
Mesures électriques

- Tous les manuels d'introduction à l'électronique
- R. Journeaux, *Electricité, électronique, optique*, De Boeck (1998)
- H-PREPA *Electronique-Electrocinétique II*, 1ère année PCSI-PTSI (ancienne édition)
- H-PREPA *Electronique I*, 2ème année PSI (ancienne édition)
- Auvray, *Électronique des signaux analogiques*, chap. II

I) Introduction aux manipulations en électricité

Lexique d'électricité :

- **Banane** : connecteur simple, relié à un câble avec seul fil.
- **BNC** (connecteur «Bayonet Neill-Concelman») : connecteur double. Il est fait de deux fiches concentriques, entre lesquelles on peut appliquer une tension allant jusqu'à 1000 V. On l'utilise avec du câble bifilaire coaxial, également capable de supporter de telles tensions.
- **Carcasse** : capot d'un appareil.
- **GBF** : générateur basse fréquence (de quelques Hz à quelques MHz).
- **Masse** : à l'origine, désigne la carcasse conductrice d'un appareil. Par extension, désigne un point du circuit électrique qui sert de référence. Il ne faut pas la confondre avec la terre, même si c'est très souvent la terre qui est prise comme référence.
- **Masse flottante** : masse non reliée à la terre, que l'expérimentateur peut fixer.
- **Oscilloscope différentiel** : oscilloscope qui évalue la tension entre deux entrées, alors qu'un oscilloscope normal évalue la tension entre une entrée et sa carcasse.
- **Prise de terre** :
 - troisième fiche d'une prise électrique, reliée à un pieu conducteur planté dans la terre, au niveau des fondations du bâtiment ;
 - troisième fiche du cordon d'alimentation d'un appareil, reliée à sa carcasse si elle est conductrice. C'est une sécurité qui permet d'éviter que la carcasse soit sous tension en cas de défaut de l'appareil.
- **Résistance de charge** : résistance utile, branchée en aval du générateur, dans laquelle on cherche à débiter de la puissance.

1) Mesure de résistance

Nous allons ici commencer par mesurer de deux façons différentes une résistance R : via un ohmmètre ou deux multimètres.

a) L'instrument de base : l'ohmmètre

Rappelons qu'un ohmmètre ne s'utilise que sur des appareils débranchés !

- à cause de son principe de mesure : l'ohmmètre est un générateur de courant, qui débite un courant constant (dont la valeur est imposée par le calibre choisi), un voltmètre interne mesurant alors la tension à ses propres bornes,
- pour d'évidentes raisons de sécurité en haute tension.

À l'aide d'un ohmmètre, par exemple le multimètre Metrix MX579, trouver ou vérifier quelles sont les bornes connectées entre elles pour un câble coaxial BNC – banane et pour un BNC – BNC. De même, prendre un boîtier de résistances AOIP¹ et mesurer les résistances entre ses trois bornes.

b) Avec un voltmètre et un ampèremètre

Il existe deux méthodes pour mesurer tension et courant :

- courte dérivation : le voltmètre est branché aux bornes du dipôle, l'ampèremètre est à l'extérieur ;

¹«AOIP» signifie «Association des ouvriers en instruments de précision».

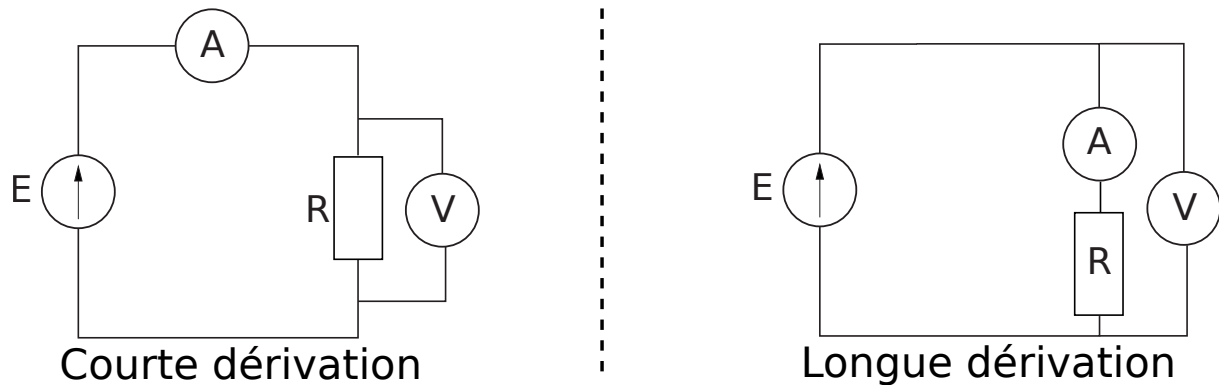


FIG. 1 – Méthodes de mesure d'une résistance.

- longue dérivation : on mesure la tension aux bornes de la branche contenant le dipôle et l'ampèremètre.

Expliquer et vérifier expérimentalement dans quelle gamme de résistances ces deux méthodes sont adaptées. On pensera en particulier à comparer la résistance aux résistances internes des appareils de mesure, sachant que lorsque deux composantes de résistances très différentes sont utilisées, on peut négliger l'effet de la résistance la plus faible lorsqu'elles sont en série, et de la résistance la plus grande lorsqu'elle sont en parallèle. En pratique des raisonnements similaires peuvent être effectués lorsqu'on utilise des dipôles linéaires, sachant qu'il faut alors comparer la norme de leurs impédances.

2) Quelle masse ?

La plupart des composants que vous utiliserez cette année sont fixés dans un boîtier. Ils peuvent :

- avoir une simple carcasse isolante ;
- avoir une carcasse métallique, ou «masse», éventuellement recouverte d'une protection en plastique (le plus fréquent). Cela permet d'isoler le composant de perturbations d'ondes électromagnétiques.

Vérifiez à l'ohmmètre le type du composant que vous utilisez.

Sur de vieux appareils, il y a parfois une prise séparée qui permet de brancher un fil directement sur la carcasse, ce qui peut éliminer des parasites. Les repérer à l'ohmmètre, par exemple sur les boîtes à décades de condensateurs, pour éviter de les confondre avec une vraie prise. Dans les cas génériques, ces prises ne sont pas utiles.

Vérifier à l'ohmmètre que :

- sur un appareil muni d'une prise BNC, le contact extérieur de la BNC est relié à la carcasse ;
- s'il y a deux prises BNC, leurs contacts extérieurs sont reliés.

3) Quelle terre ?

Si la carcasse d'un appareil est métallique, elle doit désormais par sécurité être connectée au troisième fil des prises électriques. Ce fil est lui-même relié à un pieu conducteur planté dans la terre, au niveau des fondations du bâtiment. Vérifier à l'ohmmètre que, quand on branche au secteur les cordons d'alimentation d'un générateur basse fréquence et d'un oscilloscope, leurs deux carcasses sont connectées. **Autrement dit, qu'on le veuille ou non, deux points du circuit peuvent être**

déjà reliés avant qu'on ait commencé à manipuler. À vous de voir si cela est un avantage ou un inconvénient dans le circuit que vous montez. Si vous avez un doute, toujours vérifier avec un ohmmètre !

Remarque : Si l'entrée d'un appareil possède une prise BNC dont le contact extérieur n'est pas relié à la terre, il est dit **flottant** (au sens où le potentiel correspondant n'est pas à la valeur du potentiel de la terre). La prise correspondante est également qualifiée de **flottante**.

II) Visualiser un signal : l'oscilloscope

On va se familiariser avec un premier oscilloscope numérique, le DSO-X 2002A. Dans la collection, vous trouverez également des oscilloscopes analogiques. Si ceux-ci sont plus délicats à manipuler, ils peuvent s'avérer utiles lorsque les oscilloscopes numériques atteignent leurs limites (à hautes fréquences par exemple)

1) Introduction

L'oscilloscope peut être à deux ou quatre voies. Les oscilloscopes récents (numériques) permettent directement un traitement de données, et ont une fiche USB pour exporter des captures d'écran ou les données brutes. Lors de l'utilisation des oscilloscopes, on évitera d'utiliser la commande *Autoset*, qui donne généralement un réglage peu adapté, a tendance à se caler sur du bruit, et ne permet surtout pas de développer/montrer vos capacités expérimentales. On prendra également le réflexe d'appuyer sur *Default Setup* à chaque fois qu'on prendra un nouvel oscilloscope, pour s'assurer de revenir en configuration standard. Il est utile de prendre ce réflexe pour la suite de l'année, qui permet d'éviter de perdre du temps car l'oscilloscope a été configuré de façon inadaptée dans des manipulations précédentes. On pourra même de manière générale ré-appuyer sur *Default Setup* entre deux manipulations, ou après avoir trop déréglé sans le vouloir son oscilloscope.

Allumer l'oscilloscope. Visualiser un signal sinusoïdal issu d'un GBF. La touche *Intensity* permet de régler la luminosité du spot lumineux, *Display* puis onglet *Grille* pour celle du quadrillage. Penser à adapter le signal à l'écran en jouant sur l'échelle verticale et la base de temps.

2) Mesure de tension : couplages AC et DC

Le signal d'entrée est un potentiel. L'oscilloscope comparera celui-ci à la masse du circuit.

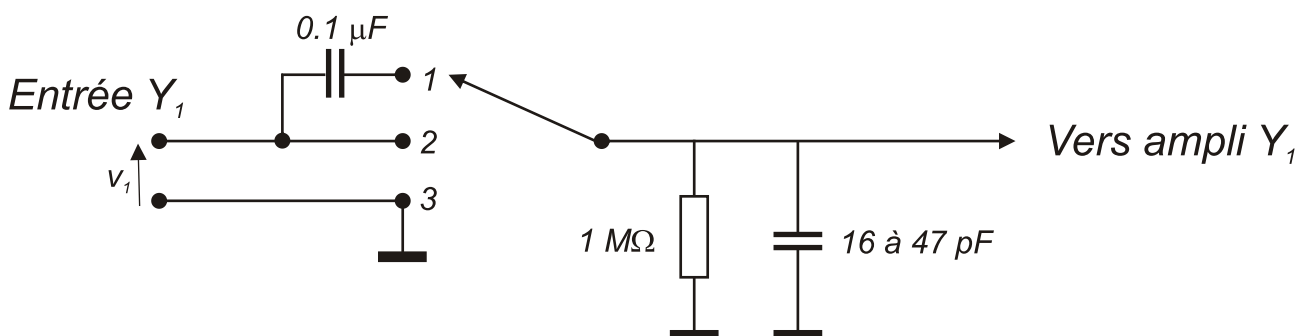


FIG. 2 – Schéma équivalent de l'entrée d'un oscilloscope

1. **AC** (alternative coupling) : entrée par le condensateur qui arrête les très basses fréquences et le continu ;
2. **DC** (direct coupling) : entrée normale, utilisée dans 95% des cas ;
3. **GD** (ground) : court-circuit du signal d'entrée sur la terre. Quand il est disponible², ce réglage permet de repérer et donc de modifier le zéro de l'axe vertical.

Toujours brancher le signal en DC ! (au moins pour commencer)

Pour passer d'un mode à l'autre, appuyer sur la touche de la voie souhaitée puis dans le menu *Voie* appuyer sur la touche de fonction *Couplage*. Tester l'effet de ces différents modes sur un signal de 1 kHz ayant un décalage (*offset*).

3) Déclenchement (important)

Pour afficher un signal, l'oscilloscope sonde le signal entrant, et le compare à une valeur constante donnée de tension : le *niveau de déclenchement (trigger level)*.

Si le déclenchement n'est pas correctement réglé, il n'est pas possible d'avoir de signal stable sur l'écran, ce qui interdit toute mesure.

Il existe plusieurs modes de déclenchement (*Trigger Mode*) pour un oscilloscope :

- **Mode normal** : l'oscilloscope compare le signal et le niveau du déclenchement, et lorsque le signal dépasse le niveau par *front montant* (*i.e.* de façon croissante), l'oscilloscope déclenche et affiche la tension sur l'écran de gauche à droite en temps réel, jusqu'à ce que celui-ci soit rempli. Il commence un nouvel affichage quand il détecte un nouveau déclenchement. **C'est LE mode de déclenchement à privilégier pour vos montages !**
- **Mode auto** : il est similaire au mode normal, mais l'oscilloscope force le déclenchement si le niveau n'est pas atteint après un certain temps. Il est donc à proscrire quand on observe des signaux "lents". Dans ce mode, on a toujours quelque chose d'affiché à l'écran, quelque soit le *level*. Il est utile, par exemple, quand on ne connaît pas a priori l'amplitude du signal sur lequel on cherche à déclencher. C'est le mode par défaut utilisé dans les oscilloscopes DSO. Pour le changer, appuyer sur *Mode/Coupling* et choisir *Mode normal*.
- **Mode défilement** : dans ce cas, l'oscilloscope affiche continûment le signal à l'écran, et lorsque celui-ci est rempli, le signal se décale de droite à gauche pour afficher la suite du signal. Ce mode peut être très utile pour observer des phénomènes de l'ordre du Hz.

Question : dans quel cas doit-on faire attention à l'utilisation de *front montant* ou *descendant* ?

Lorsque le mode de déclenchement est choisi, il faut se demander sur quelle voie déclencher.

- celui des voies 1 ou 2,
- un signal externe (en EXT, à l'arrière de l'oscilloscope numérique).

Dans un circuit utilisant un générateur basse fréquence (GBF), **toujours** utiliser le déclenchement *externe* sur la sortie synchro (ou TTL) du GBF, qui délivre des créneaux standardisés de tension (entre 0 et 5 V) synchronisés avec la sortie du GBF. C'est la méthode la plus propre. Visualiser le signal TTL d'un GBF sur l'oscilloscope, et le comparer au signal de sortie du GBF.

Enfin, les touches en haut à droite de l'oscilloscope peuvent être utiles dans des cas spécifiques :

- **Single** : Par défaut, l'oscilloscope remplit l'écran et le rafraîchit en permanence. La touche *Single* en haut à droite permet de demander à l'oscilloscope de s'arrêter après avoir rempli une

²L'oscilloscope DSO-X-2002A ne le propose pas. Dans ce cas, on utilise la flèche à gauche de l'écran qui indique le zéro des tensions pour régler le décalage vertical.

fois l'écran. Ce mode peut être pratique pour visualiser un phénomène unique : une décroissance exponentielle d'un oscillateur par exemple.

- **Run/Stop** : De façon similaire, appuyer sur *Run/Stop* arrête l'acquisition de l'oscilloscope (la touche est rouge), et ce jusqu'à ce qu'on appuie à nouveau dessus (la touche redevient verte).

4) Fonctions utiles

Sur l'oscilloscope on utilisera régulièrement :

- les calibres verticaux. Appuyer sur le bouton du calibre permet de passer du réglage grossier au réglage fin ;
- le décalage vertical et horizontal des signaux à l'aide des molettes spécifiques. Pour remettre le signal au centre de l'écran, appuyer sur la molette ;
- le cadran *Measure* : utilisation des cursors (*Cursors*), modification de l'affichage, dont la rémanence de la trace (*Display*), le repérage de fréquences, de tension crête-crête, etc. (*Meas*), et les opérations mathématiques dont l'addition, la soustraction, la transformée de Fourier (*Math*). Pour cette dernière, on peut régler la plage, le centre, etc ;
- la touche *Horiz* permet de passer en mode XY ou en mode *Défilement*.

III) Mesurer une tension en s'affranchissant de la masse

1) Deux méthodes pour s'affranchir de la masse du circuit

Dans le montage (a) ci-dessous, la masse est fixée à une des bornes du GBF. Cela peut poser problème pour mesurer par exemple la tension aux bornes du boîtier AOIP : si l'on branche naïvement les deux bornes à un oscilloscope, le condensateur sera court-circuité (puisque le GBF et l'oscilloscope sont reliés par leurs carcasses). Plusieurs solutions sont possibles :

- Mesurer une autre tension. Dans notre cas, on pourrait se satisfaire de la mesure de la tension du condensateur, et en déduire celle de la résistance (avec la touche *Math* d'un oscilloscope numérique par exemple) (montage a) ;
- Utiliser un oscilloscope différentiel (montage b) ;
- Utiliser un transformateur d'isolement (montage c).

a) Principe avec un oscilloscope numérique

Avec le passage aux oscilloscopes numériques, il est nettement plus simple de faire une opération (numérique) de soustraction pour s'affranchir du problème de masse. Pour cela, brancher les deux tensions à soustraire en voies 1 et 2, et utiliser la touche *Math*. Comme cela utilise deux voies, on peut éventuellement utiliser un oscilloscope 4 voies si l'on a d'autres tensions à mesurer que celles nécessaires à l'opération de soustraction.

b) Principe avec un oscilloscope différentiel

Lorsque des problèmes de masse se présentent, on peut utiliser un oscilloscope différentiel pour mesurer des différences de potentiels. Dans la collection, vous trouverez quelques oscilloscopes analogiques différentiels pour cette fonction. Ne pas réaliser le montage.

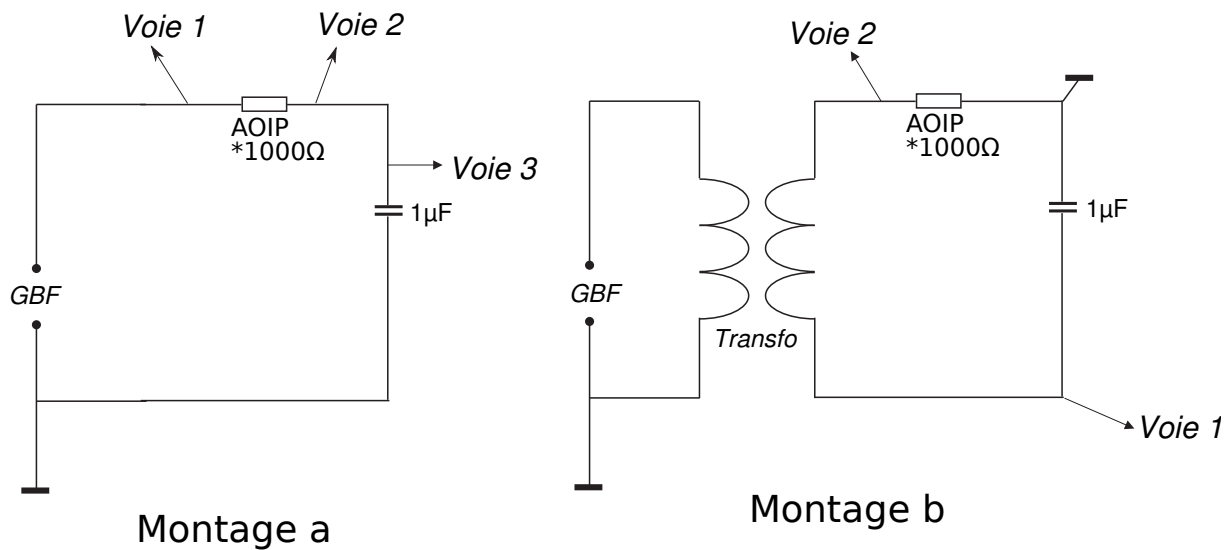


FIG. 3 – Mesure à l'oscilloscope et problème de masse

c) Utilisation d'un transformateur d'isolement

Le problème venant de la masse fixée à une borne du GBF, il faut construire un circuit où le GBF est isolé du reste du système. Pour cela, on utilise un transformateur de rapport 1 (autant de spires dans le primaire que dans le secondaire). Dans ce cas, on l'appelle *transformateur d'isolement*. Sur le schéma de la figure 3.c, le GBF est isolé. On a donc la liberté de choisir la masse (*i.e.* le potentiel de référence) dans le second circuit. Choisir alors le point médian entre la résistance et le condensateur.

2) Exemples d'utilisation : Impédance d'un circuit RC

Réaliser le montage du circuit RC de la figure précédente avec la seconde méthode. Si le cœur vous en dit, vous pouvez également essayer avec un oscilloscope numérique (4 voies) utilisé en différentiel.

Montrer la quadrature entre les tensions aux bornes de R et de C :

- en mesurant le décalage temporel entre les deux sinusoïdes,
- en passant en XY.

Repérer quelle tension est en avance sur l'autre.

3) Mesure d'une tension efficace à l'aide d'un voltmètre numérique

Les voltmètres alternatifs **analogiques** (à redresseur) donnent la valeur efficace pour des signaux sinusoïdaux uniquement ; pour d'autres types de signaux périodiques, il faut appliquer un coefficient correctif (parfois appelé *facteur de forme*). Les voltmètres *numériques* mesurent quant à eux en général la valeur efficace (dite aussi RMS, pour "Root Mean Square" = $\langle v^2 \rangle^{1/2}$) quelle que soit la forme du signal.

Pour une tension $v(t) = v_{DC} + v_{AC}(t)$,

- en position AC+DC (sur certains voltmètres), on lit $V_{eff} = (v_{DC}^2 + \langle v_{AC}^2 \rangle)^{1/2}$;
- en position DC, on lit v_{DC} ;
- en position AC, on lit $V_{eff,AC} = \langle v_{AC}^2 \rangle^{1/2}$.

Connecter un oscilloscope et un voltmètre numérique à un GBF délivrant un signal alternatif avec un décalage (*offset*), *i.e.* une tension continue additionnelle. Comparer $V_{eff,AC}$ et l'amplitude mesurée à l'oscilloscope pour différents types de signaux. Pour les relations entre valeur efficace, valeur moyenne et facteur de forme des différents signaux, voir Berty (pp. 34-38).

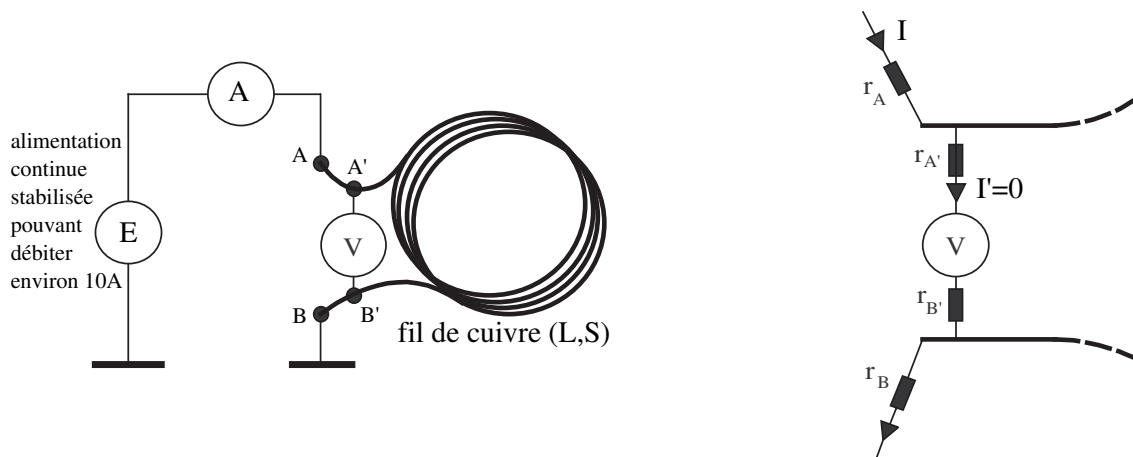
IV) Conductivité électrique. Principe de la mesure à 4 points

On dispose d'un long rouleau de fil de cuivre, de section S et longueur L connues.

1) Nécessité d'une mesure à 4 points

Lorsqu'on cherche à mesurer une résistance faible d'un dipôle petite devant le ohm, il faut prendre en compte des résistances qu'on ne considère que rarement : les résistances de contact (en l'occurrence celles des soudures). Pour mesurer la résistance réelle du fil, il faut utiliser une mesure dite "4 points" : les fils d'amenée du courant et ceux de la mesure de la tension ne doivent pas être connectés au même point du composant dont on veut mesurer la résistance.

Le voltmètre mesure une chute de tension entre ses deux points de mesure, qui incluent "dans l'ordre" un contact, le dipôle d'intérêt, puis un autre contact. Dans une mesure à deux points classique, la chute de tension mesurée s'écrit $\Delta V = 2R_{contact}I + R_{dip}I$. En général $R_{dip} \gg R_{contact}$, ce qui masque les résistances parasites. Mais si la résistance des contacts étant plus grande que celle du dipôle, alors la valeur mesurée sera faussée. L'idée est donc d'utiliser pour la mesure de tension des contacts dédiés dans lesquels passent un courant quasi-nul, ce qui éliminera la chute de tension parasite. Dans ce cas, seul le courant (très faible) passant par le voltmètre traversera les contacts, donc : $\Delta V = 2R_{contact}I_{volt} + R_{dip}I \approx R_{dip}I$ puisque $I_{volt} \ll I$



Sur la figure ci-dessus, on représente ces résistances parasites, et on voit que la mesure au voltmètre ne les fait effectivement pas intervenir puisque $r_{A'}$ et $r_{B'}$ sont parcourues par un courant I' négligeable devant le courant principal I .

2) Mesure de la conductivité électrique du cuivre

On peut accéder à la conductivité du cuivre (quelques centièmes d' Ω) en mesurant la résistance de ce fil.

Comparer les indications du voltmètre lorsqu'il est branché en A et B ou en A' et B' , et en déduire un ordre de grandeur des résistances parasites.

On pourra en montage effectuer cette mesure à différentes températures, en plongeant le fil dans un cristalliseur contenant de l'eau. Vérifier qu'on peut approximer localement la résistivité en fonction de la température par une loi affine : $\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]$ (loi de Matthiessen).³ Le coefficient α , appelé coefficient de température, est donné dans le Handbook.

V) Impédances d'entrée et de sortie

Journeaux, chap. 7, pp. 150-156

1) Mesure de l'impédance d'entrée d'un oscilloscope

L'impédance d'entrée de l'oscilloscope est modélisée par une résistance R en parallèle avec une capacité C branchées entre l'âme du connecteur et la masse.

Alimenter une résistance R' en série avec un oscilloscope par un GBF, de tension d'entrée V_e fixe (voir Fig. 6). Mesurer l'amplitude V_0 du signal sur l'oscilloscope pour $R' = 0$. Augmenter R' jusqu'à ce que V_0 soit divisée par 2. On a alors réalisé un pont diviseur de tension vérifiant $R = R'$. En considérant le déphasage entre V_e et V_0 , vérifier que la capacité joue un rôle négligeable ; sinon, réduire la fréquence (on pourra raisonner sur la valeur absolue de leur impédances respectives pour comprendre quelle composante joue un rôle négligeable dans la limite de basse fréquence). Pour mesurer la capacité C , remplacer R' par une boîte à décade de condensateurs de capacité C' et procéder comme précédemment à fréquence suffisamment élevée (ce qu'on peut justifier similairement que précédemment). Lorsque $C' = C$, la tension V_0 est divisée par 2.

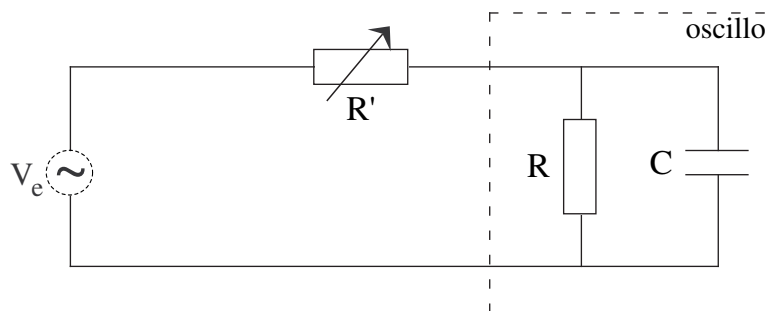


FIG. 4 – Impédance d'entrée d'un oscilloscope

Note 1 : La capacité mesurée inclut celle du câble coaxial, qui vaut 100 pF par mètre et qui est en parallèle. Celle-ci s'ajoute donc à la capacité d'entrée de l'oscilloscope mentionnée en général sur le boîtier de l'oscilloscope.

³En toute rigueur, la section et la longueur du fil augmentent avec la température. Il faudrait donc en tenir compte pour remonter à la conductivité. Cet effet est cependant négligeable ici.

Note 2 : Pour mesurer C , on peut aussi se dispenser du condensateur C' et se servir de R' à fréquence élevée. Attention : lorsque $R' = 1/C\omega$, le signal est divisé par $\sqrt{2}$, non par 2 (pourquoi ?).

2) Mesure de la résistance de sortie d'un générateur basse fréquence

On suppose dans tout ce paragraphe que l'impédance de sortie du GBF (noté aussi BF) est une résistance pure.⁴

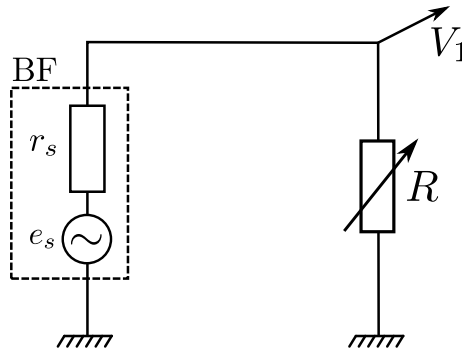


FIG. 5 – Impédance de sortie d'un GBF

a) 1ère méthode

On effectue un montage analogue à celui de la partie précédente. Cette méthode, très simple dans son principe, a l'inconvénient de faire débiter un fort courant au générateur.

- Mesurer V_1 lorsque R est infinie. On a alors $V_1 = e_s$.
- Ajuster R pour avoir $V_1 = e_s/2$. S'il y a distorsion, réduire e_s .

b) 2ème méthode (facultatif)

Cette méthode consiste à réaliser une adaptation d'impédance. Lorsque la charge (ici la résistance R) est adaptée, elle reçoit un maximum de puissance de la source. Dans le cas présent où l'on suppose l'impédance du générateur purement résistive, cela revient à étudier $P = \frac{V_1^2}{R} = \frac{R}{(r_s + R)^2} e_s^2$, courbe qui atteint son maximum en $R = r_s$.

VI) Condensateurs

Encyclopedia Universalis, à l'article "diélectriques" : § 2, 3, 8, 9 et 10.

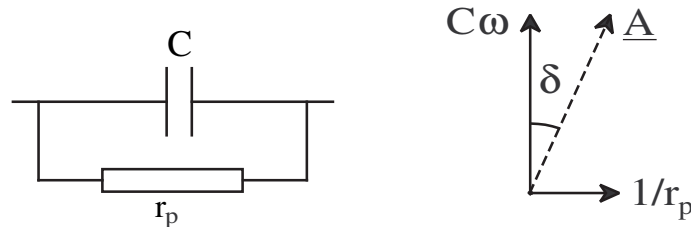
1) Étude des condensateurs en basse fréquence

Journeaux, Chap. 3, p. 80

⁴Il est possible de compléter les expériences afin de le vérifier. En pratique, dans le cas d'un GBF, le modèle d'une résistance pure est valable.

a) Modélisation des pertes

Pour tenir compte de la puissance active dissipée dans un condensateur réel, on introduit dans son schéma équivalent une résistance qui peut être placée arbitrairement en parallèle (r_p) ou en série (r_s) avec la capacité pure. Dans la suite, nous considérons le modèle avec r_p .



L'admittance du condensateur étant $A = jC\omega + 1/r_p$, on définit le coefficient de pertes D par le rapport de sa partie réelle à sa partie imaginaire : $D = 1/r_p C\omega \equiv \tan \delta$; δ est appelé *angle de pertes*. On définit aussi le facteur de qualité du condensateur par $Q = 1/D$.

b) Utilisation du LCR-mètre

Il s'agit d'un appareil qui permet de mesurer inductances et capacités, ainsi que leurs coefficients de pertes. N'utiliser que le ELC-131D, les autres sont trop imprécis pour la mesure des pertes.

Étudier divers condensateurs ; comparer notamment deux condensateurs de $1 \mu\text{F}$, l'un chimique et l'autre non. Opérer aux deux fréquences disponibles, 1000 Hz et 120 Hz. Déterminer les éléments de leur modèle à ces deux fréquences, illustrant ainsi le fait que les paramètres du modèle dépendent de la fréquence. Ces deux condensateurs vont servir par la suite. On retiendra qu'un condensateur non chimique a un comportement proche de l'idéal (typiquement, $\tan \delta \approx 10^{-3}$), c'est pourquoi dans la suite on utilisera un condensateur chimique ($\tan \delta \approx 10^{-1}$) pour mettre les pertes en évidence.

Remarque : Le LCR-mètre fonctionne par détection synchrone (cf. H-Prépa, *Électronique I*, 2^{ème} année PSI, p. 243 ou Duffait). Principe de fonctionnement classique, à connaître !

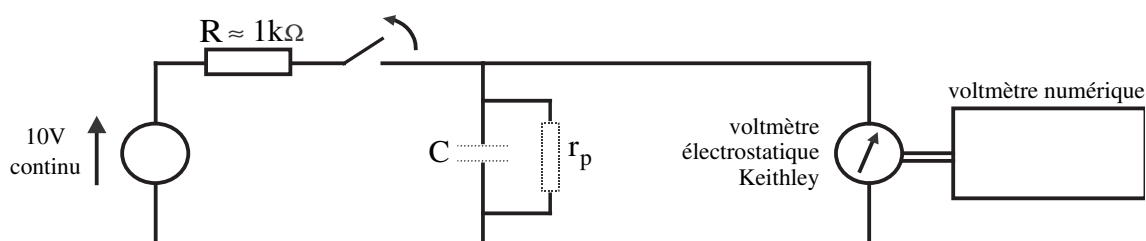
c) Fuite d'un condensateur (facultatif)

Berty, p. 189

Un condensateur chargé puis isolé de l'extérieur, perd progressivement sa charge. Le modèle introduit précédemment (résistance en parallèle d'un condensateur parfait) permet d'expliquer ce phénomène. Cependant, l'expérience montre que cette résistance r_p varie beaucoup dans le temps et présente des phénomènes d'hystérésis, ce qui fait que **l'auto-décharge d'un condensateur (chimique ou non) n'est pas du tout exponentielle**, contrairement à ce qui est souvent dit dans les livres. De plus, les temps caractéristiques de décharge étant toujours supérieurs à 10^3s , une étude sérieuse de cette question est trop longue pour un montage d'agrégation.

d) Expérience

Réaliser le montage ci-dessous. Attention, les alimentations continues du TP sont des $-12/0/+12\text{V}$ (ou en 10V , peu importe). La borne centrale n'est pas la carcasse mais bien le zéro par rapport auquel est fixé le $+12/-12$. Il faut donc relier cette borne à la masse du circuit.



La résistance R , placée en série avec le générateur, a pour but de réduire l'irréversibilité qui accroît les phénomènes d'hystérésis. Pour mesurer la tension du condensateur, il faut utiliser un voltmètre qui ne perturbe pas la mesure ; le voltmètre analogique Keithley, de résistance interne $10^{14}\Omega$, devrait convenir ! Pour améliorer la précision de la lecture, brancher un voltmètre numérique sur la sortie analogique à l'arrière du Keithley.

Ouvrir l'interrupteur et mesurer la chute de tension au bout de quelques dizaines de secondes. Sur une aussi courte durée, on peut considérer que la résistance r_p n'a pas varié ; on peut donc définir un temps caractéristique de décharge $\tau = r_p C$, qui vérifie : $\Delta v / \Delta t \approx -v / \tau$, où v est la tension aux bornes du condensateur. En déduire la valeur expérimentale⁵ de τ .

Un montage plus simple est possible avec un condensateur chimique de technologie récente, et de très forte capacité⁶ (10 F). On peut prendre le seul voltmètre numérique de résistance interne $10\text{ M}\Omega$. Il est en revanche nécessaire de diminuer fortement la résistance R en série avec le générateur, afin d'avoir un temps de charge raisonnable. Pour interpréter ces modifications du montage, on pourra évaluer l'ordre de grandeur du temps de charge à travers R , et du temps de décharge à travers le voltmètre.

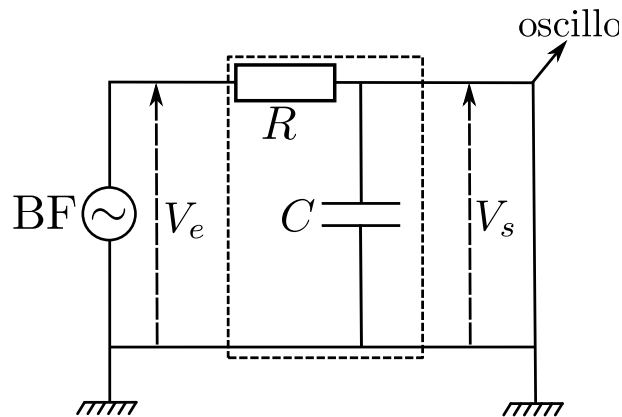
e) Note sur les causes physiques des pertes et des fuites

Fréquences élevées : aux fréquences supérieures à 1 MHz, les pertes sont dues aux charges liées qui se déplacent, à l'échelle microscopique, en retard sur l'action du champ électrique.

Basses fréquences : en pratique il y a toujours, même dans les bons isolants, une très faible concentration de charges libres (ions et électrons). En basse fréquence, les pertes sont dues au déplacement macroscopique de ces charges libres qui migrent sur de grandes distances.

Aux temps longs, on observe un phénomène de fuite : ces charges libres ont le temps d'atteindre les électrodes, ce qui décharge progressivement le condensateur.

La résistance de perte et la résistance de fuite traduisent des phénomènes voisins, mais correspondent à des temps caractéristiques très différents. Il ne faut donc pas s'étonner de l'énorme écart entre les deux.



2) Circuit RC : régime permanent, régime transitoire

a) Régime harmonique, fonction de transfert

Visualiser à l'oscilloscope l'évolution de l'amplitude et de la phase du signal de sortie. Effectuer, à une fréquence, la mesure du gain en décibels et de la phase.

Pour le tracé complet du diagramme de Bode, il faudrait utiliser le programme *Bode* de l'ordinateur (objet d'un autre TP de la série 0). Ici, vérifier rapidement que le circuit a bien le comportement attendu (filtre passe-bas).

b) Réponse à un échelon de tension (réponse indicielle)

On réalise en pratique des échelons de tension avec un générateur BF délivrant des créneaux de période très grande devant le temps caractéristique RC .

Étudier le régime transitoire qui prend naissance à l'établissement et à l'annulation de la tension. Mesurer la constante de temps du circuit. Quelle est sa relation avec la fréquence de coupure mesurée en fréquentiel ?

VII) Induction

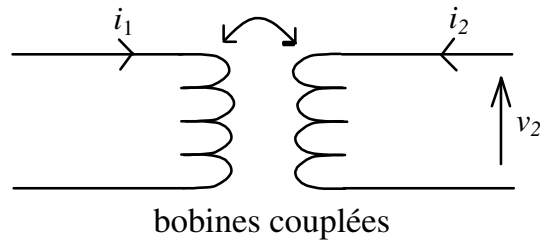
On étudie ici quelques propriétés des bobines.

1) Inductance mutuelle et coefficient de couplage

La proximité entre deux circuits inductifs fait apparaître un coefficient d'induction mutuelle M , qui dépend de la géométrie de l'ensemble. On a alors :

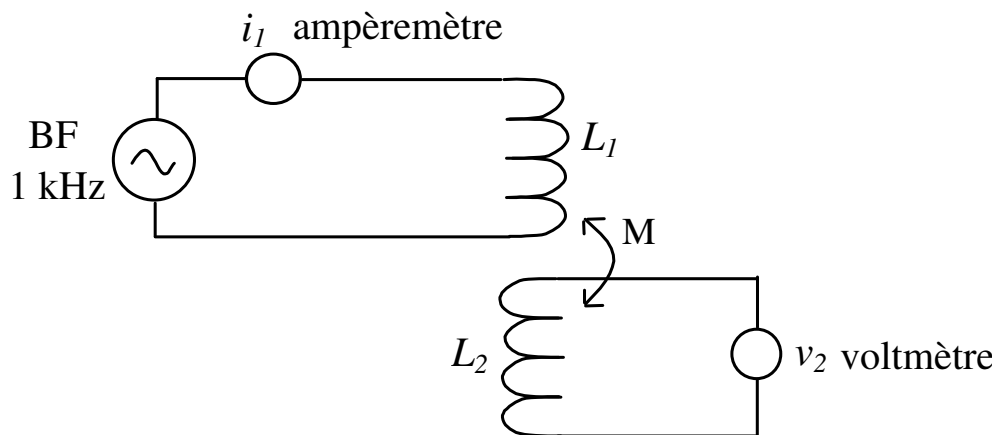
⁵Avec les condensateurs non chimiques usuels, on trouvera initialement $\tau \approx 10^4$ s. Puis, après avoir laissé le condensateur en charge, on reprend la mesure 1 heure plus tard, on constatera que τ a gagné un ordre de grandeur. Par contre, si l'on inverse la polarité, τ redevient de l'ordre de 10^4 s. Pour les condensateurs chimiques, le phénomène est identique avec initialement $\tau \approx 10^3$ s.

⁶Cette capacité est très fragile, détruite dès qu'elle est alimentée sous une tension supérieure à sa tension nominale, ou mal polarisée. On lui a donc placé en parallèle des diodes têtes-bêches. Pour éviter qu'elles ne perturbent la mesure, travailler à une tension un peu plus basse que la tension nominale.



$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} .$$

Dans le cas où $i_2 = 0$ (circuit ouvert), on aura donc $v_2 = jM\omega i_1$ en régime sinusoïdal ($j^2 \equiv -1$). On fera l'expérience avec 2 bobines Leybold accolées (voir figure ci-après).



En déduire le coefficient de couplage défini par $\theta = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, en déterminant L_1 et L_2 avec un LCR-mètre.

Complément : Fermer le circuit magnétique à l'aide d'un étrier Leybold (en fer doux) et déterminer à nouveau θ (justifier qualitativement la nouvelle valeur obtenue). Il y a cependant une difficulté : le comportement devient très non linéaire (pourquoi ?).

On peut aussi faire cette expérience avec les solénoïdes enroulés l'un autour de l'autre, avec ou sans le noyau de fer doux (attention, il aura ici un rôle un peu différent de l'étrier mentionné précédemment).

2) Autoinduction : surtension aux bornes d'une bobine

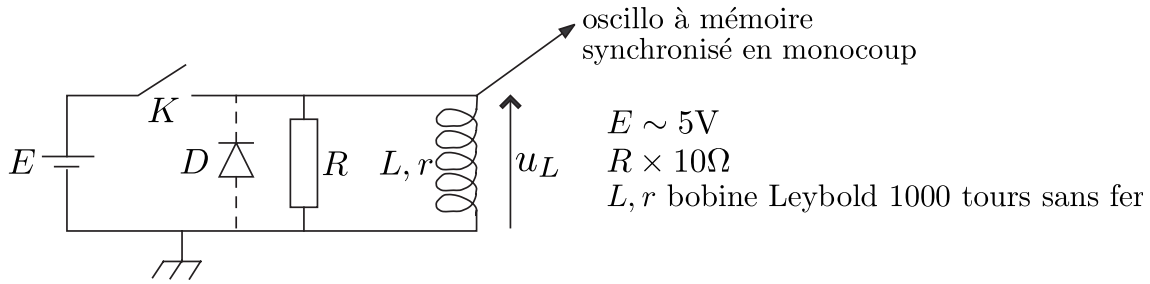
– BUP 647 (octobre 1982)

Dans cette partie, on modélise les pertes ohmiques dans les enroulements par une résistance r en série avec une bobine idéale L .

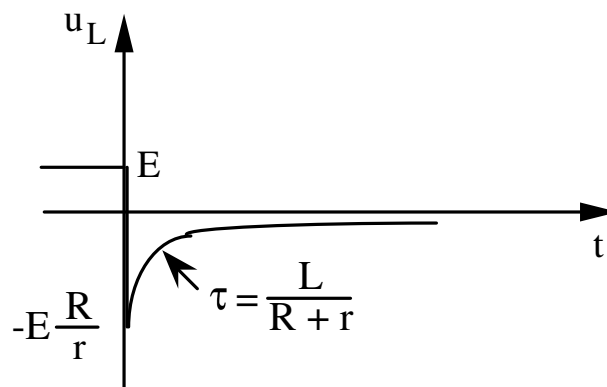
Lors de l'ouverture d'un interrupteur dans certains circuits selfiques, il apparaît une surtension. Cet effet est parfois recherché⁷ mais souvent indésirable. On l'annule en ajoutant une diode en parallèle sur la self.

⁷Cette surtension à l'ouverture est utilisée dans divers dispositifs servant à obtenir des hautes tensions : bobine de Ruhmkorff, allumage de voiture, clôture électrique...

Réaliser l'expérience ci-dessous :



En l'absence de la diode D , lors de l'ouverture de K on observe l'évolution suivante :



Interprétation K fermé, le courant qui circule dans L vaut $i = E/r$. A l'ouverture de K , L impose la continuité de i qui ne peut que "remonter" dans R . Pourquoi la durée de l'impulsion électrique est-elle d'autant plus courte que la surtension est grande ?

Dans le cas où R est supprimée ($R \rightarrow \infty$), le calcul indique une surtension infinie, mais en réalité il faut faire intervenir le comportement non idéal de K et la capacité parasite de la self.

Ajouter la diode et constater l'amélioration. Quel nom donne-t-on à ce type de diode ?