

TP1 – Expérimentation des appareils de laboratoire

INTRODUCTION

Pour le traitement des points 1 à 5, sont rappelés ci-dessous la plupart des compléments fournis l'année dernière dans le cadre du cours d'électrotechnique auxquels l'étudiant se référera pour des notions plus fondamentales comme la masse ou le code des couleurs pour les résistances, considérées ici comme acquises.

Pour celui des applications aux points 6 et 7, l'analyse des circuits suivra la méthode proposée que laisse transparaître l'énoncé des questions. Les réponses apportées, tant théoriques que pratiques, incorporeront tous les éléments fournis sous la rubrique "Fonction de transfert et diagrammes de Bode".

Le décibel "dB"

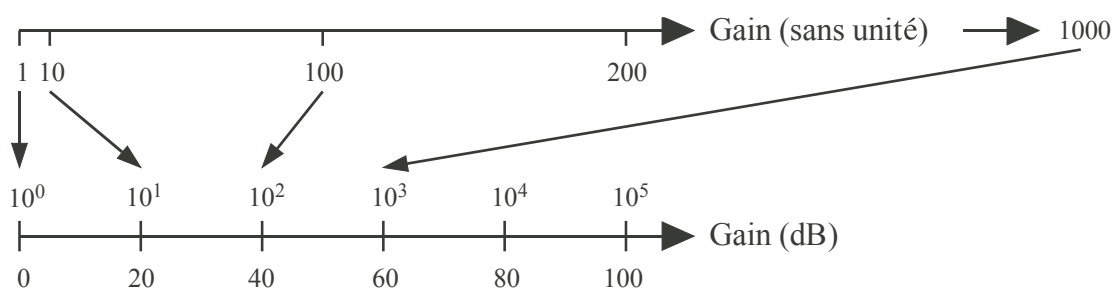
En tension $\left[\frac{U'}{U} \right]_{\text{dB}} = 20 \text{ Log}_{10} \frac{U'}{U}$ et en puissance $\left[\frac{P'}{P} \right]_{\text{dB}} = 10 \text{ Log}_{10} \frac{P'}{P}$

Cette unité a l'avantage d'exprimer un rapport entre 2 grandeurs (de même unité) comme une différence en dB, soit comme un écart > 0 ou < 0 par rapport à la référence si $U = U_{\text{réf}}$.

On retiendra ces quelques valeurs données fréquemment en exemples:

$$\frac{U'}{U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \left[\frac{U'}{U} \right]_{\text{dB}} = -3 ; \quad \frac{U'}{U} = \sqrt{2} \rightarrow \left[\frac{U'}{U} \right]_{\text{dB}} = 3 ; \quad \frac{U'}{U} = 2 \rightarrow \left[\frac{U'}{U} \right]_{\text{dB}} = 6 ; \quad \frac{U'}{U} = 10 \rightarrow \left[\frac{U'}{U} \right]_{\text{dB}} = 20$$

Son autre avantage est de comprimer une échelle tout en maintenant sa lisibilité.



Si la fréquence varie d'un facteur 10, la multiplication ou la division simultanées du gain par un facteur 10, qui s'exprime par une variation de ± 20 dB, se traduit dans le langage courant de l'électronicien par

une variation de ± 20 dB par décade

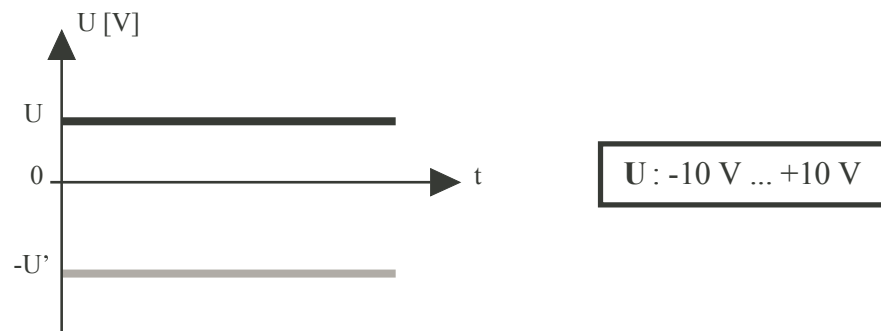
la **décade** faisant référence à f et étant l'espace qui sépare deux nombres reliés par un facteur 10.

Le générateur de fonctions

Le générateur HMF2525 délivre des signaux sinusoïdaux, carrés et triangulaires ainsi que des impulsions et des signaux arbitraires de fréquence réglable de 0.01 mHz ou 0.1 mHz à 25 MHz et d'amplitude crête à crête réglable de 0.01V à 20V.

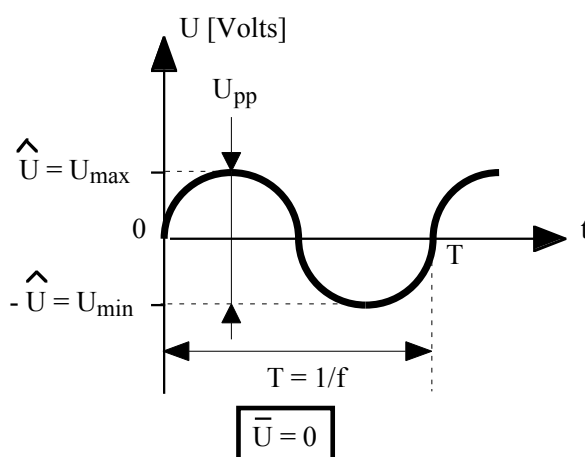
A tout signal peut être ajoutée une tension continue (DC) réglable appelée tension d'OFFSET. La sélection de la forme d'onde se fait par l'intermédiaire des touches qui les représentent. La fréquence et l'amplitude, **définie ici et incorrectement par l'amplitude crête-à-crête**, sont réglées à partir des touches à droite de l'écran du générateur. Lorsque celles-ci s'éclairent en bleu, elles sont actives et les valeurs suivies de leur unité, indispensable à la validation, sont introduites par l'intermédiaire du clavier alphanumérique. Selon le contexte, on préférera la période à la fréquence ou les amplitudes maximales et minimales à l'amplitude crête-à-crête.

FONCTION : DC

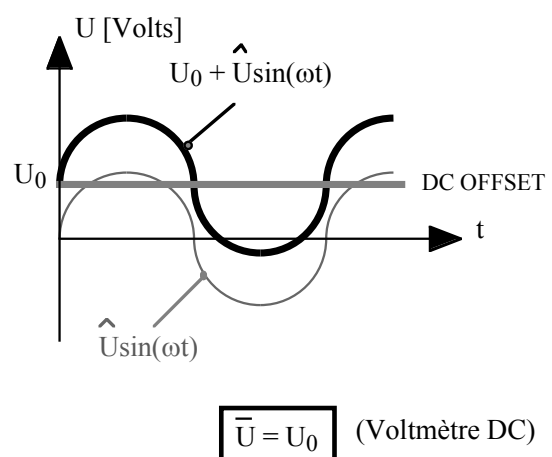


FONCTION : Sin

DC OFFSET : INACTIF



DC OFFSET : ACTIF



$$U_{max} - U_{min} = U_{pp} = U_{cc} = U_{\text{crête à crête}}$$
$$f = \text{fréquence [Hz]}$$
$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/s]}$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

COUPLAGE AC

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{U_0^2 + \frac{\hat{U}^2}{2}} = \sqrt{U_{\text{DC}}^2 + U_{\text{AC}}^2}$$

COUPLAGE DC

Les paramètres des signaux peuvent aussi être ajustés grâce à la molette et aux boutons fléchés l'encadrant; les flèches horizontales sélectionnent le chiffre souligné à modifier. Le résultat est validé par pression de la molette.

Toute valeur erronée est refusée avec émission d'un signal sonore.

Le signal est conduit vers la douille de sortie lorsque le bouton OUTPUT est **éclairé**. De même l'OFFSET qui demeure inactif tant que le bouton fonction qui lui correspond n'est pas éclairé.

L'oscilloscope

Tant par ses principes de base qui font appel à l'échantillonnage d'un signal que par le grand nombre de fonctions qu'il met à la disposition de l'utilisateur, l'oscilloscope numérique est un appareil de mesure qu'il serait illusoire de vouloir maîtriser dès la 1^{ère} séance. Il importe donc dès le départ d'admettre sa complexité et de veiller à respecter les consignes liées à ses organes de contrôle et à ses différentes et nombreuses fonctions. La pratique, le bon sens et finalement l'intuition se chargeront progressivement de parer aux questions.

On n'omettra pas de consulter le manuel fourni par le fabricant qui explicite avec illustration la plupart des touches de fonction.

Par rapport au multimètre, l'oscilloscope présente l'immense intérêt de visualiser le signal à l'écran. Il en existe trois sortes:

- l'oscilloscope analogique;
- l'oscilloscope numérique;
- l'oscilloscope mixte qui combine les deux techniques dans un même boîtier.

L'oscilloscope mis à disposition pour les enseignements pratiques de l'électrotechnique et de l'électronique au cycle Bachelor est un oscilloscope à mémoire numérique HM0724 ou HM2024. Ils sont identiques en tous points, la seule différence étant la largeur de la bande passante: 70 MHz pour le modèle HM0724 et 200 MHz pour le modèle HM2024.

Par son principe même de conversion d'un signal en données numériques, l'oscilloscope numérique ne montre qu'une "représentation" d'un signal d'où l'importance de certaines caractéristiques comme la vitesse d'échantillonnage des signaux. Elle fixe la limite supérieure en fréquence des signaux que l'oscilloscope peut restituer sans déformation.

**** Le déclenchement**

Le rôle du déclenchement est d'assurer une relation temporelle entre les signaux à mesurer et l'instant où l'oscilloscope commence à acquérir des données et à afficher. Pour fonctionner, ce système requiert un signal de déclenchement qui peut être l'un des signaux étudiés ou un signal externe (on appelle ce signal source de déclenchement). Il faut en outre définir le niveau de tension des signaux à mesurer à partir duquel l'oscilloscope doit acquérir des données. La position de ce point est définie par deux paramètres:

la pente, positive ou négative – icônes \nearrow \searrow

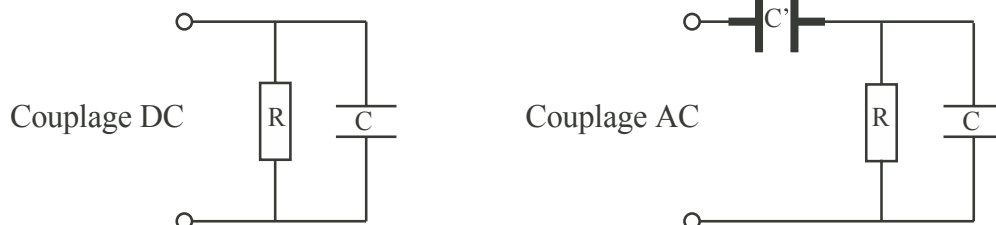
le niveau de tension - potentiomètre **Level** parmi les menus **Trigger**.

Lorsque le circuit de déclenchement "reconnaît" le niveau de tension et la pente choisie, l'oscilloscope enclenche l'acquisition des données, convertit les signaux au format numérique et les affiche à l'écran.

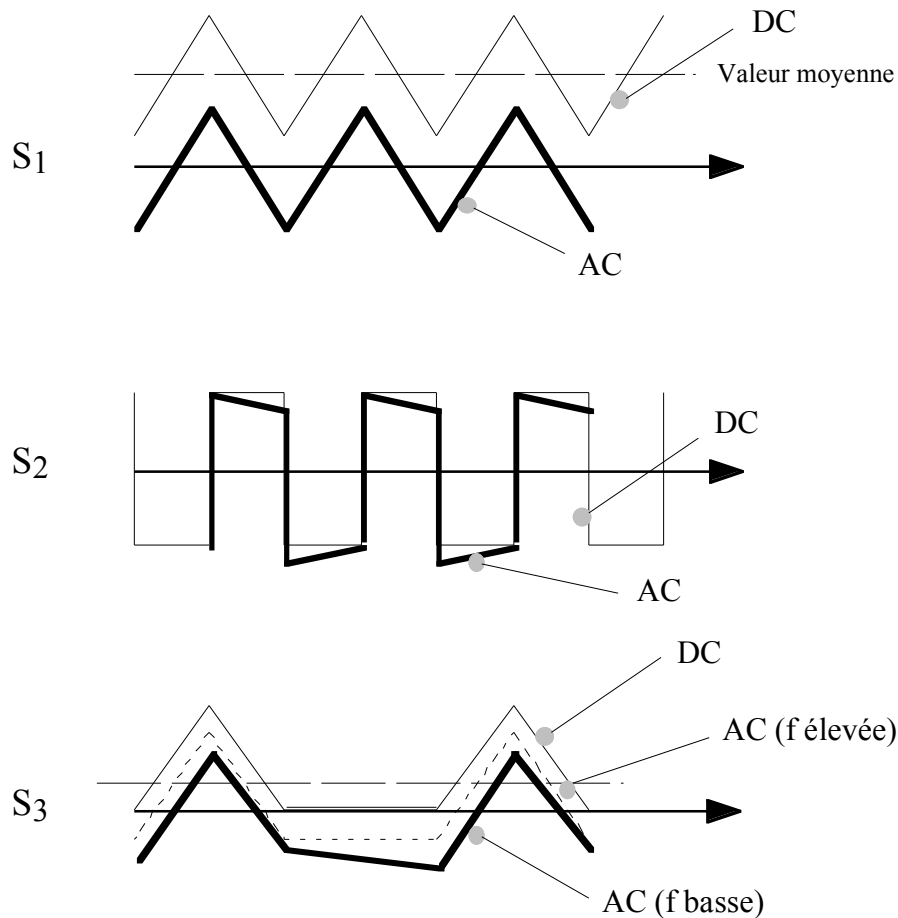
**** Couplage AC / DC ou CA / CC**

La fonction "couplage" qui peut être activée pour l'observation des signaux et pour les signaux de déclenchement permet de supprimer ou non la composante continue de ces signaux (ainsi S_1 positif sous DC devient-il alternativement positif et négatif sous AC).

Lors de l'observation, la grande impédance d'entrée de l'oscilloscope que l'on peut assimiler à une résistance contre terre ($\approx 1\text{ M}\Omega$) en parallèle sur une capacité ($\approx 20\text{ pF}$) en mode DC, et qui est couplée à un condensateur en mode AC (voir figure ci-dessous), doit inciter à la plus grande prudence.



En effet, à basse fréquence, un signal alternatif (sans composante continue) qui, en première analyse, devrait apparaître sous des mêmes configurations avec les couplages AC et DC, montre une déformation qui, en seconde analyse, ne signale rien d'autre que la duplicité de la capacité C'.



A basse fréquence, celle-ci a le temps de se charger et d'absorber une partie du signal d'entrée d'où la dégradation observée avec S_2 qui, initialement carré, devient trapézoïdal. L'exemple fourni par S_3 , dont les variations sous un couplage AC trouvent leur origine dans la même présence de C' , répète à l'envi que l'on **n'observe jamais mieux un signal** que sous un **couplage DC**. Car sous un couplage AC, l'oscilloscope représente toujours un signal, qu'il soit alternatif ou non, comme s'il était effectivement alternatif.

**** Les mesures sur le signal**

Bien que d'abord un instrument de visualisation d'un signal de tension, un oscilloscope permet de réaliser un certain nombre de mesures simples. Par lecture directe sur l'écran, à l'aide des curseurs ou à l'aide des fonctions mathématiques incorporées. Pour cela on utilise de préférence une représentation du signal qui couvre **tout l'écran** afin de rechercher la résolution optimale.

Les mesures automatiques possibles grâce au menu **AUTO MEASURE** (fréquence, période, moyenne, valeur crête à crête, valeur efficace, phase, retard, temps de montée, temps de descente ...) doivent être faites lorsque le signal est intégralement représenté sur la zone d'affichage et ce, sur une période au moins. Toute donnée d'un signal hors de cette zone n'est pas prise en compte dans le calcul de la valeur recherchée.

Eu égard à la sensibilité d'un résultat aux conditions initiales, **une mesure sera toujours faite sous plusieurs conditions d'affichage** avant que soit entériné le résultat. Un contrôle de celui-ci avec un autre instrument de mesure ne sera jamais superflu.

**** Déphasage**

Permettant de visualiser deux signaux en même temps, l'oscilloscope permet de mesurer le déphasage qui sépare deux signaux de même fréquence.

Par définition, si :

$$u_1 = U_1 \sin(\omega t + \alpha)$$

$$u_2 = U_2 \sin(\omega t + \beta)$$

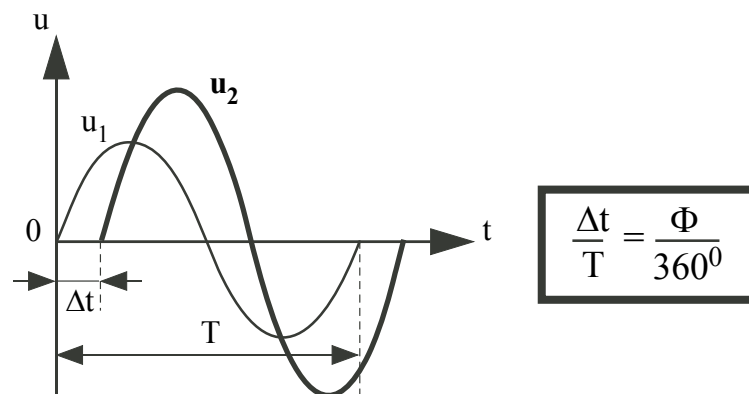
le déphasage Φ exprime la différence entre α et β selon la relation $\Phi = \alpha - \beta$.

Dès lors $\Phi > 0 \rightarrow u_1$ est en avance sur u_2

$\Phi < 0 \rightarrow u_1$ est en retard sur u_2

A l'oscilloscope, on le mesure :

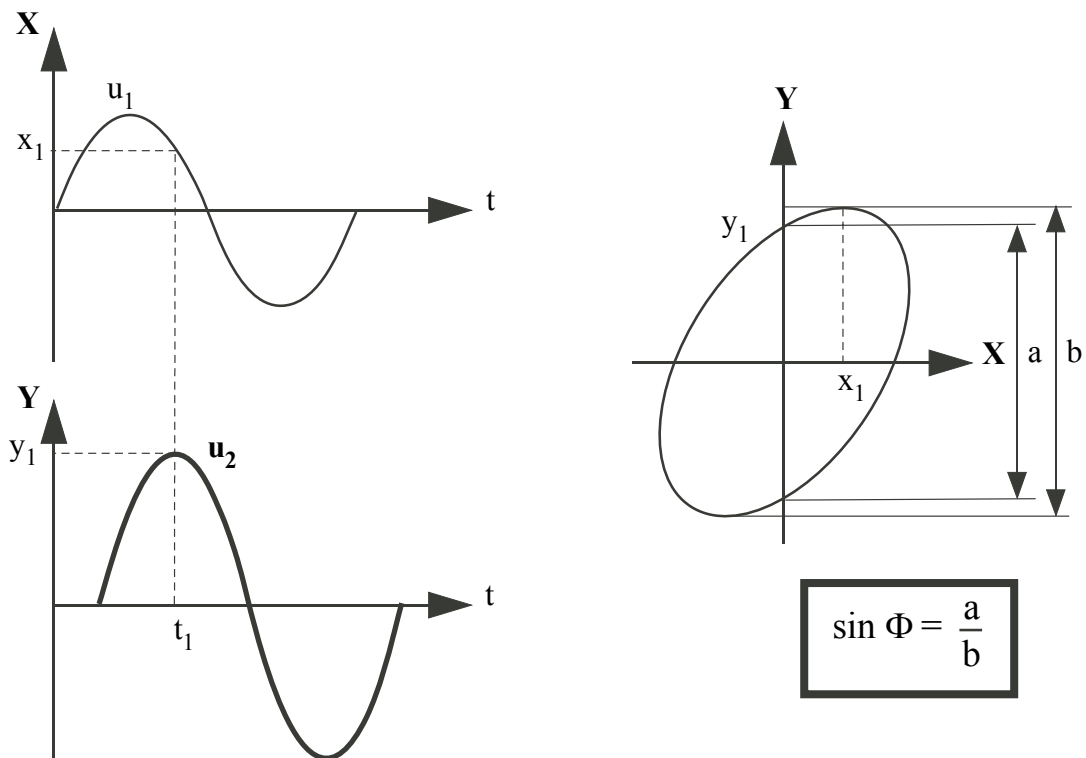
par le décalage des courbes



La précision exigée sur Φ excluant d'emblée une référence aux maximums arrondis et difficilement localisables, on mesure l'intervalle Δt qui sépare les croisements des 2 courbes avec l'axe des temps. Cette méthode est précise si et seulement si les 2 courbes sont convenablement centrées sur cet axe.

Ci-dessus, u_1 est en avance sur u_2 .

- **par la figure de Lissajous** (oscilloscope en mode XY – touche XY/CT de la zone "VERTICAL")



Elégante en soi, cette méthode n'offre pas la précision de la précédente sinon pour les faibles déphasages et pour autant que les amplificateurs X et Y de l'oscilloscope introduisent le même déphasage. Elle ne fournit pas, par ailleurs, le signe du déphasage.

Fonction de transfert et diagrammes de Bode

6. Circuit RC passe-haut

6.2.3 Après le calcul de la fonction de transfert mise sous **forme canonique**:

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{u_2(j\omega)}{u_1(j\omega)} = \frac{j\omega_c}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \quad \text{où} \quad \omega_c = \frac{R_1 + R_2}{CR_1R_2}$$

l'établissement de l'expression de $u_2(t)$ pour une valeur définie U_1 passe par le calcul du gain et du déphasage ϕ entre les signaux où:

$$|\underline{H}(j\omega)| = \frac{2\pi fRC}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 R^2 C^2}} \quad \text{où} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

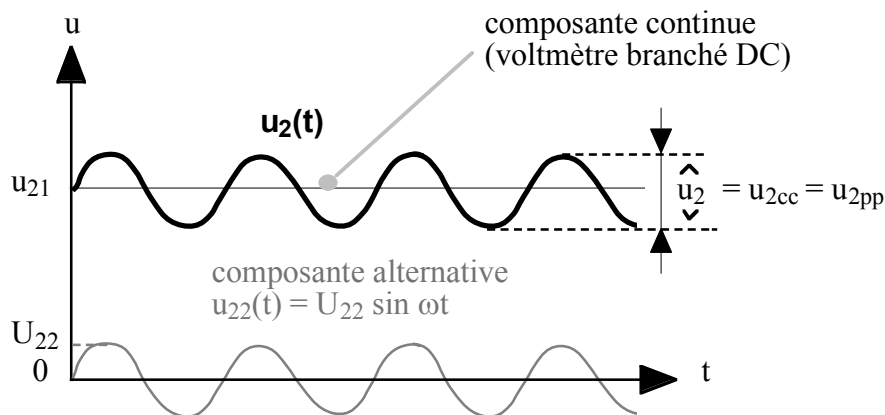
et $\phi = \text{Arg } \underline{H}(j\omega) = \frac{\pi}{2} - \text{Arctan}(2\pi fRC)$

Zéro et pôle sont confondus, il n'y a qu'une seule **fréquence de coupure** f_c , soit

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{R_1 + R_2}{2\pi C R_1 R_2}$$

La mise sous **forme canonique** de la fonction de transfert est indispensable au tracé des diagrammes de Bode asymptotiques en module et en phase, les asymptotes des fonctions élémentaires étant parfaitement connues et donc admises sans démonstration.

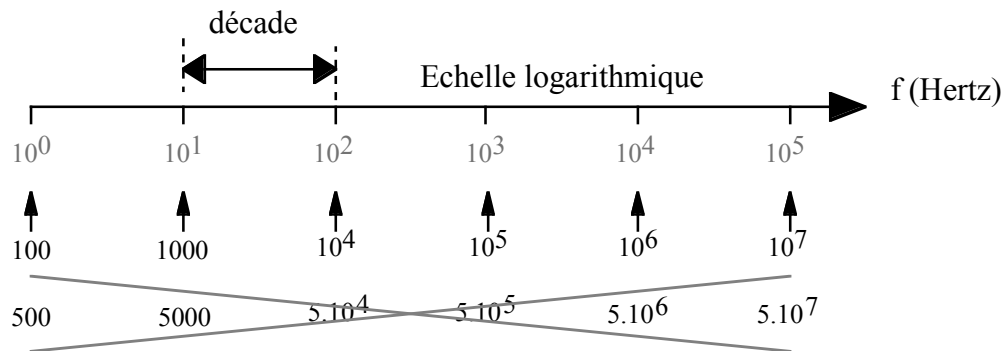
6.2.5 Si u_{21} est la tension continue partielle fournie par V_{cc} et u_{22} la tension sinusoïdale fournie par le générateur de fonctions, la tension résultante $u_2(t)$ est une tension sinusoïdale de **valeur moyenne** u_{21} dont on contrôle l'amplitude, les 2 sources de tension enclenchées, avec un voltmètre branché en continu. Quant à l'amplitude de la composante alternative définie par sa valeur crête, elle peut être mesurée par elle-même, par l'intermédiaire de sa valeur efficace ou de sa valeur crête à crête selon l'appareil à disposition. Dans tous les cas on préférera la mesure garantissant la meilleure précision.



Diagrammes de Bode et échelle semi-logarithmique

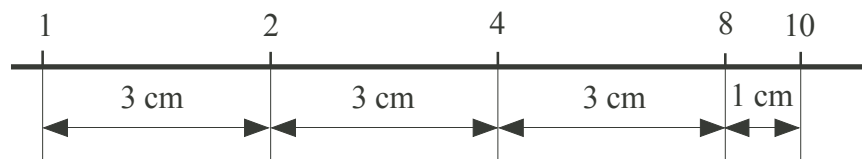
Module et phase de la fonction de transfert sont représentés graphiquement en fonction de la **fréquence** et non pas de la pulsation, la fréquence étant une donnée immédiate des signaux fournie soit par le générateur alimentant le circuit analysé soit par l'appareil de mesure à disposition (oscilloscope ou multimètre). Cette fréquence est encore repérée sur une échelle logarithmique, celle-ci présentant l'avantage, comme il le fut remarqué précédemment, de comprimer sur une même distance une série de valeurs, de loin plus étendue que sur une échelle linéaire.

La **décade** qui est l'espace qui sépare deux nombres reliés par un facteur 10 n'autorise en aucun cas un étalonnage faisant correspondre 500 à 1, 5000 à 10, etc., par exemple, l'interpolation prélinéaire n'étant dès lors plus valable.



Selon le nombre de décades à disposition (4 ou 5 en général) et la gamme à explorer, on commencera l'étalonnage à 1, 10 ou 100 Hz, comme ci-dessus, en veillant à prendre le papier dans le bon sens, les graduations les plus serrées vers les valeurs les plus grandes.

On se rappellera enfin qu'une **échelle logarithmique est facile à construire!**



Si, par commodité, on représente les diagrammes de Bode en fonction de la fréquence et non de la pulsation, par souci de cohérence, on n'oubliera jamais que

$$\omega = 2\pi f$$

6.3.1 Le tracé du diagramme de Bode en module vérifiera la nature du circuit, un **filtre passe-haut** repéré dès l'abord par son examen à basse et à haute fréquence. En effet :

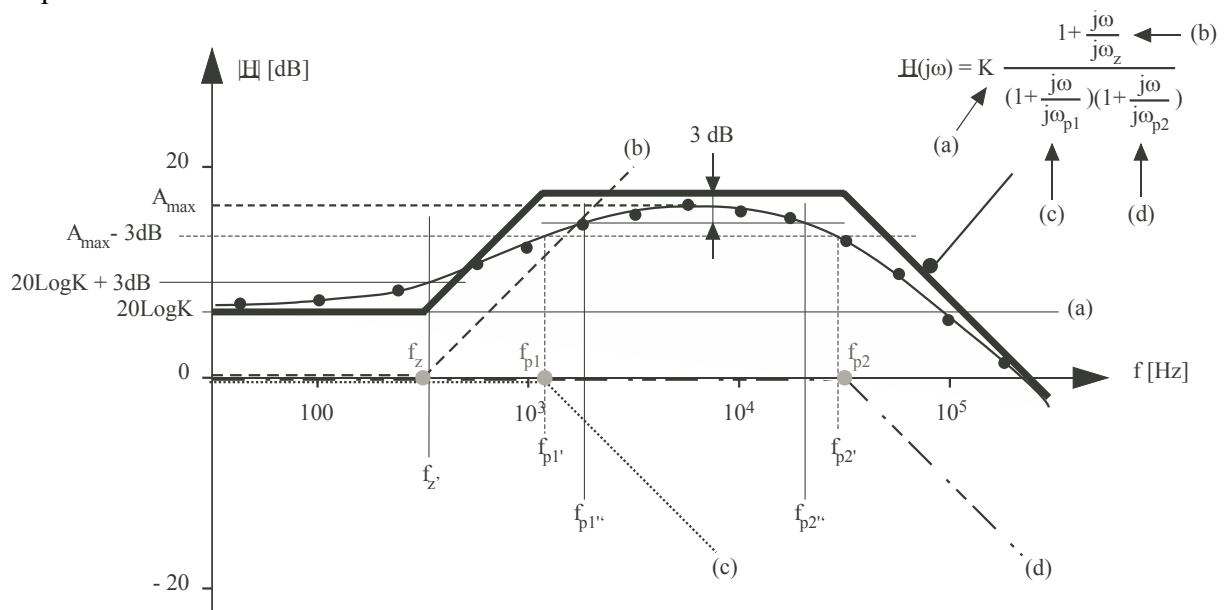
$$f \rightarrow \infty \Rightarrow C \equiv \text{court-circuit} \rightarrow u_{22} = u_1 \rightarrow A = 1 \rightarrow |A|_{\text{dB}} = 0$$

D'une manière générale on **vérifie le tracé des diagrammes de Bode** et notamment la position des asymptotes horizontales en recherchant les valeurs limites de la fonction de transfert autour des pôles et des zéros .

6.3.3 On se souviendra ici que la mesure du gain en dB avec le multimètre HMC8012 est **garantie entre 10 Hz et 100 kHz** seulement. Au-delà de ces limites, il faut recourir au calcul manuel du gain à partir du rapport des amplitudes.

On prévient toute erreur de mesure en **observant continuellement** les signaux mesurés afin de s'assurer que la variation d'un paramètre du système n'altère pas leur forme - la fonction de transfert n'a de sens qu'en régime sinusoïdal - ni l'amplitude du signal d'entrée - la fréquence variant, le générateur de fonctions, qui est aussi caractérisé par sa propre fonction de transfert, peut délivrer des signaux d'amplitude réduite.

6.3.4 Les **fréquences de coupure** qui sont les fréquences pour lesquelles le **gain est distant de ± 3 dB** des asymptotes horizontales peuvent avoir pour références les gains maxima ou minima observés expérimentalement si ceux-ci ne se confondent pas avec les valeurs asymptotiques. Dans tous les cas, la référence choisie doit être spécifiée mais il est évident, au risque d'accepter des erreurs de mesure dépassant largement la précision des appareils et des composants, que ces gains maxima ou minima ne peuvent différer des valeurs asymptotiques de plus de 20%.



Dans l'exemple ci-dessus, $f_{p1'}$ et $f_{p2'}$ sont définies par rapport au gain maximal A_{\max} observé expérimentalement alors que $f_{p1''}$ et $f_{p2''}$ le sont par rapport à l'asymptote supérieure. f_z est définie par rapport à l'asymptote " $20 \text{Log}K$ ", le gain minimum se confondant avec K .

La vérification expérimentale de toute fonction nécessite un nombre de mesures d'autant plus élevé que celle-ci montre davantage de points d'inflexion. Le tracé de la courbe qui les associe doit respecter la continuité de la fonction théorique censée la définir et, de ce fait, **lisser le parcours des points de mesure**.