# L'ESSENTIEL DE L'ELECTRONIQUE EN VUE DES T.P.

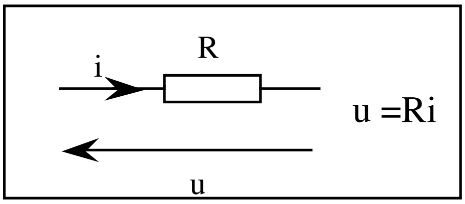
## 1. RAPPELS THEORIQUES

### 1.1. Les composants

#### 1.1.1. Composants linéaires passifs

- *Résistance*

Lorsqu'elle est linéaire, elle obéit à la loi d'Ohm :

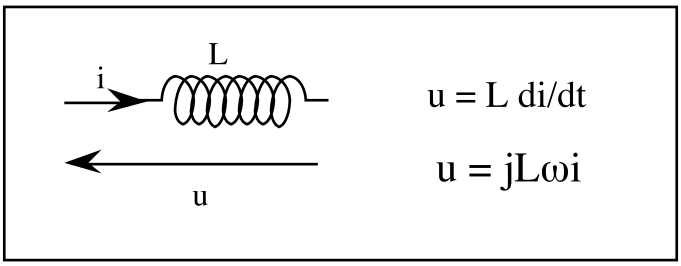



- *Inductance*

En régime quelconque, la tension aux bornes et le courant traversant une inductance pure sont liées par la relation : $\mathbf{u = L\,\dfrac{di}{dt}}$ **.**

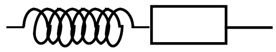
Cette relation implique notamment qu'**en régime continu (indépendant du temps), une inductance pure se comporte comme un court-circuit (interrupteur fermé)**.

**L'inductance devient un dipôle linéaire en régime sinusoïdal et en notation complexe** :




**Rq.1** L'étude énergétique d'une inductance pure conduit à lui attribuer une énergie $U_B = \frac{1}{2}L\,i^2$. Cette expression montre que, **l'énergie étant continue, le courant traversant une inductance est lui-même toujours continu.** Ainsi, à la fermeture d'un interrupteur dans une branche comportant une inductance, le courant juste après la fermeture est encore nul : l'inductance "s'oppose " au passage du courant.

**Rq.2** Une **bobine réelle** est modélisée par une inductance pure L, en série avec une résistance r.

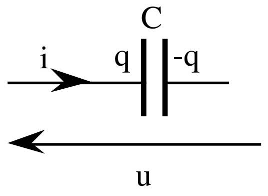


- *Condensateur*

En régime quelconque, la tension aux bornes et le courant traversant un condensateur idéal de capacité C sont liés par la relation : $\mathbf{q = Cu}$ ou $\mathbf{i = C \frac{du}{dt}}$ avec $\mathbf{i = \frac{dq}{dt}}$ (bien noter les conventions relatives entre i, q et u).

Cette relation implique notamment qu'**en régime continu (indépendant du temps), un condensateur idéal se comporte comme un coupe-circuit (interrupteur ouvert)**.

**Le condensateur devient un dipôle linéaire en régime sinusoïdal et en notation complexe** :



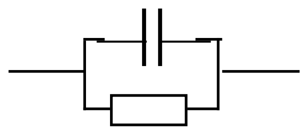

$u = q/C \qquad i = dq/dt$

$i = C\, du/dt$

$\underline{u} = \frac{1}{jC\omega}\underline{i}$

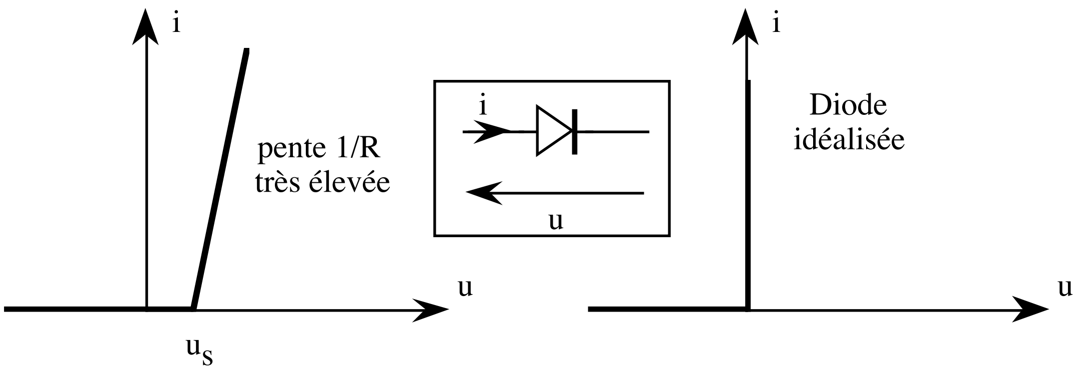
**Rq.1** L'étude énergétique d'un condensateur conduit à lui associer une énergie $U_E = \frac{1}{2}Cu^2$. Par suite de la continuité de l'énergie, **la tension aux bornes d'un condensateur est elle-même continue**. Ainsi, un condensateur primitivement déchargé avant fermeture d'un interrupteur garde-t-il une tension nulle juste après la fermeture de celui-ci.

**Rq.2** Un **condensateur réel** est modélisé par un condensateur idéal de capacité C, en parallèle avec une résistance r.



1.1.2. La diode

On peut la modéliser, en première approximation, par une caractéristique "linéaire par morceaux" :




En dessous d'une tension de seuil $u_s$ (typiquement de l'ordre de 0,7 V), le courant est nul : la diode est **bloquée**. Au-dessus de cette tension de seuil, elle est **passante**, et caractérisée par une très faible résistance.

Une diode idéalisée se comporte comme un simple interrupteur, fermé quand la tension aux bornes est positive et ouvert dans le cas contraire.

### 1.1.3. L'amplificateur opérationnel

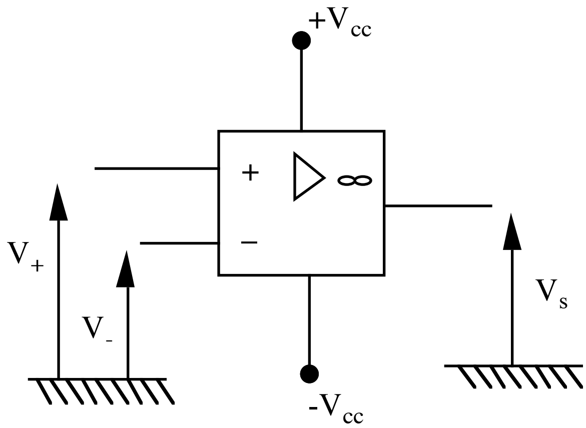
L'amplificateur opérationnel (A.O.) idéal est un amplificateur différentiel possédant 5 bornes :

♦ 2 bornes d'alimentation (+ $V_{cc}$ et $-V_{cc}$ avec $V_{cc}$ = 15V),

♦ deux bornes d'entrée (entrées dites inverseuse et non inverseuse $V_+$ et $V_-$ ),

♦ et une borne de sortie.

La tension de sortie est comprise entre les tensions de saturation $\pm V_{sat}$.




En fonctionnement linéaire, $V_s = \mu\,(V_+ - V_-) = \mu\varepsilon$ où $\mu$ est le cœfficient d'amplification.

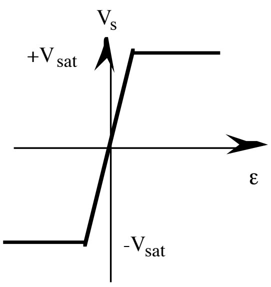
Insistons sur deux points fondamentaux :

♦ L'A.O. est un système **actif**: il **reçoit de la puissance** par les deux bornes d'alimentation.

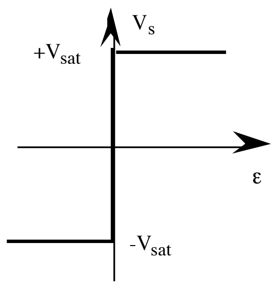
♦ La valeur du gain $\mu$ est très élevée (de l'ordre de $10^5$ pour un A.O. classique ) ce qui a pratiquement deux conséquences essentielles :

- On adopte souvent le modèle de l'A.O. idéal de gain infini, dont la caractéristique est la forme limite représentée ci-après :

**A.O. de gain fini**




**A.O. de gain infini**




- Les valeurs de ε pour lesquelles l'A.O. fonctionne de manière linéaire sont très faibles : la moindre perturbation peut faire alors passer du domaine linéaire au domaine de saturation. C'est pourquoi on n'utilise jamais, pour amplifier des signaux, un A.O. "tel quel" (c'est à dire en boucle ouverte). Si on désire le stabiliser pour qu'il reste dans le domaine linéaire, on doit prévoir un retour de la sortie vers l'entrée : on parle de **bouclage** de l'A.O.

☞ **Un A.O. bouclé de la sortie vers l'entrée inverseuse (on dit couramment "sur la patte moins de l'A.O") fonctionnera en général dans son domaine linéaire, alors qu'un retour vers l'entrée non inverseuse entraîne une saturation de l'A.O. Enfin seule une étude plus poussée de stabilité permet de conclure quand on a un retour vers les deux entrées à la fois. Un A.O. non bouclé fonctionne forcément en régime saturé.**

Pour résoudre en pratique un problème où figurent des A.O., on doit avant tout se demander dans quel domaine ils fonctionnent :

- si on suppose un A.O. de gain infini dans son domaine linéaire, on doit alors résoudre le problème en écrivant à priori $\varepsilon = 0$, la valeur de $V_s$ étant déterminée par le reste du circuit ( il faudra par la suite pouvoir vérifier que $V_S$ reste en valeur absolue inférieure à $V_{sat}$ ).

- si au contraire on le suppose fonctionner en saturation, on écrira à priori $V_S = V_{sat}$ ou $-V_{sat}$ ( avec la condition nécessaire $\varepsilon >$ ou $< 0$ respectivement).

Rappelons enfin brièvement les montages de base avec A.O. décrits en fin de chapitre :

- Suiveur (Fig.0)
- Amplificateur inverseur (Fig.1)
- Convertisseur courant-tension (Fig.2)
- Amplificateur non inverseur (Fig.3)
- Comparateur à hystérésis (Fig.4)

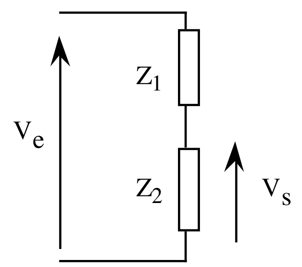
Dans les quatre premiers montages, l'A.O. est utilisé dans son domaine linéaire, alors que le dernier implique un fonctionnement à saturation (bien noter la différence entre l'amplificateur non inverseur et le comparateur).

En outre, quand on remplace, dans le montage ampli inverseur, l'une des résistances par un condensateur, on obtient, dans l'idéal, un dérivateur ou un intégrateur (Fig. 5 et 6).

## 1.2. Les principaux théorèmes

### 1.2.1. Diviseurs de tension et courant

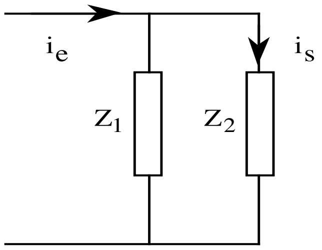
Rappelons en la formulation :




$$\mathbf{V_s = V_e \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}}$$

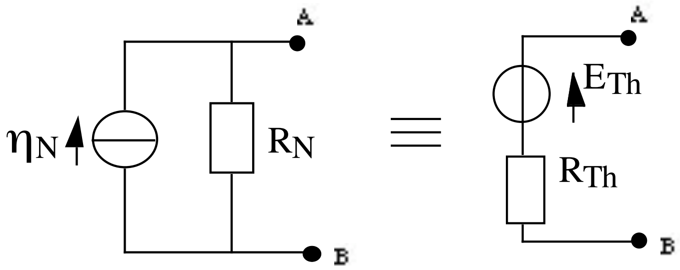
**Il est essentiel, pour pouvoir ce résultat, qu'un même courant parcourre $Z_1$ et $Z_2$. Aucune branche transportant du courant ne peut donc arriver en A.**

De même :




$$\mathbf{i_s = i_e \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2}}$$

### 1.2.2. Equivalence Thévenin-Norton




Elle permet de remplacer un générateur de courant par un générateur de tension et réciproquement, avec les relations :

$$R_N = R_{Th} \qquad \eta_N = \frac{E_{Th}}{R_{Th}}$$

L'équivalence reste vraie en régime sinusoïdal linéaire en utilisant la notion d'impédance.

### 1.2.3. Théorème de Millman

Ce théorème, utilisé dans des réseaux linéaires en régime permanent continu ou sinusoïdal, donnera souvent des solutions très rapides dans les réseaux électroniques comportant des A.O. C'est en fait un corollaire de la loi des nœuds stipulant que la somme algébrique des courants dans les branches aboutissant à un même nœud est nulle.

Il utilise comme variables les tensions de nœud et exprime la tension en un nœud vis-à-vis des tensions des nœuds voisins et des impédances qui les relient .

On peut résumer son expression en écrivant :

$$\boxed{\mathbf{V_j = \frac{\Sigma\left(\frac{V_i}{Z_i}\right)}{\Sigma\left(\frac{1}{Z_i}\right)}}}$$

Les $V_i$ sont algébriques (ils peuvent être nuls dans certaines branches). La validité du théorème de Millman repose sur l'écriture $\Sigma\ i = 0$ et suppose donc qu'un même courant parcourt toute une branche aboutissant au nœud considéré : on doit donc s'arrêter aux nœuds immédiatement voisins.

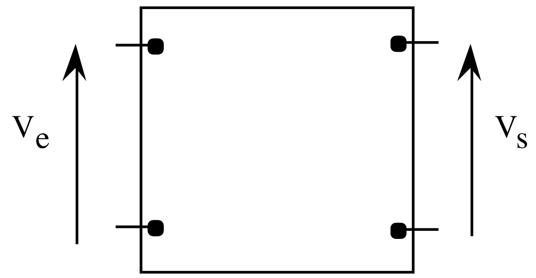
Le cas de figure souvent rencontré en électronique est l'écriture du théorème de Millman aux entrées + et - d'un A.O. idéal : en effet ces entrées ne délivrent pas de courant et le théorème de Millman peut s'appliquer. En revanche, il faut retenir que, de façon tout à fait générale, :

☞ **On ne peut pas appliquer Millman à la sortie de l'A.O.**

Ceci est dû au fait que l'A.O. délivre un courant de sortie $i_S$, à priori inconnu.

## 1.3. Etude des filtres

De façon générale, un filtre peut être représenté par un quadripôle suivant la modélisation :




Bien évidemment, la sortie est faite pour être utilisée (on dit encore chargée), c'est à dire branchée sur un dipôle d'utilisation. On peut alors étudier le filtre à vide ou en charge. Sur l'exemple ci-dessus, R' représente la résistance de charge et le filtre est étudié en charge. Les réseaux électroniques utilisant des A.O. sont, eux, souvent étudiés à vide, car la tension de sortie d'un A.O. idéal est indépendante de la charge.

On étudie principalement les filtres linéaires en **réponse fréquentielle** ( régime permanent sinusoïdal ) ou **réponse indicielle** ( $V_e$ est alors un échelon de tension ).

### 1.3.1. Fonction de transfert

En réponse fréquentielle, on appelle **fonction de transfert H(jω)** le rapport $\frac{\mathbf{V_s}}{\mathbf{V_e}}$. On pose alors :

$$\boxed{G_{dB} = 20\, \text{Log}|H(j\omega)| \quad \phi = \text{Arg}(H(j\omega))}$$

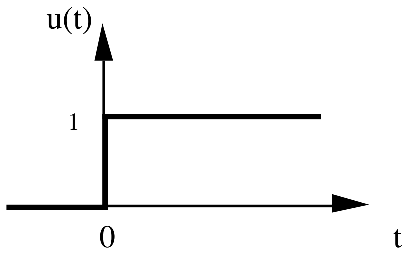
$G_{dB}$ est le gain de filtre en décibels, et $\phi$ la phase...

### 1.3.2. Réponse fréquentielle - Réponse à un échelon

On appelle échelon unité ou **fonction de Heaviside**, notée u(t), la fonction définie par :

$u(t) = 1$ pour $t \geq 0$

$u(t) = 0$ pour $t < 0$




La **réponse indicielle** d'un système linéaire est le signal de sortie $s_u(t)$ associé à une entrée échelon (pas forcément unité).

L'intérêt d'une telle étude est d'observer l'effet d'une discontinuité finie du signal d'entrée.
Cette « discontinuité » est obtenue en pratique lorsque le signal d'entrée présente un temps de montée très court devant les temps caractéristiques du système à étudier.

On s'intéresse alors à l'évolution, vers un régime continu permanent, de la grandeur de sortie, donnée par la résolution d'une équation différentielle. La connaissance des conditions initiales est évidemment indispensable à une complète résolution de ce problème.

Pour les filtres linéaires, il existe une correspondance simple entre les deux types de réponse, puisque, par l'utilisation des complexes, d/dt devient équivalent à une multiplication par $j\omega$ . Pour obtenir l'équation différentielle à laquelle obéit une certaine grandeur du réseau dans une réponse indicielle, on peut d'abord établir la réponse fréquentielle pour cette grandeur et revenir à l'équation différentielle par la correspondance qu'on vient d'évoquer.

Ainsi, à une fonction de transfert de la forme : $\underline{H} = \dfrac{\underline{S}}{\underline{E}} = \dfrac{\underline{s}}{\underline{e}} = \dfrac{\sum_{i=0}^{m} a_i (j\omega)^i}{\sum_{k=0}^{n} b_k (j\omega)^k}$

correspond l'équation différentielle : $b_0 s(t) + b_1 \dfrac{ds}{dt} + b_2 \dfrac{d^2s}{dt^2} + \ldots = a_0 e(t) + a_1 \dfrac{de}{dt} + a_2 \dfrac{d^2e}{dt^2} + ..$

Notons de même que le comportement en réponse indicielle pour t tendant vers l'infini, correspond au comportement en réponse fréquentielle pour $\omega$ tendant vers 0 ( régime continu permanent ).Pour connaître directement la valeur finale de s(t), il suffit donc de faire tendre $\omega$ vers 0 dans $\underline{H}(j\omega)$.

$$\lim_{t\to\infty} s(t) = \lim_{\omega\to 0} H(j\omega)$$

Enfin, le comportement à $t = 0^+$ de telle ou telle grandeur vis-à-vis d'une réponse indicielle sera le plus souvent également celui de cette même grandeur en réponse tendant vers l'infini ( en effet la tension, à $t = 0^+$, aux bornes d'un condensateur **primitivement déchargé** reste nulle, ce qui est vrai également quand $\omega$ tend vers l'infini ( impédance nulle). De même, le courant à, $t = 0^+$, dans une inductance est nul, ce qui est également vrai en régime sinusoïdal pour $\omega$ tendant vers l'infini ( impédance infinie) ).

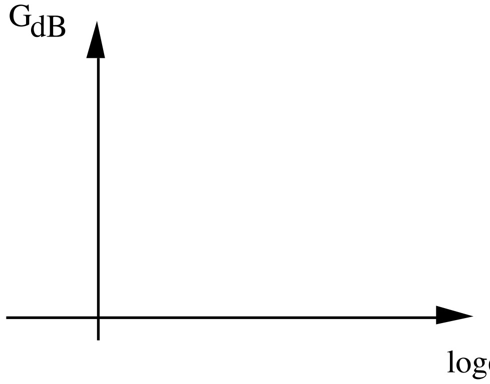
### 1.3.3. Diagrammes de Bode

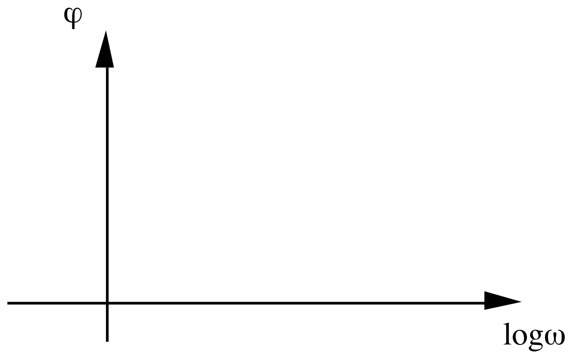
Dans la représentation de Bode des fonctions de transfert, il s'agit de représenter $G_{dB} = 20 \log |\underline{H}(j\omega)|$ et $\varphi = \arg(\underline{H}(j\omega))$ en fonction de la fréquence ou de la pulsation du signal d'entrée, en échelle logarithmique.

On rappelle les principaux résultats permettant d'obtenir rapidement les asymptotes (diagramme asymptotique) :

♦ Si $\underline{H}(j\omega)$ a un **facteur $1 + j\omega\tau$** au dénominateur (resp. numérateur), celui-ci introduit :
dans $G_{dB}$ une contribution à la pente de -20dB/déc (resp. +20dB/déc) à partir de $\omega = 1/\tau$ ;
une contribution à $\varphi$ est de $-\pi/2$ (resp. $+\pi/2$) à partir de $1/\tau$.

exemple : diagramme de Bode de $\underline{\mathbf{H}} = \dfrac{\mathbf{H_0}}{\mathbf{1+j\omega\tau}}$ .




♦ Si $\underline{H}(j\omega) = \underline{H}_1(j\omega).\ \underline{H}_2(j\omega)$ alors la représentation de Bode de $\underline{H}(j\omega)$ se présente comme l'addition (selon l'axe des coordonnées) des représentations de Bode de $\underline{H}_2(j\omega)$ et $\underline{H}_1(j\omega)$.

dans $G_{dB}$ une contribution à la pente de -20dB/déc (resp. +20dB/déc) à partir de $\omega = 1/\tau$ ;

exemple : diagramme de Bode de $\mathbf{\underline{H} = H_0 \frac{j\omega\tau_1}{1+j\omega\tau_2}}$ avec $\tau_2 < \tau_1$.



# 2. MESURES EN ELECTRONIQUE

## 2.1. Les différents appareils et instruments

### 2.1.1. L'oscilloscope

Il demeure l'appareil fondamental des T.P. d'électronique. Son rôle est double :

- Lui seul permet de **contrôler** la forme du signal à mesurer et de visualiser d'éventuels problèmes tels que distorsion, triangulation, écrêtage. Il est donc essentiel de toujours visualiser un signal à l'oscilloscope.

- En outre, les oscilloscopes numériques permettent d'effectuer, entre autres, des mesures de tension ( valeurs crête à crête, moyenne, efficace ), de période, de déphasage. Leur bande passante est meilleure que celle des multimètres et permet des mesures en très haute fréquence.

Quelques « fondamentaux » de l'oscilloscope :

- les masses de l'oscilloscope sont reliées à l'intérieur de l'appareil. Il importe donc qu'elles soient identiques au niveau du montage. Il est donc inutile de les relier toutes les deux au montage.

- les oscilloscopes possèdent des synchronisations automatiques sur l'une ou l'autre voie. Un signal mal stabilisé correspond souvent à une synchronisation sur la mauvaise voie...Si ce n'est pas le cas, le seuil de déclenchement ( level ) est peut-être en dehors du signal...

- l'entrée AC ( alternative current ) élimine, par l'intermédiaire d'un filtre R,C, tout composante continue d'un signal. Elle déforme donc tout signal non purement sinusoïdal. Sauf choix spécifique adapté à un problème particulier, on doit entrer un signal sur la borne DC (direct current ).

### 2.1.2. Le générateur de fonctions

Il délivre le signal « d'entrée », de forme sinusoïdale, triangulaire ou carrée, avec l'ajout éventuel d'une composante continue et indique la fréquence de ce signal.

**La sortie utilisée est marquée 50Ω : ceci signifie que le générateur constitue une source de tension d'impédance interne 50Ω .Ce n'est donc pas, dans l'absolu, une source idéale de tension et l'amplitude du signal varie alors avec la charge, sauf si celle- ci possède une impédance d'entrée grande devant 50Ω.**

Enfin, la bande passante du générateur implique que le signal « s'écroule » également à très haute fréquence.

### 2.1.3. Le multimètre

Appareil polyvalent, il peut mesurer la valeur d'une résistance, d'un courant, d'une tension, continus ou non, selon l'entrée choisie. Il est donc essentiel que la grandeur à mesurer corresponde bien à cette entrée.

Les entrées non continues mesurent des valeurs efficaces dont la définition est :

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2(t)dt}$$

Rappelons que cette valeur ne correspond à celle de l'amplitude maximale divisée par $\sqrt{2}$ que pour un signal sinusoïdal. Ce résultat est faux pour tout autre forme de signal.

La position dB permet une mesure en décibels sous la forme $20\log(\frac{V}{V_{réf}})$, où $V_{réf}$ est une tension de référence : cette entrée est utilisée en pratique pour mesurer un gain, éliminant ainsi cette tension de référence.

Comme précédemment la bande passante du multimètre en limite l'usage aux hautes fréquences. Cette bande passante s'avère souvent moins performante que celles de l'oscilloscope…

## 2.2. Généralités sur les montages et les mesures

### 2.2.1. Mesure d'une tension, d'un gain

- Bien faire attention à la forme du signal : tension continue ou sinusoïdale. Savoir si on mesure une amplitude ou une valeur efficace.

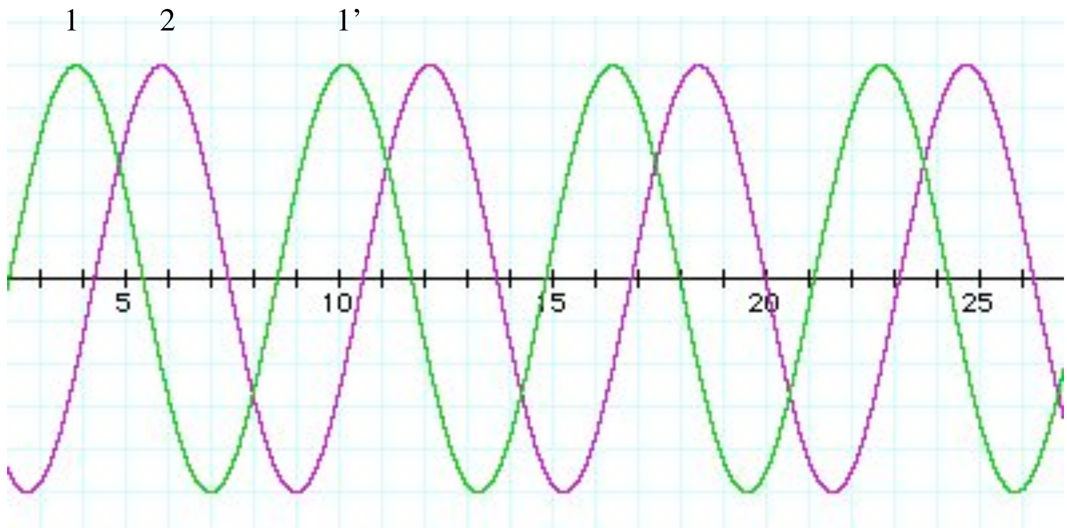
- Une mesure en décibels n'a qu'un sens relatif puisqu'elle fait intervenir une tension de référence. En revanche, la mesure d'un gain en décibels se fait par la différence des valeurs en décibels entre la sortie et l'entrée.

### 2.2.2. Mesure d'un déphasage

- Cette mesure peut parfois être lue sur un oscilloscope « moderne ». Mais il est toujours possible de l'effectuer par la méthode dite « des 9 carreaux » : en décalibrant l'oscilloscope, on ajuste une période de l'un des signaux sur 9 carreaux ( d'où 1 carreau = 20° ) et on mesure l'intervalle entre deux annulations sur un même front ( montant ou descendant ) des 2 signaux. Certains oscilloscope numériques ne peuvent être décalibrés mais possèdent alors des curseurs permettant de mesurer des intervalles de temps : la méthode précédente s'applique alors directement sur ces intervalles.

- Ne pas oublier que sur l'oscilloscope, le signal qui « paraît » en avance ( il est « devant l'autre » quand on « lit de la gauche vers la droite » ) est en fait en retard de phase.

- Un déphasage se mesure entre – π et + π : on compare les signaux « les plus proches » :




Ainsi on compare les « pics » 1 et 2 plutôt que 2 et 1' : si 2 est plus près de 1 que de 1', 2 est en retard sur 1 (ϕ est compris entre 0 et – π). Si 2 est plus près de 1' que de 1, 2 est en avance sur 1'(ϕ est compris entre 0 et + π)

#### 2.2.3. Mesure d'un courant

- Bien faire attention à la forme du signal : courant continu, sinusoïdal, quelconque. Savoir si on mesure une valeur continue ( ou moyenne pour un courant quelconque ) ou une valeur efficace.

- Cette mesure s'effectue grâce à un ampèremètre mis en série, ou un voltmètre branché en parallèle sur une résistance de valeur connue et mises en série.

#### 2.2.4. L'A.O.

Nous ne donnerons ici que quelques conseils « classiques » permettant de résoudre les problèmes le plus fréquemment rencontrés dans les montages :

- Ne jamais oublier d'alimenter l'A.O. en respectant bien les entrées $V_{cc+}$ et $V_{cc-}$ . Ne pas oublier de mettre l'interrupteur d'alimentation en marche !

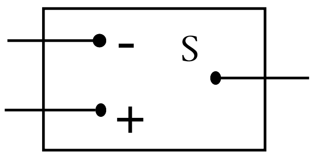
- Ne pas inverser de même les entrées $V_+$ et $V_-$ . Dans plusieurs montages l'entrée $V_+$ est seulement reliée à la masse : ne pas oublier cette jonction.

- Bien vérifier que toutes les masses sont reliées ensemble.

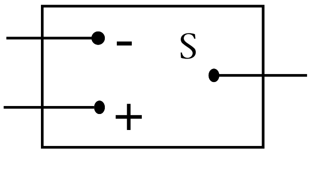
- Toujours vérifier à l'oscilloscope la forme du signal délivré en sortie de l'A.O. : on peut voir ainsi s'il fonctionne bien en régime linéaire, ou si le signal est déformé.

- Si après toutes les vérifications, le montage ne fonctionne toujours pas, ne pas hésiter à tout démonter et remonter un peu plus loin sur la plaquette.

Fig.0 **Suiveur**

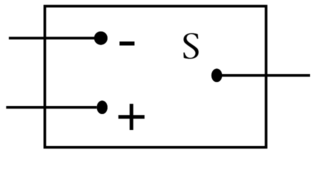



$V_S = V_e$



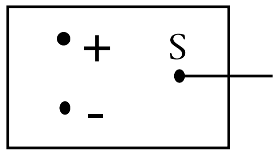

$$V_S = -\frac{R_2}{R_1} V_e$$

Fig.1 **Ampli inverseur**



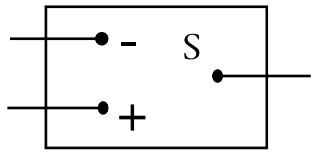

$V_S = - Ri$

Fig.2 **Convertisseur courant-tension**



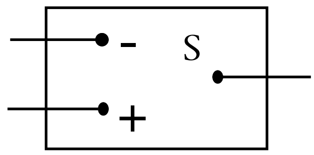

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e$$

Fig.3 **Ampli non inverseur**



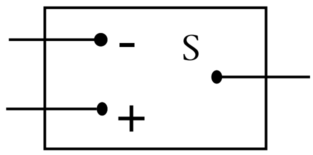

$$V_s = \pm V_{sat}$$

Fig.4 **Comparateur à hystérésis**




$$V_s = - \frac{1}{RC} \int V_e \, dt$$

Fig.5 **Intégrateur**




$$V_s = - RC \frac{dV_e}{dt}$$

Fig.6 **Dérivateur**