

# TP1 - Mesures en électrocinétique

**Objectif** : revoir le fonctionnement des appareils de mesure usuels en électrocinétique.

## I Matériel usuel d'électrocinétique

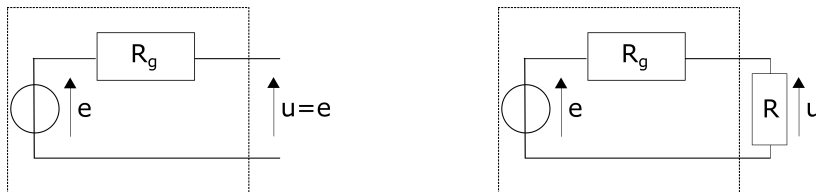
### I.1 Le générateur basses fréquences (GBF)

cf. Fiche méthode : GBF RIGOL DG1022

Le GBF est un appareil pouvant délivrer des signaux de fréquence inférieure à quelques MHz. La forme des signaux (sinusoïdal, carré, triangulaire...), ainsi que ses caractéristiques générales (amplitude, fréquence...) peuvent être sélectionnées par l'utilisateur.

Les voies de sortie du GBF possèdent une impédance de  $50\ \Omega$ . Elles peuvent être modélisées par un générateur de tension idéal  $e(t)$  en série avec une résistance  $R_g$  de  $50\ \Omega$  qui constitue la résistance interne du GBF. La tension délivrée à vide (lorsqu'aucun dipôle n'est connecté) diffère donc de la tension en charge.

Si on branche en sortie une résistance  $R$ , la tension de sortie  $u$  vaut :  $u(t) = \frac{R}{R + R_g} e(t)$



Si  $R \gg R_g$ , la résistance interne du générateur est négligeable :  $u(t) \simeq e(t)$ .

Un GBF possède une bande-passante limitée : elle est précisée dans la notice du constructeur, et implique que l'amplitude du signal délivré peut fortement diminuer à hautes fréquences.

### I.2 Le multimètre

C'est un appareil polyvalent pouvant mesurer la valeur d'une résistance, d'un courant, d'une tension continue ou non selon l'entrée utilisée : **il est donc essentiel que la grandeur à mesurer corresponde bien à cette entrée.**

Un multimètre permet de mesurer la valeur moyenne ou la valeur efficace d'une tension ou d'une intensité, selon le mode utilisé. Plusieurs modes sont disponibles :

- **le mode DC** (direct current) : un filtre passe-bas **élimine la composante alternative** du signal. Le multimètre mesure alors **la valeur moyenne** de la tension ou de l'intensité ;
- **le mode AC** (alternative current) : un filtre passe-haut **élimine la composante continue** du signal. Le multimètre mesure alors **la valeur efficace du signal moins sa valeur moyenne** ou valeur RMS (root mean square).

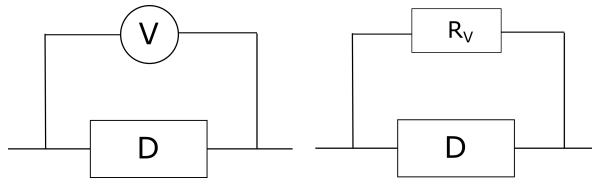


Certains appareils possèdent un mode AC+DC permettant de mesurer la valeur efficace du signal entier ou valeur TRMS (true root mean square).

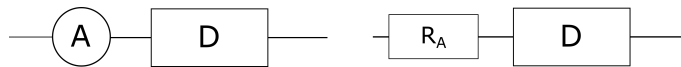
**Rappel** : définition de la valeur efficace d'un signal :  $U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v^2(t') dt'}$ . Pour un signal sinusoïdal,  $U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$  avec  $U_m$  l'amplitude du signal  $u(t)$ . **Ce résultat est généralement faux pour toute autre forme de signal** ; le calcul de l'intégrale sur la période  $T$  du signal doit alors être mené.

Un multimètre possède une bande passante (en général plus faible que celle d'un oscilloscope) qui limite son usage aux hautes fréquences.

**Utilisation en voltmètre** Il doit être placé en parallèle du composant  $D$  aux bornes duquel on veut mesurer la tension. Le voltmètre peut-être modélisé par une résistance  $R_v$  de l'ordre du  $M\Omega$ , un courant très faible traverse le voltmètre. Si le module de l'impédance de  $D$  reste négligeable devant  $R_v$  la présence du voltmètre ne perturbera pas le fonctionnement du circuit.



**Utilisation en ampèremètre** Le multimètre doit être placé en série dans la branche du circuit dont on mesure l'intensité. L'ampèremètre peut-être modélisé par une résistance  $R_a$  de l'ordre du  $\Omega$ , une très faible chute de tension est provoquée par son branchement, en général négligeable devant la tension aux bornes du dipôle  $D$ .



**Utilisation en ohmmètre** Le multimètre doit être branché en circuit fermé sur le dipôle dont on veut mesurer la résistance : on ne peut l'utiliser que pour mesurer la résistance d'un composant passif **et celui-ci doit être débranché du circuit**. L'appareil de mesure impose un courant connu, et mesure la tension qui s'établit à ses bornes. Le rapport de ces deux grandeurs permet d'accéder à la résistance du dipôle étudié.

**Choix du calibre** Pour bénéficier de la meilleure résolution possible (et donc de la meilleure précision) on doit choisir le calibre **immédiatement supérieur à la valeur à mesurer**.

Lorsque le calibre est inférieur à la valeur mesurée, l'instrument sature et affiche un message d'erreur.

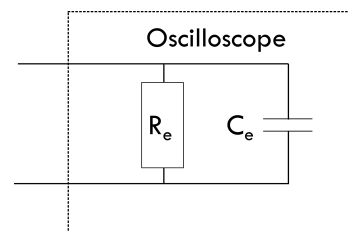
## 1.3 L'oscilloscope

### 1.3.1 Présentation générale

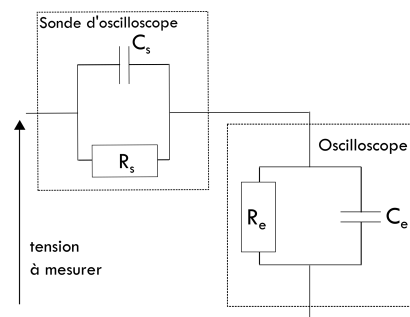
cf. Fiche méthode : Oscilloscope Keysight DSO-X 2002A

### 1.3.2 Modélisation électronique des voies d'entrée

**Impédance d'entrée :** Comme tout instrument de mesure l'oscilloscope perturbe le montage sur lequel il est connecté (en général cette perturbation est négligeable). L'étage d'entrée d'un oscilloscope peut-être modélisé par une résistance  $R_e$  de l'ordre du  $M\Omega$  en parallèle avec un condensateur de capacité  $C_e$  de l'ordre de 25 pF.



**Sonde d'oscilloscope :** en cas de besoin (mesures aux bornes d'une impédance importante ou d'une capacité faible (cf. oscillateurs)), il pourra être utile voire nécessaire d'utiliser une sonde d'oscilloscope. Le modèle d'une telle sonde est donné ci-contre. Les composants  $R_s$  et  $C_s$  sont choisis tels que  $R_s = 9R_e$  et  $C_s = C_e/9$ , si bien que la tension en entrée de l'oscilloscope est divisée par un facteur 10. Par contre l'impédance ramenée au niveau du montage est multipliée par un facteur 10.



## II Méthodes de mesure à l'oscilloscope

### II.1 Modes d'affichage et stabilisation d'un signal

L'affichage est réglé par la touche "Horiz". Trois modes de visualisation sont possibles :

- mode balayage (le plus courant) qui permet d'observer l'évolution des signaux présents sur les deux voies en fonction du temps ;
- mode défilement, qui permet le suivi au cours du temps d'un signal dont les variations d'amplitude, de fréquence, de phase... ne peuvent être facilement suivies dans le mode balayage ;
- mode XY, ou Lissajous, qui représente une entrée en fonction de l'autre.

La synchronisation (ou déclenchement, ou trigger) permet l'observation d'un signal stable à l'oscilloscope en permettant de synchroniser le signal à afficher avec la rampe qui commande le balayage horizontal ; ainsi les passages successifs sur l'écran se superposent exactement. Si la synchronisation n'est pas bonne le signal défile sans cesse sur l'écran.

**Méthode pour stabiliser le signal via le trigger** Pour stabiliser le signal il faut aller dans le menu « trigger » de l'oscilloscope :

- faire le bon choix de la voie par rapport à laquelle on synchronise (en général c'est la voie où se trouve le générateur) ;
- choisir le niveau de synchronisation : bouton « level ». Il est impératif que cette valeur de tension soit atteinte par le signal que l'on cherche à observer ;
- choisir le sens de variation du signal (montant ou descendant) : bouton « slope ». Sur les signaux couramment observés en TP, ce choix ne modifie généralement pas la qualité de la stabilisation.

Pour plus d'informations, on pourra consulter le document « oscilloscope\_ principe\_ robertponge » déposé dans le dossier TP de Cahier de Prépa.

### II.2 Mesures d'amplitude

**Modes AC / DC** Ces deux modes sont accessibles à partir du bouton le plus à gauche sous l'écran d'affichage, une fois l'une des voies de visualisation activée.

Le mode **DC** (direct current), encore nommé **CC** (courant continu), permet d'observer l'intégralité du signal observé. Il faut toujours observer les signaux dans ce mode lorsque le signal possède une composante continue.

Le mode **AC** (alternative current), permet de filtrer la tension  $e(t)$  à l'entrée de l'oscilloscope. Ce signal passe par un filtre passe haut de fréquence de coupure 10 Hz qui élimine sa composante continue. On visualise en fait la différence entre le signal et sa valeur moyenne :  $e(t) - \langle e(t) \rangle$

**Technique de mesure de l'amplitude d'un signal périodique** Les réglages de la base de temps doivent être tels que l'on obtient une à trois périodes sur l'écran et le réglage de l'amplitude doit permettre d'observer la courbe la plus grande possible sans déborder de l'écran.

La mesure peut s'effectuer à l'aide des curseurs (boutons "Cursors"), souvent utilisés lorsque les signaux ne sont pas très stables : l'évaluation de l'amplitude s'effectue alors "à l'oeil". Il est également possible d'utiliser les mesures automatiques proposées par l'oscilloscope via le bouton "Meas".

### II.3 Mesures de déphasage

**Rappel : déphasage entre deux signaux** Un déphasage est l'écart de phase entre deux signaux. Il faut commencer par déterminer le signe du déphasage en identifiant l'avance ou le retard de la tension d'entrée sur la tension de sortie. Considérons deux signaux sinusoïdaux  $s_1(t) = S_{01} \cos(\omega t + \varphi_1)$  et  $s_2(t) = S_{02} \cos(\omega t + \varphi_2)$ , avec  $\omega$  la pulsation des signaux et  $\varphi_i$  la phase à l'origine du signal  $i$ . Dans le cas de l'analyse d'un filtre,  $s_1(t)$  peut représenter le signal d'entrée du filtre et  $s_2(t)$  le signal de sortie.

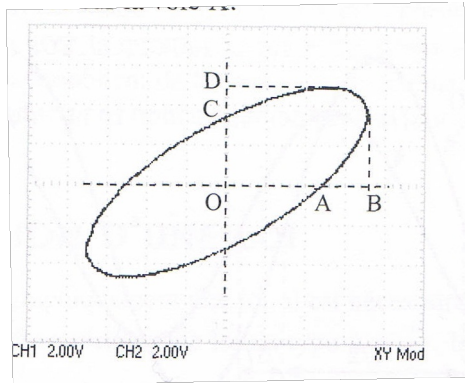
On définit  $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ , le déphasage de  $s_1(t)$  par rapport à  $s_2(t)$  :

- le signal 1 présente en premier un maximum à l'écran : il est en avance sur le signal 2.  $\Delta\varphi_{12}$  est donc négatif ;
- le signal 1 présente en second un maximum à l'écran : il est en retard sur le signal 2.  $\Delta\varphi_{12}$  est donc positif.

*Remarque* : il est bien sûr possible de définir le déphasage de  $s_2(t)$  par rapport à  $s_1(t)$ ,  $\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$ . Les résultats précédents doivent alors être inversés.

**Techniques de mesure de déphasage à l'oscilloscope** Pour la mesure du déphasage, plusieurs possibilités :

- soit l'oscilloscope fait la mesure directement (cf. bouton "Meas") : c'est la méthode la plus classique. il faut cependant s'assurer qu'au moins deux périodes de chaque signal soient visibles à l'écran ;
- soit on mesure l'écart  $\Delta t$  à l'aide des curseurs temporels, entre les annulations sur les fronts montants ou descendants des deux signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$  ainsi que la période  $T$  du signal. Alors :  $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T}$  ;
- utiliser le mode XY (Lissajous) : le signal  $s_2(t)$  est visualisé selon Y et le signal  $s_1(t)$  selon X. On observe une ellipse dans le cas général.



- Pour le gain :  $OD = S_{02}$  ;  $OB = S_{01}$  ;
- pour le déphasage :  $|\sin(\Delta\varphi)| = \frac{OA}{OB} = \frac{OC}{OD}$ .

Ce mode est surtout intéressant (et c'est le plus précis) pour repérer un déphasage de  $0^\circ$  (signaux en phase : on observe une ligne droite alignée sur la première bissectrice) ou  $180^\circ$  (signaux en opposition de phase : on observe une ligne droite alignée sur la deuxième bissectrice).

**Attention !** Cette méthode ne permet de connaître le déphasage qu'à  $180^\circ$  près (le sens de parcours de l'ellipse n'est pas connu).

## II.4 Etablissement des diagrammes de Bode en amplitude et en phase d'un filtre

Un diagramme de BODE est la représentation graphique du comportement fréquentiel d'un système (filtres linéaires d'ordre 1 ou 2 en TP). Il est composé de deux parties : le tracé du **gain logarithmique** (en décibels, dB) en fonction de la fréquence, et celui du **déphasage** (en degrés ou radians) en fonction de la fréquence. L'échelle des fréquences est souvent choisie logarithmique du fait de la définition du gain :  $G_{dB} = 20 \log \left( \frac{|S|}{|E|} \right)$ , où  $E$  et  $S$  sont respectivement les amplitudes des signaux d'entrée et de sortie de filtre.

**Remarque importante : les diagrammes de Bode ne s'obtiennent qu'en alimentant le filtre par un signal d'entrée sinusoïdal !**

En effet, tout autre signal périodique n'est pas monochromatique : la présence de plusieurs fréquences empêche d'analyser le comportement fréquentiel du filtre.

Avant de faire les mesures :

- bien régler la position des zéros, l'oscilloscope doit être en mode DC ;
- faire un balayage en fréquence sur plusieurs décades afin de vérifier :
  - le comportement du filtre (amplitude et déphasage en basses fréquences, à la fréquence de coupure, en hautes fréquences) ;
  - si le signal de sortie ne sature jamais ; si c'est le cas, diminuer l'amplitude du signal d'entrée ;
  - si l'amplitude du signal d'entrée ne varie pas avec la fréquence ; si c'est le cas, cela signifie que l'impédance d'entrée du montage atteint des valeurs de l'ordre de celle de la résistance d'entrée du générateur. Dans ce cas l'insertion d'un montage suiveur entre le générateur et le montage permet de résoudre le problème (cf. chapitre sur les ALI).

Mesurer ensuite l'amplitude du signal d'entrée (qui ne variera pas a priori au cours du TP) et simultanément la fréquence du signal d'entrée, l'amplitude du signal de sortie et le déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie à l'aide de l'oscilloscope.

*Remarque* : deux multimètres pourraient être employés pour les mesures d'amplitude des signaux  $e(t)$  et  $s(t)$ , mais leur bande passante réduite limite souvent les études aux plus basses fréquences.

Reporter les résultats sur un graphique en échelle semi-log ou (log ; log) sur papier millimétré, dans un tableur (Calc) ou à l'aide d'un logiciel adapté (Régressi, Latis Pro...). Les mesures pourront se faire, par décade, aux fréquences commençant par 1, 2, 5 ou 8 : (10 Hz, 20 Hz, 50 Hz, 80 Hz), puis (100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 800 Hz), (1000 Hz, 2000 Hz, 5000 Hz, 8000 Hz) etc. Il faudra cependant veiller à réduire l'intervalle autour des valeurs de fréquence critique (fréquence de résonance pour un filtre d'ordre 2).

### III Partie expérimentale

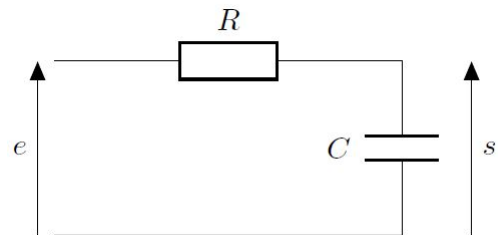
#### III.1 Résistance d'entrée d'un GBF - Mesure de tension au multimètre

**Remarque générale :** la forme des signaux et les réglages seront contrôlés avec l'oscilloscope.

- Q1.** Générer un signal sinusoïdal d'amplitude 2 V, de fréquence 1 kHz et de valeur moyenne nulle à l'aide du GBF. Mesurer la tension en sortie du GBF à l'aide du multimètre. La valeur mesurée est-elle cohérente? Justifier.
- Q2.** Une résistance variable  $R$  est alimentée par le signal précédent. Proposer un protocole pour déterminer la résistance interne du GBF, et réaliser la mesure. *Indice : il y a beaucoup d'informations dans ce document, notamment dans la partie I...*
- Q3.** Comment a-t-on intérêt à choisir la résistance d'entrée d'un montage alimenté par un GBF ?

#### III.2 Mesures à l'oscilloscope : exemples sur l'étude d'un filtre passe-bas d'ordre 1

On considère le circuit RC ci-contre. On prendra  $R = 10\text{ k}\Omega$ ,  
 $C = 10\text{ nF}$ .



- Q4. (\*\*)** Déterminer sans calcul la nature du filtre.
- Q5. (\*\*)** Calculer la fonction de transfert du montage. Déterminer la fréquence de coupure à - 3dB.
- Alimenter le montage par un signal sinusoïdal d'amplitude 2 V, de fréquence fixée à 10 Hz. Visualiser les tensions d'entrée et de sortie sur les voies 1 et 2 de l'oscilloscope. Synchroniser sur le signal d'entrée, ce que l'on fait habituellement car le signal d'entrée a des caractéristiques connues.
- Q6.** Faire un balayage en fréquence afin de vérifier le comportement du filtre. Détailler les observations.
- Q7.** Mesurer l'amplitude des signaux en entrée et en sortie.
- Q8.** Mesurer à l'oscilloscope la fréquence du signal : mesure directe et mesure à l'aide des curseurs de temps. Quelle mesure semble la plus précise? Justifier.
- Q9.** Mesurer le déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie, à l'aide de la mesure automatique puis à l'aide des curseurs temporels.
- Q10.** Relever les diagrammes de BODE en amplitude et en phase de ce montage et reporter ceux-ci sur une feuille de papier semi-logarithmique. Exploiter ces diagrammes pour obtenir la fréquence de coupure du filtre.

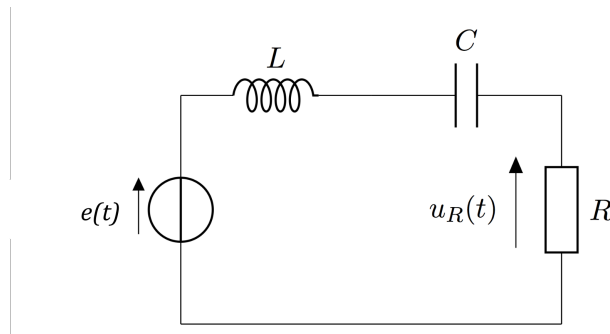
### III.3 Mesures à l'oscilloscope : étude d'un filtre d'ordre 2

La capacité d'un condensateur peut être déterminée en mesurant la fréquence de résonance  $f_0$  du courant se propageant dans un circuit RLC.

**Consigne :** on dispose du matériel suivant :

- un GBF ;
- un oscilloscope numérique ;
- une résistance  $R = 1 \text{ k}\Omega$  ;
- une bobine, d'inductance  $L = 12 \text{ mH}$  ;
- un condensateur de capacité  $C$  inconnue ;

On se propose de déterminer la valeur de la capacité en étudiant la tension aux bornes de la résistance dans le circuit RLC suivant :



**Q11. (\*\*)** Déterminer la fonction de transfert  $H(j\omega)$  de ce circuit. L'écrire sous la forme canonique :

$$H(j\omega) = H_0 \frac{\frac{j\omega}{Q\omega_0}}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

en précisant les expressions de  $\omega_0$ ,  $Q$  et  $H_0$  en fonction de  $R$ ,  $L$  et  $C$ .

**Q12. (\*\*)** Déterminer les comportements à haute fréquence et à basse fréquence de système. Quelle est sa fonction ?

**Q13. (\*\*)** Proposer un protocole pour déterminer les grandeurs  $\omega_0$  et  $Q$ .

*Indice : exploiter les diagrammes de Bode en gain et en phase, valeurs remarquables.*

Appeler l'enseignant pour proposer le protocole et le valider avant de le tester.

**Q14.** Mettre en œuvre le protocole proposé à l'aide du matériel à disposition.

**Q15.** En déduire la valeur de  $C$ , ainsi que son incertitude-type connaissant celles de l'inductance  $L$  et de la fréquence propre  $f_0$ .

#### Liste du matériel

- GBF ;
- multimètre de table ;
- oscilloscope numérique ;
- résistances :  $100 \Omega$ ,  $1 \text{ k}\Omega$  et  $10 \text{ k}\Omega$  (boîte à décades) ;
- condensateurs :  $10 \text{ nF}$  et capacité inconnue ;
- une bobine  $L = 12 \text{ mH}$  ;
- papier semi-log.