué sur la figure précédente.

3.2 Réalisation du filtre

Sans changer l'amplitude du générateur, réaliser le circuit RLC représenté au paragraphe 2.1.

- On prendra un condensateur de capacité C = 220 nF.
- On réglera la résistance à R = 30 Ω (vérifier préalablement la valeur de la résistance au multimètre).
- L'inductance vaut environ L ≈ 0,1 Henry (bobine sans noyau de fer).

On visualisera simultanément à l'oscilloscope la tension du générateur $\underline{u}_{Géné}$ (signal à filtrer) sur la voie 1 et la tension aux bornes de la résistance $\underline{u}_R$ (signal filtré) sur la voie 2. Par la suite, on affichera en permanence les 4 mesures suivantes à l'écran de l'oscilloscope (menu « MESURES ») : fréquence et amplitude crête-à-crête du signal à filtrer et fréquence et amplitude crête-à-crête du signal filtré.

Faire le schéma du circuit, réaliser le circuit et faites vérifier votre montage par l'enseignant.

3.3 Ajustement de la fréquence f_o sur le centre de la Bande Passante

- Mettre le générateur en mode sinusoïdal (appuyer une ou deux fois sur le bouton « wave » sans changer l'amplitude du signal). Rechercher alors la fréquence f_o de résonance en courant du circuit RLC. Expliquer la méthode employée pour déterminer f_o.
- Vérifier que f_o est proche de la fréquence calculée dans le travail préparatoire.

3.4 Détermination de la résistance interne de la bobine

Le générateur est toujours en mode sinusoïdal à la fréquence f_o.

- Mesurer avec l'oscilloscope la tension générateur $\underline{u}_{Géné}$ et la tension résistance $\underline{u}_R$ (on pourra utiliser le mode « Acquisition » pour moyenner les signaux et avoir une meilleure précision).
- En déduire la valeur de la résistance interne de la bobine r_b (cf. travail préparatoire). Calculer r_b.

3.5 Détermination du facteur de qualité Q du filtre

Le générateur est toujours en mode sinusoïdal à la fréquence f_o.

- On rappelle que le facteur de qualité d'un circuit RLC est égal au facteur de surtension aux bornes du condensateur lorsque l'on est à la résonance f_o :

$$S = Q = \frac{|\underline{u}_C|}{|\underline{u}_{Géné}|}$$

- Comment mesurer $|\underline{u}_C|$ et $|\underline{u}_{Géné}|$ sans modifier le circuit ?
- Quelles type de tension mesure un multimètre AC ? Ces mesures permettent-elles de déterminer Q ?

3.6 Résistance de sortie du générateur

Régler le générateur en mode créneaux (bouton « wave ») sans changer l'amplitude.

• Pourquoi le signal du générateur (voie 1) apparait-il déformé ? (explication qualitative).

• Représenter le schéma du circuit en faisant apparaître la résistance r_g de sortie du générateur ($r_g = 50\ \Omega$) et la résistance propre de la bobine r_b. Ecrire la Loi des mailles complète.

• Si l'on est à la fréquence f_o, comment se simplifie cette expression ?

• Compte tenu de la question 2.3., justifier qu'à la fréquence f_o, on puisse remplacer dans cette expression, la tension du générateur $\underline{u}_E$ par la tension du mode Fondamental que l'on notera $\underline{u}_F$.

• Vérifier alors que l'expression de $\underline{u}_F$ en fonction des résistances r_g, r_b, R et de la tension $\underline{u}_R$ s'écrit : $\underline{u}_F = [(r_g + r_b + R)/R]\ \underline{u}_R$.

3.7 Mesure de l'amplitude du Fondamental

• Mesurer la tension $|\underline{u}_{R\ c\text{-}à\text{-}c}|$ avec l'oscilloscope (valeur crête-à-crête).

• En déduire la tension $|\underline{u}_{F\ c\text{-}à\text{-}c}|$ (valeur c-à-c) du Fondamental et comparer l'amplitude de $|\underline{u}_F|$ avec la valeur attendue (voir le paragraphe 1 d'introduction : si E = 1 V, le Fondamental de pulsation ω_o doit avoir une amplitude $4E/\pi \approx 1{,}27\ E = 1{,}27$ Volts).

3.8 Ajustement du centre de la Bande Passante sur la fréquence $3f_o$

• Le signal délivré par le générateur est inchangé, mais on va maintenant centrer la bande passante du filtre sur le premier Harmonique à la fréquence $3f_o$. Quel réglage faut-il modifier ? Calculer la valeur $C_{3\omega_0}$ du condensateur qu'il faut utiliser (raisonner en formant des rapports adimensionnels).

• Bien que l'on ne dispose pas de condensateur de capacité variable, comment pouvez-vous « fabriquer » un condensateur de valeur $C_{3\omega_0}$ avec les condensateurs disponibles sur la table (deux plaquettes avec les condensateurs C = 220 nF, 100 nF, 82 nF, 47 nF, 22 nF) ? Expliquer.

• Modifier le condensateur dans le filtre RLC. Décrire ce que l'on observe à l'oscilloscope (représenter la courbe obtenue à l'écran).

(Comme on ne peut pas ajuster finement la valeur du condensateur, on ajustera légèrement la fréquence f du signal d'entrée (au voisinage de f_o) pour que le premier Harmonique à $3\omega_o$ corresponde bien à la résonance du filtre).

3.9 Mesure de l'amplitude du premier Harmonique

• On a vu au § 4.2. du TP E3 que la résistance r_b de la bobine n'est pas très stable et peut changer avec la fréquence. Déterminer la nouvelle valeur de r_b à la fréquence $3f_o$ (cf. paragraphe 3.4. ci-dessus).

• Avec les réglages précédents, mesurer alors l'amplitude de la tension $\underline{u}_{R\ c\text{-}à\text{-}c}$ avec l'oscilloscope (on pourra utiliser le mode 'Acquisition' pour s'affranchir du bruit, ou utiliser les curseurs de tension).

• En déduire l'amplitude de la tension $\underline{u}_{H1}$ du premier Harmonique et comparer avec la valeur attendue (le premier Harmonique de pulsation $3\omega_o$ devrait avoir une amplitude $\frac{1}{3}(4E/\pi) \approx 0{,}424\ E = 0{,}424$ V lorsque E = 1 V).

• Calculer le rapport des amplitudes « 1er Harmonique sur Fondamental ». Est ce que les coefficients de Fourier vous semblent acceptables ?

3.10 Mesure de l'amplitude du second Harmonique

Si le temps le permet, on pourra essayer de filtrer et mesurer le signal à $5f_o$ sur le même principe que les questions 3.8. et 3.9.

Exercices de Travaux Dirigés

1 Tensions en régime alternatif

On considère une branche d'un circuit électrique parcourue par un courant $i(t) = I_0 \cos(\omega t)$ où ω est la pulsation et I_0 est l'amplitude du courant.

1.1 Approximation des régimes quasi stationnaires

1) Donner l'ordre de grandeur de la longueur d'onde d'une onde électromagnétique se propageant dans un conducteur à la fréquence de 50 Hz, puis de 1 MHz (on prendra comme vitesse de propagation de l'onde $v \sim 2.10^8$ m/s).

2) Comparer cette longueur d'onde à la longueur des fils dans un circuit de TP. En déduire que dans ces deux cas le courant est quasiment le même dans toute la branche du conducteur à un instant donné. Indiquer pour quelles fréquences cette approximation ne sera plus valable.

1.2 Notations complexes

3) Montrer que l'on peut associer à $i(t)$ une grandeur complexe $\underline{i}(t)$ que l'on définira. Indiquer ce que représente la partie réelle de $\underline{i}(t)$, son module, ainsi que son argument.

4) En utilisant les notations complexes, montrer que les opérations de dérivation et d'intégration du courant par rapport au temps reviennent à multiplier ou diviser le courant par une quantité que l'on définira. En déduire que chacune de ces opérations de dérivation ou d'intégration donne lieu à un déphasage.

5) Donner une interprétation graphique du résultat précédent.

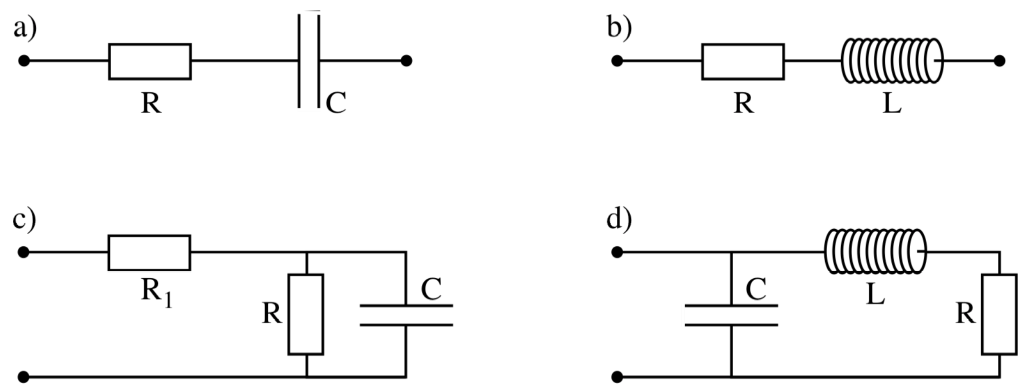
1.3 Loi d'Ohm généralisée

6) Exprimer la relation entre la tension aux bornes d'un condensateur, aux bornes d'une résistance puis aux bornes d'une bobine idéale en fonction du courant qui les traverse. En passant aux notations complexes, montrer que l'on peut dans chaque cas, écrire la relation entre tension et courant sous la forme d'une loi d'Ohm généralisée : $\underline{u}(t) = \underline{Z}(\omega)\, \underline{i}(t)$.

2 Calculs d'impédance

1) Déterminer les impédances complexes $\underline{Z}$ des montages ci-dessous.

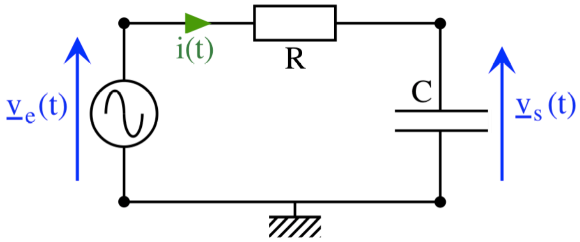
2) En déduire les expressions des impédances réelles Z ($Z = |\underline{Z}|$) et des déphasages θ de la tension par rapport à l'intensité lorsque l'on alimente ces circuits entre les deux points noirs (les calculs des impédances c) et d) sont un peu longs).



3 Etude de la réponse d'un circuit RC en alternatif

3.1 Pont diviseur en notations complexes

On considère le circuit suivant, qui est soumis à une tension d'entrée $v_e(t)$ sinusoïdale de période T. On se propose d'étudier la réponse en sortie $v_s(t)$ en fonction de la valeur de T et du choix des composants utilisés (résistance R et condensateur de capacité C). La tension d'entrée $v_e(t)$ s'écrit : $v_e(t) = E \cos(\omega t + \theta)$, où ω est la pulsation de la source et où θ représente le déphasage entre la tension $v_e(t)$ et le courant $i(t) = I_0 \cos(\omega t)$ dans le circuit.



1) Représenter schématiquement les variations de $v_e(t)$ au cours du temps.

2) Trouver l'expression reliant le rapport des tensions complexes $\underline{v}_e(t)$ et $\underline{v}_s(t)$ aux impédances complexes $\underline{Z}_C$ et $\underline{Z}_R$ associées respectivement au condensateur et à la résistance. De quoi ce rapport dépend-il ?

3) Pourquoi peut-on qualifier ce circuit de « pont diviseur de tension » ? En remplaçant ces impédances par leurs expressions, que devient la formule du pont diviseur de tension dans la limite où $RC >> T$?

4) Trouver la relation entre $dv_s(t)/dt$ et le courant i(t) qui traverse la résistance. En déduire une équation différentielle qui relie $v_s(t)$ à $v_e(t)$. Montrer que si $RC >> T$, alors $v_s(t)$ se comporte comme un circuit intégrateur.

5) En utilisant les valeurs des arguments complexes, retrouver par le calcul la valeur du déphasage θ entre les tensions d'entrée et de sortie dans le cas où $RC >> T$.

3.2 Détermination des grandeurs dans le circuit

On souhaite comparer à l'oscilloscope la tension $v_s(t)$ (Voie II) à la tension $v_e(t)$ (Voie I) en ce qui concerne son amplitude et sa phase.

6) Prédire ce que l'on doit observer sur l'oscilloscope en sortie de l'intégrateur, sachant qu'on a imposé sur l'entrée un signal d'amplitude 2 V crête à crête avec un générateur de fréquence réglé sur 1 kHz et alimentant un condensateur de capacité $C = 16\ \mu F$ et une boite de résistances réglée sur 100 Ω. Préciser si $v_s(t)$ est en avance ou en retard (pour l'application numérique, on notera que $16 \approx 100/2\pi$).

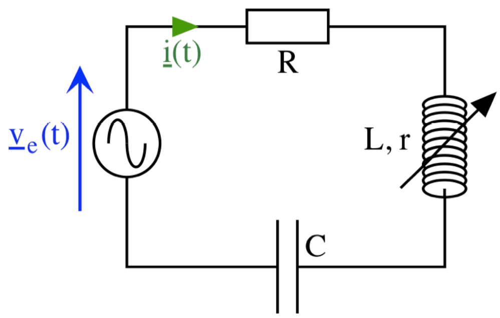
7) Tracer le diagramme de Fresnel associé. Faire figurer l'angle θ entre v_s et v_e.

8) Etudier l'amplitude du signal de sortie $v_s(t)$ lorsqu'on diminue la période du signal d'entrée par un facteur 10, puis 100, ...? Conclure.

4 Le régime sinusoïdal forcé (cf. TP E2)

4.1 Phénomène de surtension (ou résonance tension)

On considère le circuit RLC série représenté ci-dessous. On applique une tension d'entrée sinusoïdale $v_e = V_m \cos(\omega t + \theta)$. On donne les valeurs : R = 10 Ω ; L = 0,13 H ; r = 11,5 Ω ; C = 100 nF (ce sont des valeurs comparables à celles que l'on utilise en TP).



1) Etablir l'expression de l'impédance complexe du circuit. En déduire la dépendance de l'amplitude du courant dans le circuit en fonction de la fréquence.

2) Exprimer le déphasage entre la tension délivrée par le générateur et le courant dans le circuit.

3) Etablir l'expression de la pulsation propre du circuit ω_0 et calculer sa valeur.

Indication : ω_0 est la valeur de la pulsation pour laquelle le courant est maximum dans le circuit pour une tension générateur imposée (on la note aussi ω_R).

4.2 Facteur de Qualité

4) On appelle facteur de qualité Q d'un circuit RLC série, le rapport entre l'amplitude de la tension aux bornes du condensateur à la résonance en courant, et l'amplitude de la tension du générateur. Ecrire l'expression de Q et calculer sa valeur.

5) Dessiner l'allure de la résonance en courant en fonction de la fréquence. Faire apparaître sur le graphe les quantités Q et $f_0 = \omega_0/2\pi$.

5 Réponse d'un circuit RLC série

1) Rappeler dans le système SI (Longueur : L ; Masse : M ; Temps : T ; Courant : I) les dimensions des grandeurs R, L et C.

2) Expliciter les trois temps caractéristiques que l'on peut dimensionnellement obtenir avec une résistance R, une inductance L et une capacité C.

3) On considère un circuit RLC série tel que $1/RC << R/L$, alimenté par une générateur de tension sinusoïdale $u(t) = U_m\cos(\omega t + \theta)$. On définit les grandeurs : $S_R = |\underline{u}_R|/U_m$, et $S_C = |\underline{u}_C|/U_m$.

3a) Exprimer S_R et S_C de la manière la plus condensée possible en fonction de R, L, C et ω.

3b) Exprimer $\log(S_R)$ en fonction de $\log \omega$ pour les deux situations extrêmes :

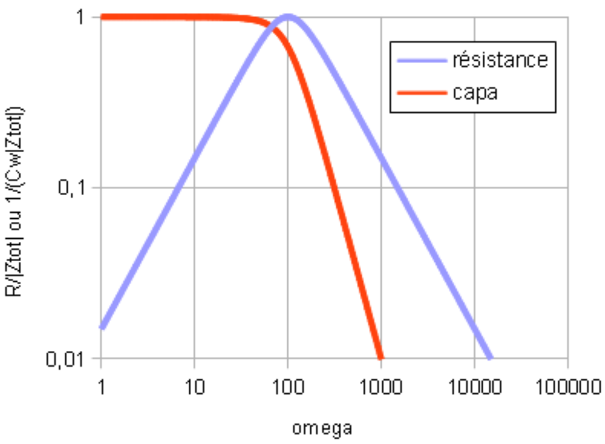
- $\omega << 1/RC$ (on a alors $\omega << \omega_0$, à retrouver)
- $\omega >> R/L$ (on a alors $\omega >> \omega_0$, à retrouver)

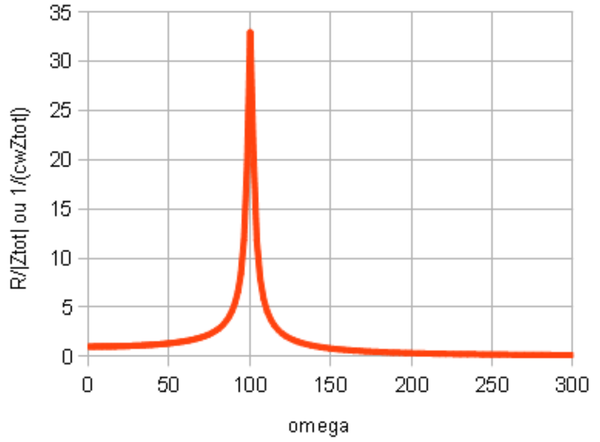
3c) Même question pour $\log(S_C)$. Où voit-on une pente de -2 quand on trace $\log(S_C)$ en fonction de $\log \omega$?

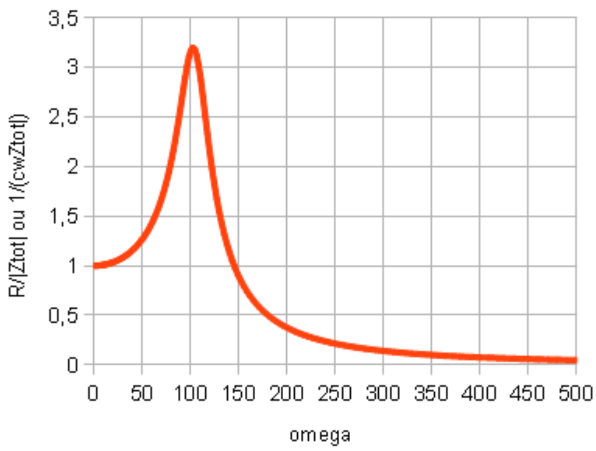
3d) Montrer que pour $1/(RC) << \omega << R/L$, on a $\log(S_C) \approx \log(1/RC) - \log \omega$, et $\log(S_R) \approx 0$.

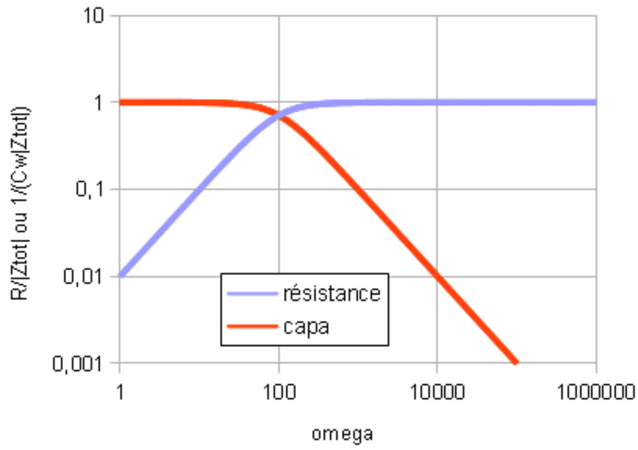
	R (Ω)	L (H)	C (F)	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\frac{1}{RC}$	$\frac{R}{L}$	$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta\omega}{\omega} = R\sqrt{\frac{C}{L}}$
(a)	10 000	1	10^{-6}	1000	100	10 000	10
(b)	10	0,33	3.10^{-4}	100,5	333,3	30,30	0,30
(c)	150	1	10^{-4}	100	66,7	150	1,5
(d)	1000	10^{-5}	10^{-5}	10^{5}	100	10^{8}	1000
(e)	100	0,3	3.10^{-6}	1054,1	3333	333,3	0,32
(f)	1	0,33	3.10^{-4}	100,5	3333	3,03	0,03

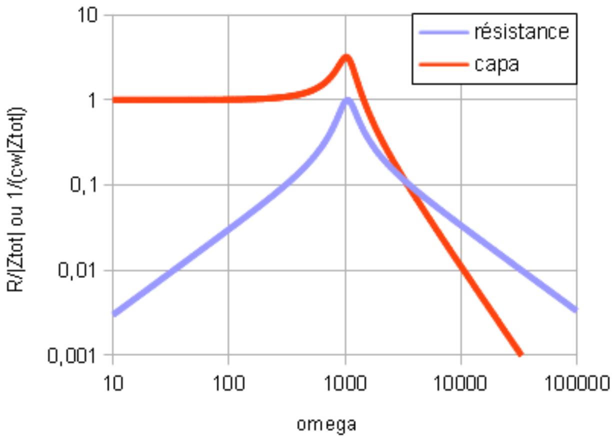
4) Parmi les combinaisons (a) à (f) du tableau qui précède, indiquer laquelle correspond à chacune des courbes de réponse d'un circuit RLC série présentées ci-dessous.

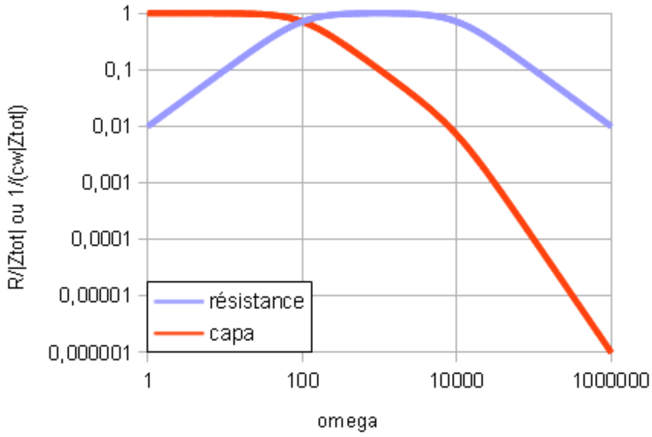












6 Résonance d'intensité

On étudie la résonance en intensité d'un circuit RLC série. Un générateur de tension sinusoïdale branché aux bornes du circuit délivre une tension d'amplitude constante $U_m = 6$ V. Quand on fait varier la fréquence, on observe que l'intensité du courant passe par un maximum d'amplitude $I_{0\ max} = 60$ mA pour la fréquence $f_0 = 1590$ Hz.

1) Déterminer la valeur de la pulsation propre ω_0 du circuit, puis la valeur de R.

2) On donne $C = 1{,}0\ \mu$F. Calculer L et Q, le facteur de qualité du circuit.

3) Calculer la tension U_C aux bornes du condensateur à la résonance.

4) Déterminer l'intensité dans le circuit à la fréquence $f = 3000$ Hz.

7 Tension aux bornes du condensateur près de la résonance

Soit un circuit RLC série avec C = 800 nF. On va montrer que la fréquence propre f_0 du circuit est distincte de la fréquence de résonance f_C pour laquelle la tension U_C est maximale.
On mesure les valeurs suivantes où U_C est l'amplitude de la tension aux bornes du condensateur et E_0 l'amplitude de la tension aux bornes du générateur :

f(Hz)	0	300	500	600	700	800	1000	1200	1500
U_C/E_0	1,00	1,07	1,15	1,15	1,10	1,00	0,73	0,51	0,32

1) Tracer la courbe de résonance en tension.

2) Quel est l'ordre de grandeur de la fréquence de résonance (fréquence f_C pour laquelle U_C est maximum, distincte de la fréquence propre f_0 du circuit) ? La détermination est-elle précise ? Justifier l'appellation de résonance floue.

3) Etablir l'expression théorique du facteur de surtension $S_C = U_C/E_0$ aux bornes du condensateur.

4) En posant $x = \frac{\omega}{\omega_0}$ et sachant que $Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0}$, établir que : $\frac{L\omega}{R} = Q\,x$ et $\frac{1}{RC\omega} = \frac{Q}{x}$

5) Etablir ensuite que $S_C = \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{Q^2} + (x^2 - 1)^2}}$

6) Montrer que l'expression de son maximum est : $S_{CMax} = \frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$.

7) A partir de la valeur $S_{CMax} = 1{,}15$ (cf. tableau), déterminer le facteur de qualité Q (on peut montrer que seule la plus grande valeur de Q obtenue est physiquement intéressante).

8) En exploitant la mesure à 800 Hz (qui présente la particularité d'avoir une valeur : $S_C = 1$), déterminer la fréquence propre f_0 du circuit.

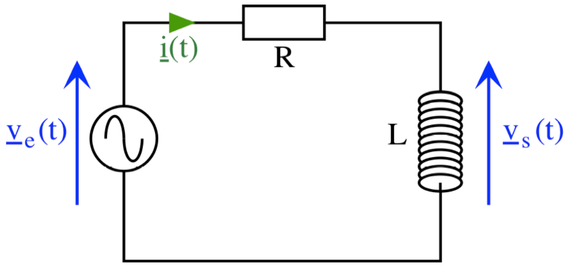
9) Connaissant la valeur de Q, déterminer alors la valeur de $x_C = \omega_C/\omega_0$.

10) Déduire de ce qui précède la fréquence de résonance f_C du circuit.

11) Enfin, en déduire les valeurs de L et de R (on rappelle que C = 800 nF).

8 Filtre en L passe-bas et passe-haut (cf. TP E3)

Soit un circuit RL série soumis à une tension d'entrée sinusoïdale $\underline{v}_e(t)$ (figure ci-dessous). On posera $i(t) = I_m \cos \omega t$.



1) Déterminer la fonction de transfert de ce circuit définie par $\underline{H} = \frac{\underline{v}_s}{\underline{v}_e}$ que l'on mettra sous la forme $\underline{H} = \frac{1}{(A + jB)}$. On posera $x = \frac{L\omega}{R}$.

2) On appelle courbe de réponse en gain d'un filtre, l'expression $G(\omega) = 20 \log_{10} |\underline{H}(\omega)|$. Déterminer l'expression du gain et du déphasage θ de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée en fonction de x.

3) On se propose dans cette question de tracer le graphe de G en fonction du logarithme de x.

- Quelle est la valeur de G en x = 1 ?
- Déterminer les équations des asymptotes de G aux hautes et aux basses fréquences.
- Tracer qualitativement le graphe de G.
- Justifier le nom de filtre passe-haut donné à ce filtre.

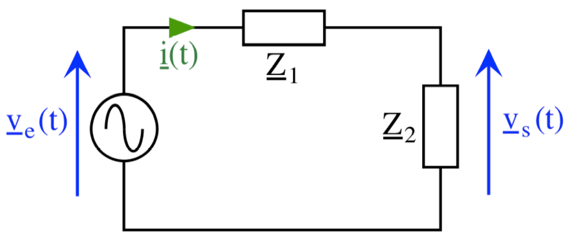
4) Etablir l'expression du déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie et tracer qualitativement le graphe correspondant.

5) Mêmes questions avec le circuit obtenu en permutant les rôles de R et L.

9 Filtre en L utilisé comme diviseur de tension

Un diviseur de tension en régime continu est réalisé en appliquant la tension à diviser aux bornes d'une association en série de deux résistances et en prélevant une fraction de la tension aux bornes de l'une d'entre elles (figure ci-dessous). Le rapport d'atténuation est alors $\underline{k} = \underline{v}_S/\underline{v}_E$. En régime sinusoïdal, le module de $\underline{k}$ (noté $|\underline{k}|$) n'est en général pas constant, il dépend de la fréquence.

Cet effet de filtrage est quelquefois souhaité, mais en revanche, c'est un défaut majeur lorsqu'il s'agit d'atténuer sans déformation une tension de valeur trop élevée pour être utilisée directement.
On se propose ici d'étudier un diviseur de tension sans effet de filtrage.



1) Etablir l'expression de $\underline{k}$ en fonction des impédances complexes $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$.

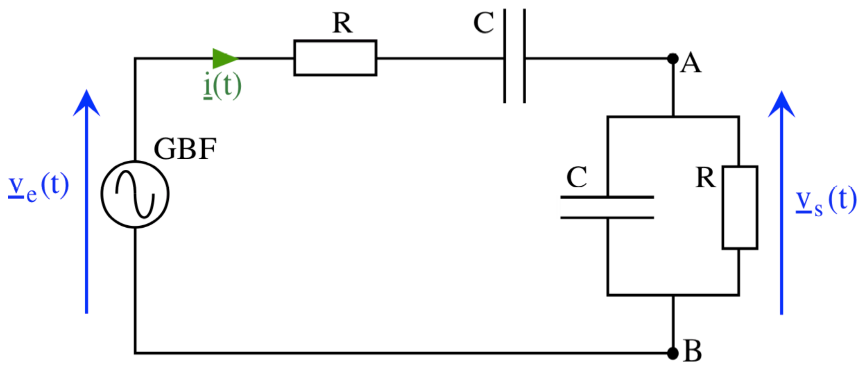
2) Les dipôles $\underline{Z}_1$ et $\underline{Z}_2$ étant constitués tous les deux de l'association en parallèle d'une résistance et d'un condensateur, établir l'expression de $\underline{k}$ en fonction de R_1, C_1, R_2, C_2 et ω.

3) En admettant que le rapport de deux polynômes en ω est indépendant de ω si et seulement si les rapports des termes homologues sont égaux (ce qui se traduit par : $R_1C_1 = R_2C_2$), établir l'expression de $\underline{k}$.

4) En supposant R_2 et C_2 fixés, établir les expressions de R_1 et de C_1 en fonction de $\underline{k}$, R_2 et C_2.

10 Filtre de Wien

Ce filtre permet de se passer de bobine. On alimente le circuit ci-dessous par une tension alternative $\underline{v}_e(t)$ d'amplitude constante et de pulsation ω. On donne R = 1,5 kΩ et C = 0,5 μF.



1) Déterminer la fonction de transfert de ce circuit définie par $\underline{H} = \frac{\underline{v}_s}{\underline{v}_e}$ que l'on mettra sous la forme $\underline{H} = \frac{1}{(\alpha + j\beta)}$. On posera $x = RC\omega = \frac{\omega}{\omega_0}$.

2) Déterminer l'expression du gain et du déphasage θ de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée en fonction de x.

3) Calculer le gain maximum et le déphasage correspondant.

4) Déterminer les fréquences de coupure et en déduire la bande passante de ce filtre. Que vaut le déphasage pour les fréquences de coupure ?

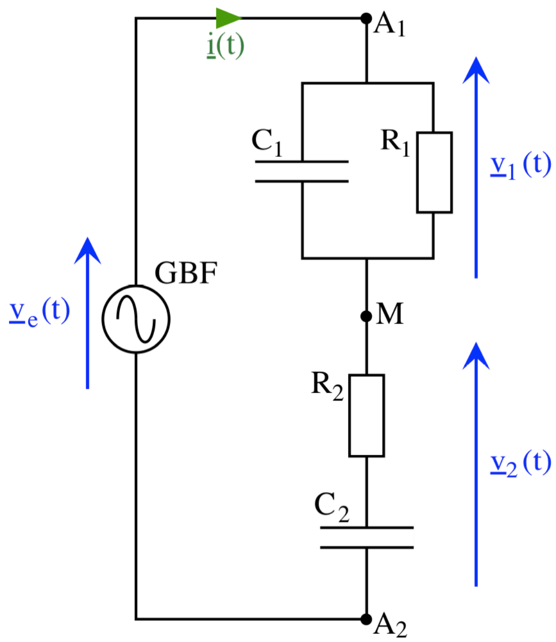
5) Tracer les graphes du gain (en dB) et du déphasage (en degrés) en fonction de $\log_{10}(x)$. On rappelle que $G_{dB}(\omega) = 20 \log_{10} |\underline{H}(\omega)|$.

11 Diviseur de tension compensé

On considère le circuit ci-dessous. Ce circuit est alimenté par un GBF délivrant une tension sinusoïdale :

$$v_e = U_m \cos(\omega t).$$

On règle le générateur à la fréquence f_0 pour laquelle les deux tensions $v_1 = V_{A1} - V_M$ et $v_2 = V_M - V_{A2}$ sont en phase.



1) Déterminer la fréquence f_0 en fonction de R_1, R_2, C_1 et C_2.

2) Montrer qu'à la fréquence f_0 il faut que $R_2/R_1 + C_2/C_1 = 1$ pour que les tensions $v_1(t) = U_1 \cos(\omega t + \theta_1)$ et $v_2(t) = U_2 \cos(\omega t + \theta_2)$ aient la même amplitude.

On suppose maintenant que $R_1 = R_2 = R$ et $C_1 = C_2 = C$. On définit $x = RC\omega$.

3) Déterminer la valeur efficace de la tension $\underline{v}_1$ ainsi que son déphasage par rapport à $\underline{v}_e$. Calculer la tension maximum U_{1m} et le déphasage correspondant.

4) Déterminer, en fonction du produit RC, l'intervalle de fréquences pour lequel $U_1 \geq U_m/\sqrt{2}$. Quels sont les déphasages correspondant à ces deux fréquences ?

12 Facteur de puissance

Un moteur fonctionne sous une tension efficace U = 20 V, à la fréquence f = 50 Hz. Il est modélisé par une résistance R = 3 Ω en série avec une inductance L. L'intensité efficace du courant circulant dans le moteur vaut I = 4 A.

1) Calculer :

- l'inductance L,
- l'impédance réelle $Z = |\underline{Z}|$,
- la puissance P consommée par le moteur.

2) On place en parallèle avec le moteur deux ampoules en série consommant chacune une puissance de 8 W. Quel est le facteur de puissance du montage ?

3) Si les ampoules sont montées en dérivation, le résultat serait-il différent ? (Justifier).

13 Amélioration du facteur de puissance

Un moteur fonctionnant sous une tension efficace U_{eff} = 220 V à la fréquence f = 50 Hz est modélisé par une résistance R en série avec une inductance L. La puissance consommée est P = 1000 W alors que l'intensité efficace vaut I_{eff} = 10 A.

1) Déterminer les valeurs de L, de R et du facteur de puissance.

2) Quelle est la capacité C du condensateur qu'il faut placer en parallèle à ses bornes pour que le facteur de puissance soit égal à 1 ?

3) On utilise un condensateur de capacité C' < C. Le facteur de puissance vaut 0,95. Déterminer la valeur de C'.

14 Adaptation d'impédance

On relie les bornes de sortie d'un dipôle actif (amplificateur), équivalent à un générateur de Thévenin de f.e.m. sinusoïdale d'amplitude E_m et d'impédance interne, $\underline{Z}_A = R_A + jX_A$ à un dipôle passif (haut-parleur) d'impédance $\underline{Z} = R + jX$.

1) Déterminer la puissance complexe $\underline{P}$ puis la puissance moyenne P fournie au haut-parleur.

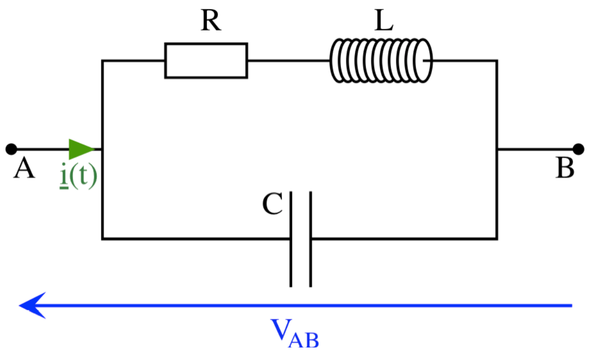
2) Comment faut-il choisir R et X (donc l'impédance $\underline{Z}$) pour que la puissance moyenne P soit maximale ? On dit alors que l'impédance du dipôle passif est adaptée à celle du dipôle actif. Calculer P_{max}.

3) Montrer que le diagramme d'impédance X(R) du dipôle passif est un cercle dont on déterminera le centre et le rayon en fonction de E_m, R_A, X_A, et P. Retrouver ainsi le résultat de la question précédente.

4) On impose la condition $X + X_A = 0$. Représenter en fonction du paramètre $x = R/R_A$, les variations du rapport P/P_{max} et du rendement en puissance ρ.

15 Circuit anti-résonant

On applique entre les points A et B du circuit suivant une tension sinusoïdale : $V_{AB} = v(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t)$
On donne les valeurs : R = 100 Ω, L = 0,1 H, C = 0,1 μF, V = 20 V



1) Donner l'expression de l'impédance complexe $\underline{Z}_{AB}$ équivalente au montage entre A et B (on exprimera Z_{AB} sous forme d'une fraction entre deux nombres complexes).

2) Donner l'expression complexe du courant $\underline{i}(t)$ circulant dans la branche principale en fonction de v(t), R, L, C et ω.

3) En déduire l'expression de la valeur efficace du courant : I_{eff}.

4) Pour le reste de l'exercice on supposera que $L\omega >> R$. Montrer qu'avec cette condition, l'expression du courant peut se mettre sous la forme :

5) Étudier les limites de la fonction $I_{eff}(\omega)$ lorsque ω est petit (mais $L\omega >> R$) et lorsque ω tend vers l'infini.

6) Déterminer la valeur ω_0 de la pulsation pour laquelle $I_{eff}(\omega)$ passe par un minimum et déterminer la valeur de ce minimum.

7) Tracer l'allure de $|I_{eff}(\omega)|$ dans le cas où R = 100 Ω.

8) Que se passe-t-il pour R = 0 Ω ?

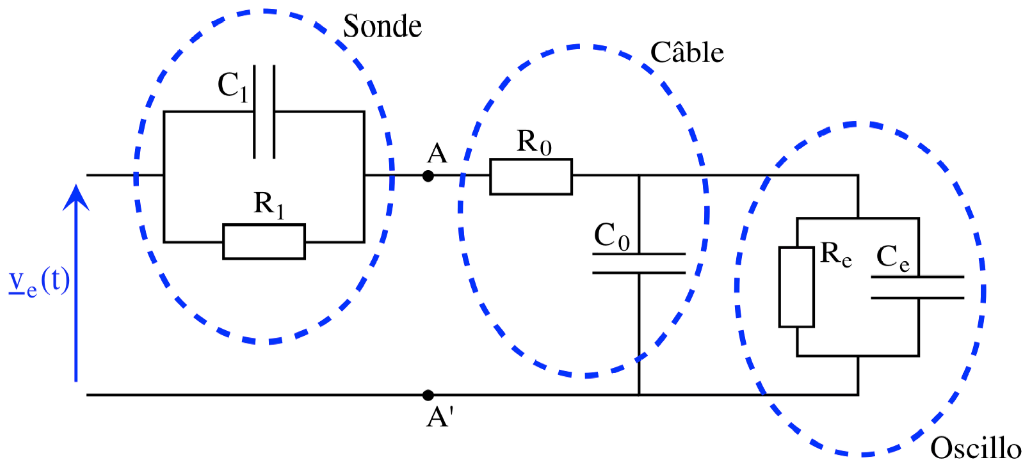
9) Justifier le nom de « circuit bouchon » donné à ce montage et le terme de pulsation d'« anti-résonance » pour ω_0.

10) En vous aidant de la question 1), donner une expression approchée de $\underline{Z}_{AB}(\omega_0)$ dans le cas où $R << L\omega_0$.

11) En déduire la valeur du déphasage du courant $\underline{i}$ par rapport à la tension $\underline{v}$ à l'anti-résonance.

16 Sonde atténuatrice d'un oscilloscope

L'oscilloscope que vous utilisez en TP ne permet pas de mesurer des tensions crête à crête supérieures à 40 V. Or il est fréquent que dans le milieu industriel on ait à mesurer des tensions plus élevées. Ce problème est résolu en intercalant entre la tension à mesurer et l'entrée de l'oscilloscope une sonde atténuatrice. Il s'agit tout simplement d'un diviseur de tension d'un facteur 10, 100 ou 1000 (vous avez pu remarquer en TP dans les menus des 2 voies des oscilloscopes l'indication « sonde » => attention lors de vos mesures à bien vérifier que la sonde est réglée au facteur multiplicatif 1).
Une telle sonde est constituée d'un câble coaxial, d'environ 1 m de longueur, comportant à une de ses extrémités un circuit (R_1, C_1) parallèle où la capacité C_1 est ajustable. Le câble coaxial peut être grossièrement modélisé par l'association d'une résistance R_0 = 270 Ω et d'une capacité C_0 qui peut varier sensiblement d'un câble à un autre (d'où la présence de la capacité ajustable C_1).
L'autre extrémité du câble coaxial est branchée à une entrée de l'oscilloscope, qui peut être modélisée par l'association en parallèle d'une résistance R_e = 1 MΩ et d'une capacité C_e de l'ordre de 30 pF (Figure ci-dessous).



La résistance R_0 étant de faible valeur devant les valeurs des autres impédances, elle peut être négligée.

1) Etablir l'expression de l'impédance $\underline{Z}_2$ à la sortie du câble coaxial, c'est-à-dire entre les bornes A et A'.

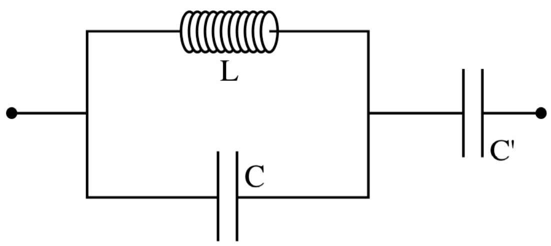
2) Etablir l'expression de l'impédance $\underline{Z}_1$ du circuit (R_1, C_1).

3) Pour une sonde atténuatrice de facteur 10 (k = 0,1), calculer la valeur de la résistance R_1 et donner l'expression de la capacité C_1.

Comme la valeur de C_0 est mal connue, l'expression précédente n'est pas utilisée. Dans la pratique, on branche la sonde à une tension en créneau de valeur connue et C_1 est ajustée de façon à observer le même signal en créneau sur l'écran de l'oscilloscope. Ce qui est une manière certaine de donner à C_1 la valeur désirée sans connaître la valeur de la capacité C_0 du coaxial.

17 Circuit LC équivalent au quartz piézoélectrique

Un quartz piézoélectrique est électriquement équivalent au circuit ci-dessous, avec L = 1 mH, C = 2 nF et C' = 10 pF. On applique au système entre A et B une tension alternative.

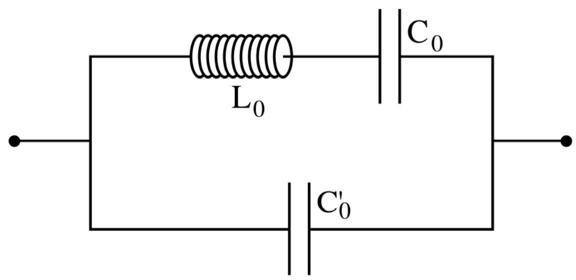


1) Déterminer l'impédance complexe $\underline{Z}$ du circuit. Calculer, en fonction de L, C et C' les pulsations ω_R et ω_A pour lesquelles le courant est infini (résonance) ou nul (antirésonance). Calculer les fréquences f_R et f_A. Que remarque-t-on ?

2) Exprimer l'impédance complexe $\underline{Z}$ du circuit en fonction de ω_R, ω_A et C'.

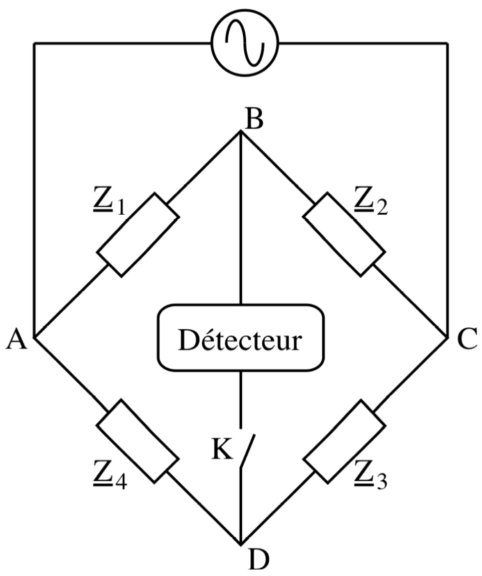
3) On fait osciller le quartz à la fréquence f_R. L'intensité du courant est alors très grande mais néanmoins finie, car le circuit a une résistance négligeable mais non nulle. Calculer la variation d'impédance par unité de fréquence lorsque la fréquence du générateur fluctue légèrement, l'amplitude restant constante. En déduire une propriété du quartz.

4) Monter que le quartz peut aussi être représenté par le circuit ci-dessous, dont on déterminera les éléments en fonction de C et C'. Montrer que la variation d'impédance par unité de fréquence du quartz autour de la fréquence f_R ne dépend que de L_0.



18 Mesures d'une fréquence, d'une inductance, et d'une capacité : Pont de Nernst, de Maxwell et de Sauty

On considère un pont de Wheatstone alimenté par une tension alternative de pulsation ω. On désigne par $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ et $\underline{Z}_4$ les impédances complexes des différentes branches (voir le schéma).



1) Etablir la relation entre $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$ et $\underline{Z}_4$ qui traduit l'équilibre du pont (courant nul dans le détecteur).

Pont de Nernst : mesure d'une fréquence

L'impédance $\underline{Z}_1$ est constituée d'une résistance R_1 en série avec une capacité C_1 ; l'impédance $\underline{Z}_2$ est constituée d'une résistance R_2 en parallèle avec une capacité C_2 ; $\underline{Z}_3$ et $\underline{Z}_4$ sont deux résistances pures : R_3 et R_4.

2) Montrer que l'équilibre du pont ne peut être obtenu que pour une seule valeur de la pulsation : ω_c que l'on exprimera en fonction de R_1, C_1, R_2 et C_2.

Pont de Maxwell : mesure d'une inductance.

L'impédance $\underline{Z}_1$ est constituée d'une bobine (L_1, R_1) ; l'impédance $\underline{Z}_3$ est constituée d'une résistance R_3 en parallèle avec une capacité C_3 ; $\underline{Z}_2$ et $\underline{Z}_4$ sont deux résistances pures R_2 et R_4.

3) Déterminer, à l'équilibre, l'inductance L_1 et la résistance R_1 de la bobine en fonction de R_2, R_3, R_4 et C_3.

Pont de Sauty : mesure d'une capacité.

L'impédance $\underline{Z}_1$ est un condensateur imparfait (modélisé par un condensateur parfait C_1 en parallèle avec une résistance de fuite R_1) ; l'impédance $\underline{Z}_4$ est constituée d'une résistance R_4 en parallèle avec une capacité C_4 ; $\underline{Z}_2$ et $\underline{Z}_3$ sont deux résistances pures R_2 et R_3.

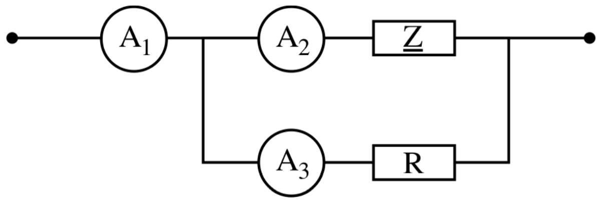
4) Déterminer, à l'équilibre, la capacité et la résistance de fuite en fonction de R_2, R_3, R_4 et C_4.

19 Méthode des trois Ampèremètres

On cherche à déterminer le facteur de puissance d'un dipôle quelconque, d'impédance complexe $\underline{Z}$, alimenté par une tension sinusoïdale en utilisant une résistance étalon R et trois ampèremètres ; le schéma réalisé est indiqué ci-dessous. Les ampèremètres mesurent les intensités efficaces I_1, I_2 et I_3.

1) Quel est le facteur de puissance du dipôle $\underline{Z}$? (pensez au diagramme de Fresnel des intensités).

2) Quelle est la puissance consommée par le dipôle $\underline{Z}$?



Application : un abonné EDF ($U_{eff} = 220$ V) branche soit une lampe ($I_{eff} = 12$ A), soit un moteur à caractère inductif ($I_{eff} = 30$A), soit les deux ($I_{eff} = 40$A).

3) Quel est le facteur de puissance de l'installation dans ce dernier cas ?

Les propositions pour améliorer ce document peuvent être envoyées à :

Benoit.Chabaud@univ-grenoble-alpes.fr