

L'oscilloscope

Principe de fonctionnement et mode d'emploi

par

Jérôme CROS

Sommaire

I - Introduction

II - Principe de fonctionnement

- 1) Les oscillogrammes
- 2) Principe d'un tube cathodique et méthode d'affichage des traces
- 3) Structure d'un oscilloscope

III - Les boutons de contrôle et de réglage d'un oscilloscope

- 1) Réglage du faisceau d'électrons et mise sous tension
- 2) Réglage vertical des entrées
- 3) Réglage horizontal des entrées
- 4) Réglage du déclenchement (Trigger)

IV - Utilisation pratique

- 1) Mise sous tension et réglages initiaux
- 2) Précautions à suivre pour le branchement des entrées
 - a) Problèmes de masse
 - b) Problèmes de mise à la terre
- 3) Mesures à l'écran (amplitude, période, déphasage)
- 4) Les erreurs de mesure

V - Références

I - Introduction

La plupart des appareils de mesure réalise une mesure ponctuelle qui se traduit par la déviation d'une aiguille sur un cadran ou l'affichage numérique d'un nombre sur un compteur (par exemple: un voltmètre, un ampèremètre, un wattmètre ou un multimètre). L'étude des variations d'une grandeur en fonction d'une autre nécessite un relevé très rapide d'une série de points pour obtenir le tracé d'une courbe (par exemple: tracé de l'évolution du courant en fonction du temps ou encore le tracé de l'évolution de la puissance en fonction du courant).

Il y a différentes manières de réaliser ce genre d'études ou de mesures. On peut envisager d'utiliser un système d'acquisition (par exemple: des cartes pour PC) associé à des instruments ou des capteurs permettant des mesures à fréquence élevée. Cependant, cette fréquence de mesure reste très limitée (au maximum quelques centaines de kiloHertz) en raison de la rapidité de la carte d'acquisition et du nombre de grandeurs mesurées.

On peut aussi utiliser un oscilloscope qui permet de tracer directement sur un écran, une courbe correspondant à l'évolution du signal de mesure (par exemple, une tension en fonction temps). Cet appareil permet l'observation de phénomènes très rapides (plusieurs centaines de mégaHertz ce qui correspond à quelques nanosecondes). C'est pour cette raison que l'oscilloscope occupe une place très privilégiée parmi toute la panoplie des appareils de mesure. C'est le seul appareil qui permet de voir la forme des signaux les plus complexes et de mesurer leurs caractéristiques: durées, fréquences, amplitudes.

La richesse des possibilités offertes par un oscilloscope, accompagnée de la profusion des commandes ou des réglages peuvent d'abord dérouter. Cela conduit très souvent à une sous-exploitation de l'appareil, voire à des erreurs. En fait, cette complexité n'est pourtant qu'apparente. Elle résulte de la réunion de sous-ensembles aux fonctions variées, mais simples lorsqu'on les examine séparément. Il est essentiel de bien connaître l'architecture d'un oscilloscope et de développer une expérience personnelle pour l'utiliser de manière efficace.

II - Principe de fonctionnement

1) Les oscillogrammes

Un oscillogramme correspond à la courbe qui est engendrée par le déplacement d'un spot lumineux sur l'écran d'un tube cathodique. Il peut correspondre à l'évolution d'une grandeur en fonction du temps ou à l'évolution d'une grandeur par rapport à une autre (composition de signaux).

Exemple: $V_1(t) = 7.5 \cdot \sin(100\pi \cdot t)$

$V_2(t) = 5 \cdot \sin(100\pi \cdot t - \pi/3)$

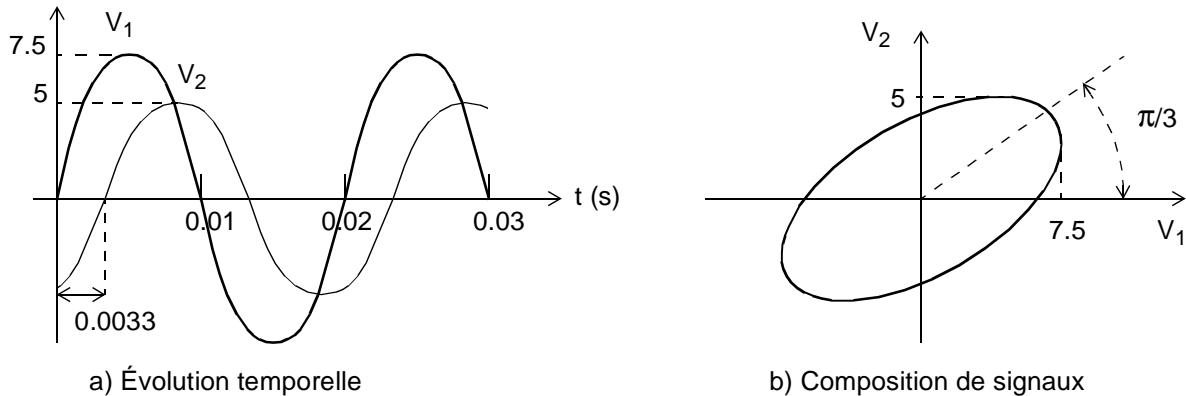


Fig. 1 Oscillogrammes des signaux V_1 et V_2

2) Principe d'un tube cathodique et méthode d'affichage des traces

Le tube cathodique d'un oscilloscope (ou d'un écran de télévision) est constitué d'un ou plusieurs canons à électrons, de plaques permettant la déviation du faisceau d'électrons et d'un écran avec une paroi électroluminescente qui convertit l'énergie cinétique des électrons en énergie lumineuse (Fig. 2)

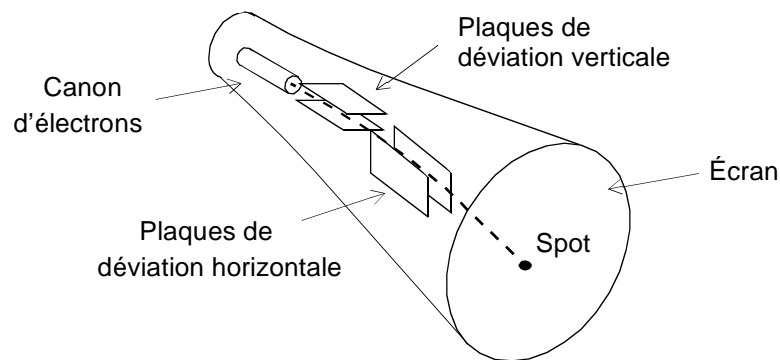


Fig 2 : Le tube cathodique

L'alimentation par une tension variable des deux séries de plaques (planes et parallèles) permet de soumettre le faisceau d'électrons à des champs électriques variables ce qui provoquent la déviation verticale ou horizontale du faisceau (suivant la série de plaques alimentée).

Si on souhaite observer l'évolution temporelle de la tension V_1 à l'oscilloscope, cette tension V_1 doit régler la déviation verticale du spot lumineux et la déviation horizontale doit être une image du temps. Il faut donc appliquer une tension de la forme $v(t) = k \cdot t$ (k étant une constante) sur les plaques de déviation horizontale. Comme il n'est pas possible de laisser la tension $v(t)$ augmenter indéfiniment, on annule cette tension périodiquement et la tension $v(t)$ à la forme d'un signal en dent de scie. On réalise alors un balayage périodique du spot lumineux sur l'écran de l'oscilloscope. Le signal en dent de scie, $v(t)$, est généré en interne par l'oscilloscope et constitue la *base de temps*.

La figure 3 montre deux oscillogrammes tels qu'ils vont apparaître sur l'écran de l'oscilloscope en imposant les formes suivantes pour $V_1(t)$ et $v(t)$.

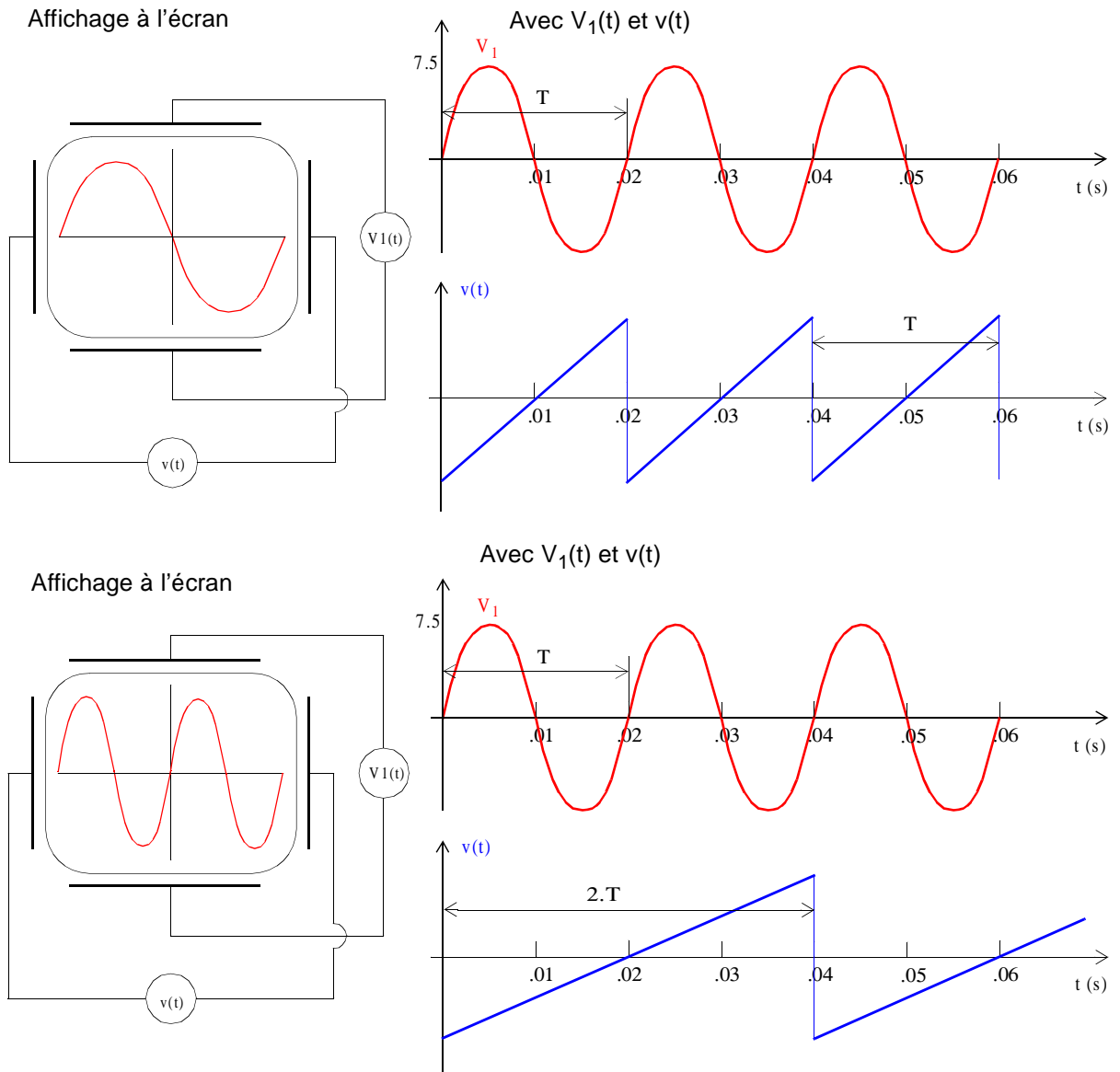


Fig 3 : Tracé d'un oscillogramme à l'écran

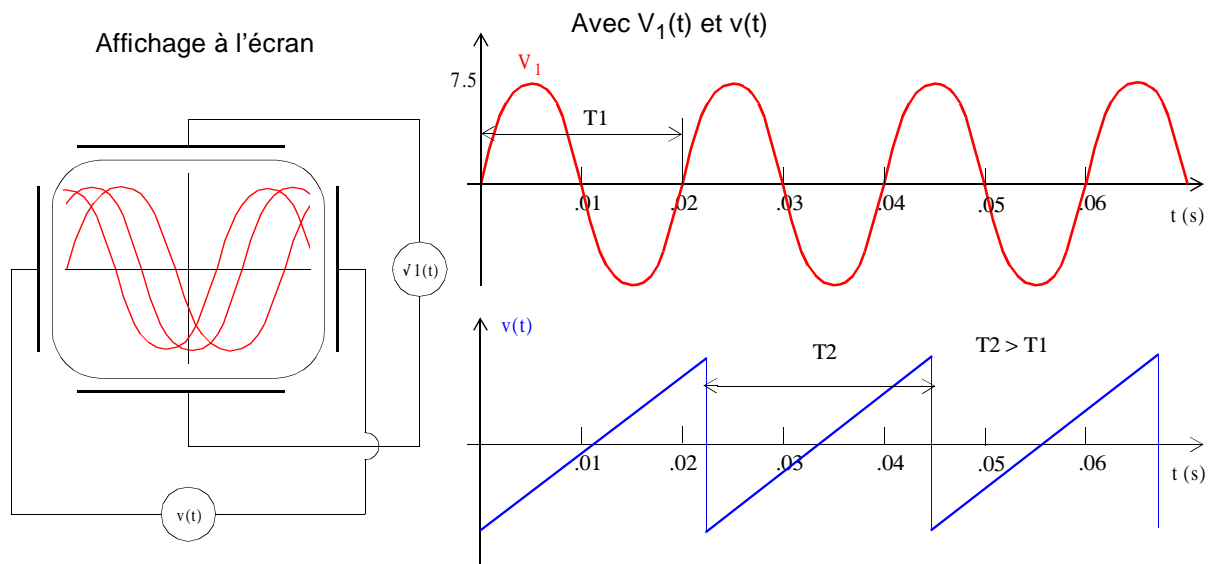


Fig 4 : Tracé d'un oscillogramme en l'absence de synchronisation de la base de temps

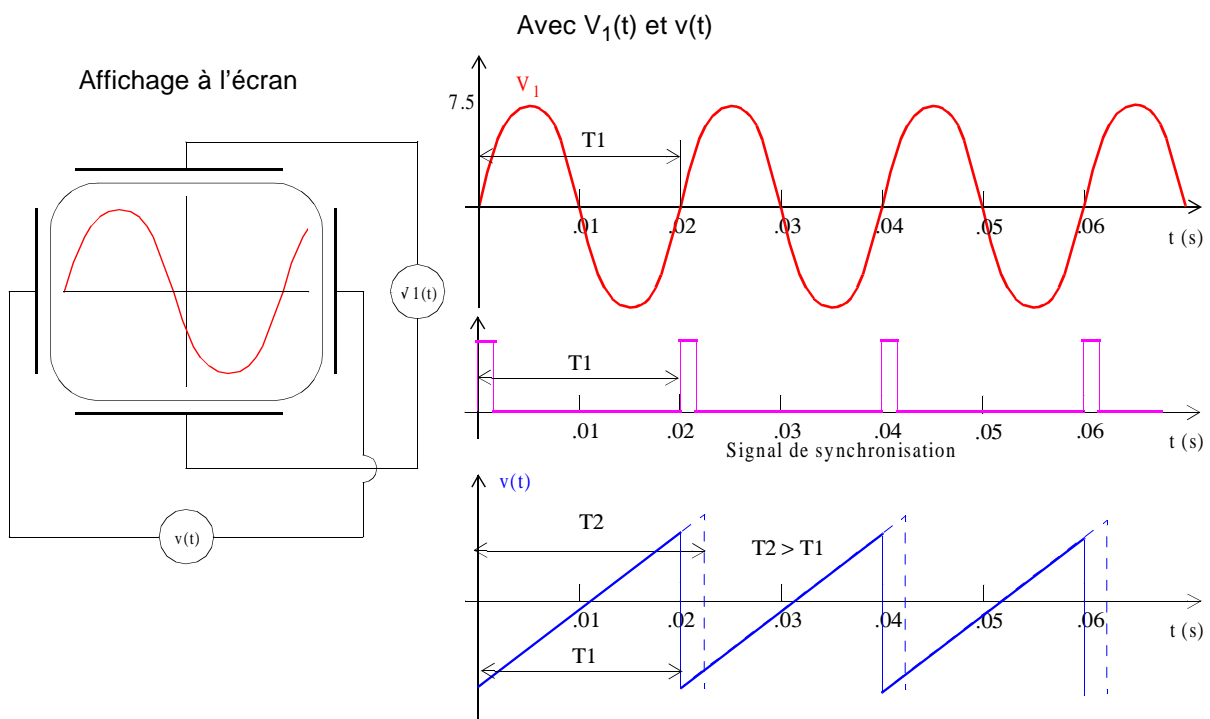


Fig 5 : Tracé d'un oscillogramme avec synchronisation de la base de temps

Si les périodes des signaux $V_1(t)$ et $v(t)$ sont des multiples entiers l'une de l'autre, le spot lumineux va toujours parcourir la même trace (fig 3). Dans le cas contraire, il n'est pas possible d'effectuer une observation cohérente du signal $V_1(t)$ (fig 4). Il est donc indispensable d'utiliser un système de synchronisation de signal pour assurer un affichage cohérent de la tension $V_1(t)$. Cette synchronisation consiste à comparer l'amplitude de la tension $V_1(t)$ par rapport à un niveau de référence de manière à produire un signal de déclenchement pour la base de temps, dont la période correspond à celle du signal $V_1(t)$ (Fig. 5).

3) Structure d'un oscilloscope

Il existe des oscilloscopes à une, deux ou quatre voies (ou entrées de signaux). Un oscilloscope à deux voies permet d'observer l'évolution temporelle de deux signaux en même temps ou de réaliser des compositions de signaux (la voie 2 en fonction de la voie 1). Chaque voie est munie d'un système d'atténuation pour régler l'amplitude des traces sur l'écran. Il existe un dispositif de synchronisation interne qui génère le signal de déclenchement de la base de temps. Il est possible aussi de déclencher la base de temps à partir d'un signal externe.

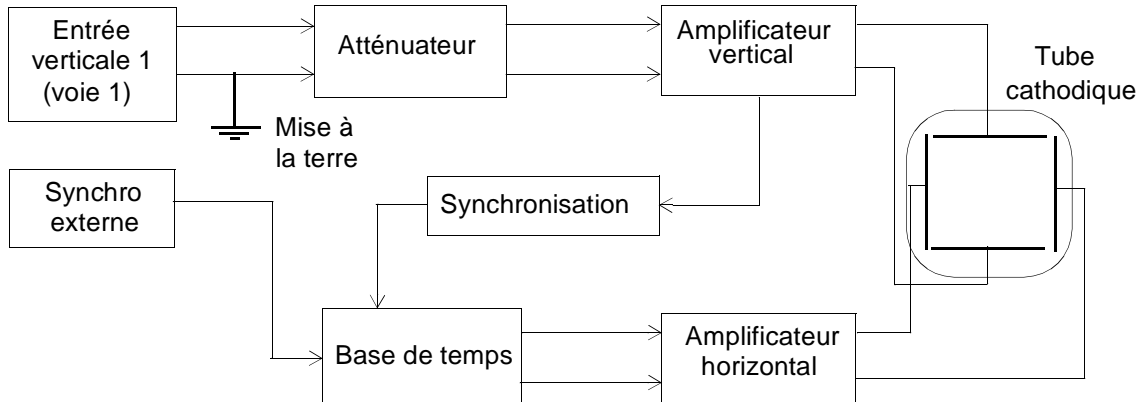


Fig 6 : Schéma de principe d'une voie de l'oscilloscope

Un oscilloscope comporte toujours les groupes de fonctions suivants:

- Réglage du faisceau d'électrons (intensité, focus, etc.)
- Réglage vertical des traces (amplitude, position, etc.)
- Réglage horizontal des traces (base de temps, zoom, etc.)
- Réglage du déclenchement (choix du mode, choix de la source et du niveau, etc.)

III - Les boutons de contrôle et de réglage d'un oscilloscope

Nous avons choisi de présenter, plus particulièrement les différents boutons de contrôle d'un oscilloscope Tektronix 2555 (Fig 7). Cependant, les fonctions de base d'un oscilloscope se retrouvent d'un modèle à l'autre. Aussi, les remarques qui suivent, sont suffisamment générales pour s'appliquer aussi à d'autres modèles d'oscilloscope.

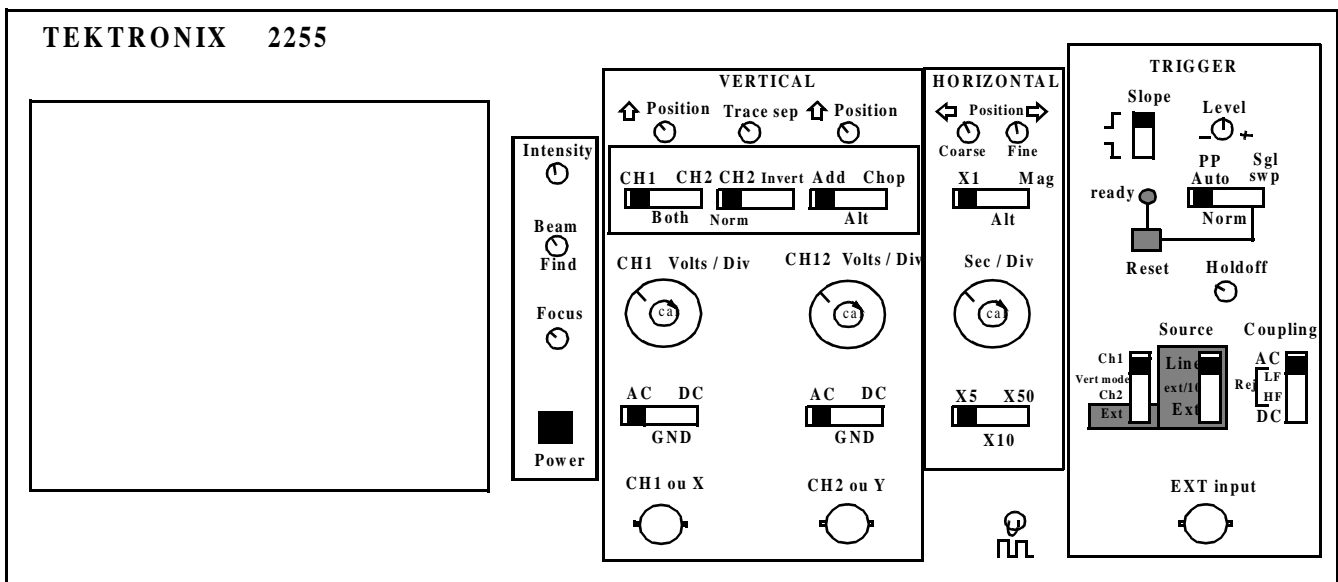


Fig 7 : Face avant de l'oscilloscope Tektronix 2255

1) Mise sous tension et réglage du faisceau d'électrons

Sur l'oscilloscope Tektronix 2255, la mise sous tension de l'appareil s'effectue à l'aide du bouton *Power*. D'autres modèles ne comportent pas nécessairement un bouton de mise sous tension spécifique. Il faut agir sur le bouton de réglage de l'intensité du faisceau pour faire la mise sous tension de l'appareil (par exemple, modèle Philips PM3211).

- Beam et Intensity: réglage de l'intensité du faisceau
- Focus: réglage du focus des traces (permet d'améliorer la précision des lectures)

2) Réglage vertical des entrées

CH1 ou X et CH2 ou Y	Entrées du canal 1 (voie 1) et du canal 2 (voie 2) par une prise BNC.
Sélecteur AC-GND-DC	<ul style="list-style-type: none"> - GND (ground ou masse) permet de visualiser la position du niveau de référence (masse) à l'écran - Le mode DC doit être utilisé en priorité. Il permet de visualiser aussi bien un signal continu qu'un signal alternatif. - En mode AC, le signal est filtré pour éliminer les basses fréquences et la composante continue. Ce mode peut déformer le signal en raison de l'effet de filtrage. Il doit donc être utilisé seulement dans des cas bien particuliers. Par exemple pour visualiser correctement l'ondulation de tension d'une source continue, il faut éliminer la composante continue du signal afin de pouvoir augmenter le gain (ou l'amplitude) du canal d'entrée.
Réglage du gain pour CH1 et CH2	Un sélecteur avec différentes positions permet de régler le gain du signal. Ce gain est identique en volt par division (ou volts / cm). Sur ce sélecteur, il y a un autre bouton (cal) qui permet de réaliser une décalibration de l'échelle du gain qui est fixée par le premier sélecteur. Il est essentiel que ce bouton de décalibration (cal) soit positionné correctement (position 0) si on souhaite faire des mesures à l'écran.
Réglage de la position des traces	Ces réglages permettent d'ajuster la position du signal de référence (masse). On les utilise, généralement lorsque le sélecteur des entrées est positionné sur GND (masse). En réglant correctement la position de la référence (masse), il est possible de lire sur l'écran l'amplitude des déviations (lorsque le sélecteur des entrées est en mode DC) et en déduire l'amplitude du signal d'entrée. Il faut vérifier cet ajustement de la position de référence si on réalise une inversion de signal et/ou une addition de signaux.
Sélection d'affichage des entrées	<p>Sélecteur CH1-Both-CH2: permet d'afficher, soit la trace du canal 1 (CH1), soit les traces des deux canaux ensemble (both), soit uniquement la trace du canal 2 (CH2).</p> <p>Sélecteur Norm-Invert: permet d'inverser le canal 2 (Invert) ou de réaliser un affichage normal de ce canal (Norm). Certains modèles d'oscilloscope offrent aussi la possibilité d'inverser le canal 1.</p> <p>Sélecteur Add-Alt-Chop: La position (Add) permet d'afficher une trace correspondant à la somme du canal 1 et du canal 2. La position (Alt) correspond à un affichage alterné des traces. Les traces des deux canaux sont rafraîchies à l'écran de manière alternée. La position (chop) correspond à un rafraîchissement simultané des deux traces. C'est généralement le mode d'affichage le plus intéressant.</p>

3) Réglage horizontal des entrées

Réglage de la position des traces	Ces boutons de réglage (coarse et fine) permettent d'ajuster la position horizontale du faisceau (centrage du faisceau par rapport à l'écran).
Réglage de la base de temps	Un sélecteur avec différentes positions permet de régler la base de temps (secondes / divisions ou secondes / cm). Sur ce sélecteur, il y a un autre bouton (cal) qui permet de réaliser une décalibration de l'échelle du gain qui est fixée par le premier sélecteur. Il est essentiel que ce bouton de décalibration (cal) soit positionné correctement (position 0) si on souhaite faire des mesures à l'écran. Sur l'oscilloscope Tektronik 2555, la composition des entrées (affichage X - Y ou CH1 - CH2) est réalisée par l'intermédiaire du sélecteur de la base de temps. Sur d'autres modèles d'oscilloscope, il existe généralement un bouton XY à part.
Sélecteur X1-Alt-Mag	La position X1 permet un affichage sans effet de zoom sur la base de temps. La position Mag produit un effet de zoom en multipliant l'échelle de la base par 5, 10 ou 50 (voir sélecteur suivant). La position Alt permet un affichage alterné de la trace et du zoom qui est réalisé (affichage de deux traces à l'écran).
Sélecteur X5-X10-X50	Ce sélecteur permet de choisir le facteur multiplicatif pour l'échelle de la base de temps (fois 5, fois 10 ou fois 50). Ce sélecteur est activé lorsque le sélecteur précédent est sur la position Alt ou Mag.

4) Réglage du déclenchement (Trigger)

Choix de la source de déclenchement (signal source)	Comme signal source pour assurer le déclenchement de l'oscilloscope, il est possible d'utiliser une des entrées (CH1 ou CH2), la tension d'alimentation du réseau (LINE) ou un signal extérieur (Ext). L'utilisation de la tension du réseau est bien adaptée pour l'étude des signaux dont la fréquence est un multiple ou un sous-multiple de 60 Hz. Un signal de déclenchement extérieur peut aussi être appliqué sur l'entrée EXT input en utilisant un câble BNC.
Choix du mode de couplage pour le signal source (coupling AC, LF, HF, DC)	Il s'agit d'un pré-traitement (filtrage) du signal source qui est utilisé pour le déclenchement. Le couplage AC (Alternative Component) permet d'éliminer la composante continue du signal source (filtrage très basse fréquence). Le couplage LF (Low Frequencies) élimine les basses fréquences. Le couplage HF (High Frequencies) élimine les hautes fréquences. Avec le couplage DC (direct component), il n'y a pas filtrage du signal source.
Réglage du déclenchement (Level - Slope)	Ce bouton permet de régler le seuil (ou niveau) de déclenchement pour les modes PP auto, Norm et Sgl swp. Le sélecteur Slope permet de choisir un déclenchement sur un front montant ou un déclenchement sur un front descendant.
Choix du mode de déclenchement (PP auto, Norm, Sgl swp)	Le mode PP Auto permet d'assurer un déclenchement automatique, adapté suivant l'amplitude crête à crête (peak à peak) du signal source. Le seuil de déclenchement est réglable avec le bouton (Level) mais ne dépasse jamais l'amplitude crête à crête du signal source. Le mode PP Auto permet donc de garantir un déclenchement en tout temps, même avec un signal source continu. Dans le mode Norm, l'utilisateur peut définir le niveau de déclenchement en agissant sur le bouton de réglage (Level) indépendamment du signal source. La trace est rafraîchie seulement si l'amplitude du signal source atteint ce seuil de déclenchement. Le mode mono-coup (sgl swp) est particulièrement intéressant pour visualiser des phénomènes transitoires (par exemple, la mise sous tension d'un circuit). Le déclenchement est réalisé une seule fois, lorsque le signal source dépasse un seuil de déclenchement qui est réglable pour le bouton level. L'évolution des entrées CH1 et CH2 sont alors mémorisées et affichées sur l'écran. Ce mode de déclenchement n'est réalisable que sur des oscilloscopes à mémoires.
Bouton de réglage Holdoff	Ce bouton permet de stabiliser la trace lorsque les déclenchements ne produisent pas une superposition parfaite des traces à l'écran. C'est le cas notamment lorsqu'il faut observer certains signaux numériques (modulation).

IV - Utilisation pratique

1) Mise sous tension et réglages initiaux

Lors de la mise sous de tension, il peut arriver qu'il soit difficile d'afficher une trace à l'écran en raison d'un mauvais choix du mode de déclenchement ou encore un mauvais réglage de la position des trace. Il est donc important de suivre une démarche systématique pour éviter ce genre de problèmes. il faut aussi s'assurer que tous les réglages sont corrects avant d'effectuer des mesures

1 - Vérification des réglages avant la mise sous tension

- Vérifier que le mode de déclenchement (trigger) est bien sur le mode automatique (AUTO).
- Vérifier que les sélecteurs d'affichage des traces sont positionnés correctement:
 - . Affichage de deux traces (Both),
 - . Affichage du canal 2 non inversé: (Norm),
 - . Affichage en mode alterné (Alt) ou découpé (chop).
- Positionner le sélecteur sur X1, pour enlever l'effet de zoom.
- Vérifier que les boutons de décalibration des échelles du gain de entrées et de la base de temps sont correctement positionnés (0 = aucune décalibration).

2 - Mise sous tension de l'appareil

- Appuyer sur Power (après avoir vérifier le branchement de l'appareil au réseau 120 V)
- Réglage du faisceau
 - . Agir sur les boutons Intensity, Beam et Focus pour régler correctement les traces sur l'écran.

3 - Ajuster les niveau de références

- Régler la position horizontale des traces
- Positionner le sélecteur des entrées CH1 et CH2 sur la masse (GND) et régler correctement la position verticale.

4 - Réaliser le branchement des sondes et positionner le sélecteur des entrées sur le mode DC

5 - Régler les amplitudes et la base de temps

6 - Modifier éventuellement le mode de déclenchement et la source de déclenchement.

2) Précautions à suivre pour le branchement des entrées

a) Problèmes de masse

Les masses de chaque voie de l'oscilloscope sont connectées. Si on utilise des sondes de tension non isolées pour mesurer de plusieurs signaux en même temps, **il faut utiliser un seul point de masse** pour éviter des courts-circuits. Il est donc préférable de connecter un seul fil de masse.

On considère l'exemple de la figure 8. Ce circuit se compose d'une source alternative, d'une diode, d'un shunt (résistance de faible valeur utilisée comme capteur de courant), d'une capacité polarisée et d'une résistance de charge.

On souhaite observer la tension aux bornes de la diode V_{ab} sur la voie 1 et le courant débité par la source I_s sur la voie 2 en relevant la tension aux bornes du shunt ($V_{bc} = R \cdot I_s$ en convention récepteur). Il faut faire très attention à la manière de réaliser les connexions.

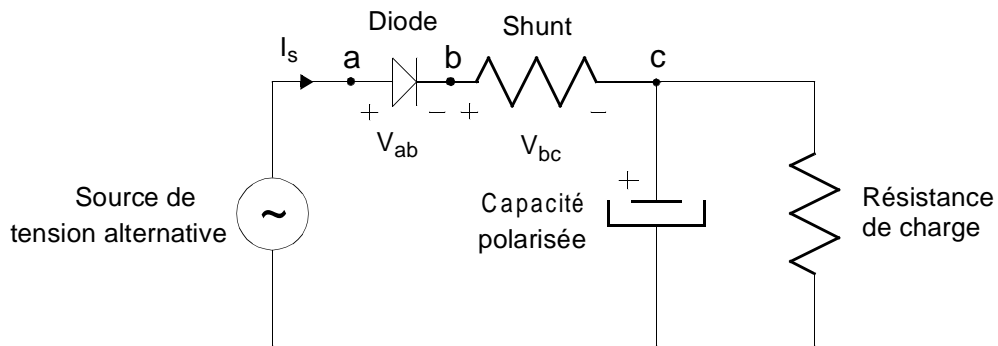


Fig 8 : Exemple de circuit: montage redresseur à une diode

Si on réalise le branchement de la figure 9, on obtient, à priori, V_{ab} sur la voie 1 et une tension V_{bc} sur la voie 2. Sachant que $V_{bc} = RI_s$, la tension V_{bc} correspond bien à l'image du courant de la source I_s . Cependant, sur l'écran, il n'apparaît aucune déviation pour la voie 2 en raison d'un branchement incorrect. En effet, les masses de chaque voie ne sont pas reliées au même point. Il y a alors un court-circuit sur le montage qui est provoqué par l'oscilloscope. Il n'est donc pas possible d'utiliser ce type de branchement pour observer deux signaux simultanément (si les sondes de tension ne sont pas isolées).

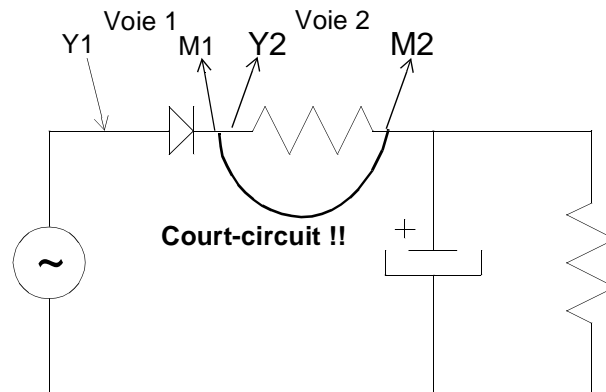


Fig 9 : Branchement incorrect des voies de l'oscilloscope

Le branchement de la figure 10 est correct puisque les masses de chaque voie sont bien reliées au même point. On aurait pu, aussi, brancher un seul fil de masse pour faire cette mesure puisque les masses des voies sont déjà reliées à l'intérieur de l'oscilloscope.

La voie 1 permet d'observer directement la tension V_{ab} . La voie 2 permet d'observer la tension V_{cb} . Sachant que $V_{bc} = -RI_s$, il faut appuyer sur la touche d'inversion de signal de la voie 2 pour observer correctement l'allure du courant I_s .

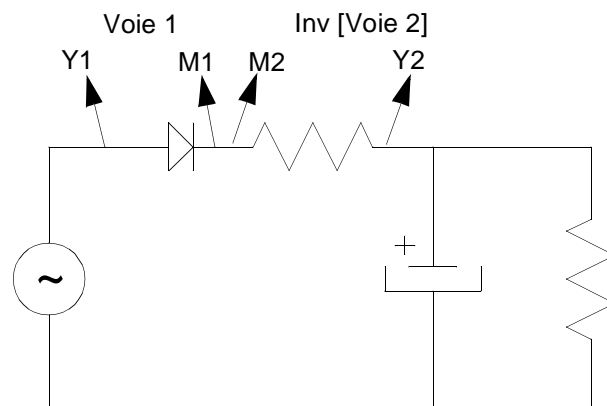


Fig 10 : Branchement correct des voies de l'oscilloscope

b) Problèmes de mise à la terre

Dans un équipement électrique, toute pièce métallique (ou conductrice) qui est accessible à l'utilisateur doit être reliée à la terre pour éviter les chocs électriques. Cette règle s'applique aussi à un oscilloscope. Son boîtier est relié à la terre ainsi que les bornes de masse.

Il faut prendre certaines précautions pour le branchement de l'oscilloscope, si on effectue des mesures sur un montage qui comporte déjà une mise à la terre. En considérant le montage, nous allons développer la méthode de mesure qui permet d'observer la tension aux bornes de résistance R_1 avec un oscilloscope.

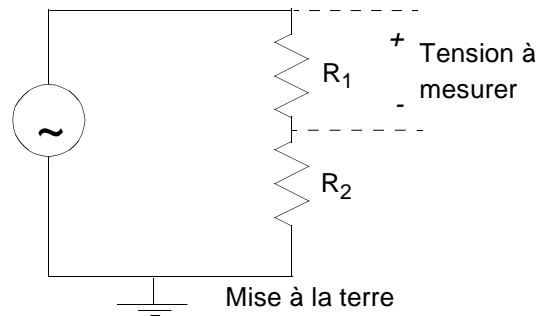
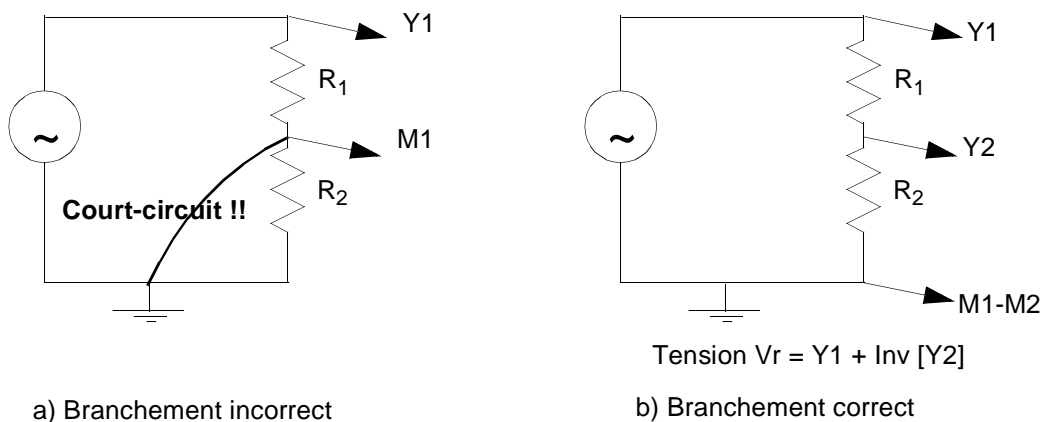


Fig 11 : Exemple de mesure sur un montage avec mise à la terre

La masse de l'oscilloscope doit être branchée au même endroit que la mise à la terre pour éviter un court-circuit. La figure 12a montre un branchement incorrect. D'une part, la mesure est faussée et d'autre part on risque d'endommager l'oscilloscope (courant de court-circuit). Il n'est pas possible d'obtenir directement la tension aux bornes de R_1 à moins d'utiliser des sondes de tension isolée. La figure 12b montre le branchement correct qui utilise les deux voies de l'oscilloscope. Il faut ensuite effectuer une composition de signaux (voie 1 - voie 2) pour obtenir la tension aux bornes de la résistance R_1 .



a) Branchement incorrect

b) Branchement correct

Fig 12 : Mesure de la tension V_r aux bornes de R_1

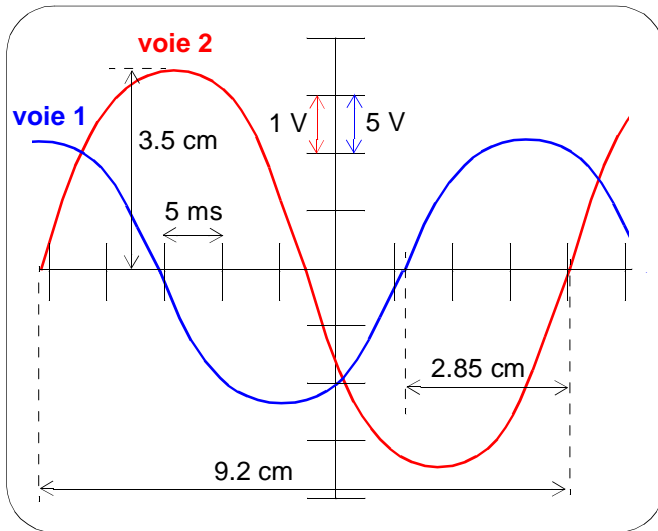
3) Mesures à l'écran (amplitude, période, déphasage)

Si on considère les signaux présentés sur la figure 13 (tel qu'ils apparaissent sur l'écran de l'oscilloscope), la période du signal de la voie 2 s'obtient en mesurant sur l'axe x de l'écran, la distance en centimètres qui sépare des passages par zéro (des fronts montants par exemple). On trouve 9.2 cm ce qui correspond à :

$$\text{Période: } T = 9.2 \text{ cm} \cdot 5 \text{ ms/cm} = 46 \text{ ms, soit une fréquence } f = 1/T = 21.7 \text{ Hz}$$

L'amplitude maximale du signal de la voie 2 est :

$$\text{Amplitude (Volt)} = 3.5 \text{ cm} \cdot 1 \text{ V/cm} = 3.5 \text{ V}$$



Exemple de réglages :

Amplitude **voie 1** : 5 Volts par cm

Amplitude **voie 2** : 1 Volt par cm

Base de temps : 5 ms par cm

(une division correspond à un cm)

Masses 1 et 2 réglées
sur l'axe horizontal

Fig 13 : Mesure des caractéristiques d'un signal sur l'écran

Les deux signaux (voie 1 et voie 2) ont la même fréquence. Il est donc possible de mesurer le déphasage entre ces signaux. La voie 1 est en avance (de phase) par rapport à la voie 2. L'angle de déphasage entre la voie 1 et la voie 2 s'obtient de la manière suivante:

Mesure de la distance en centimètre entre le passage par zéro d'un front montant de la voie 1 et le passage par zéro d'un front montant de la voie 2:

$$x = 2.85 \text{ cm} \text{ soit un retard de } t = 2.85 \text{ cm} \cdot 5 \text{ ms/cm} = 14.25 \text{ ms}$$

Une simple règle de trois permet de déduire l'angle de déphasage (par exemple en degrés):

$$\theta = 2.85 \text{ cm} / 9.2 \text{ cm} \cdot 360 \text{ degrés} = 111.5 \text{ degrés}$$

4) Les erreurs de mesure

Comme tous les appareils de mesure, l'oscilloscope produit aussi des erreurs de mesure en raison d'un manque de précision (de l'appareil ou des lectures sur l'écran).

Un oscilloscope introduit une erreur systématique sur l'amplitude de la déviation du faisceau qui dépend de ses caractéristiques. Dans le cas des oscilloscopes du laboratoire (Tektronix ou Philips), cette erreur représente 3% de la déviation. À cela s'ajoute, une erreur de lecture et une erreur pour le réglage du zéro. L'erreur de lecture et l'erreur de réglage de zéro correspondent à des erreurs de parallaxe. Elles dépendent directement de la grandeur des divisions de l'écran. On estime cette erreur à la moitié de la plus petite division.

Par exemple: On relève à l'oscilloscope, une déviation verticale $y = 8 \text{ cm}$. L'erreur systématique de l'oscilloscope est de 3% et la plus petite division de l'écran a pour largeur 0.2 cm.

$$\Delta y_{\text{instrument}} = 0.03 \cdot 8 = 0.24 \text{ cm}$$

$$\Delta y_{\text{lecture}} = \frac{1}{2} \cdot \text{division} = \frac{1}{2} \cdot 0.2 \frac{\text{cm}}{\text{div}} = 0.1 \text{ cm}$$

$$\Delta y_{\text{zero}} = \frac{1}{2} \cdot \text{division} = \frac{1}{2} \cdot 0.2 \frac{\text{cm}}{\text{div}} = 0.1 \text{ cm}$$

$$\Delta y_{\text{totale}} = \Delta y_{\text{instrument}} + \Delta y_{\text{lecture}} + \Delta y_{\text{zero}} = 0.24 + 0.1 + 0.1 = 0.44 \text{ cm}$$

L'erreur relative de cette mesure se déduit de la relation suivante:

$$\text{Erreur relative} = \frac{\Delta y_{\text{totale}}}{y} = \frac{0.44}{8} = 0.055$$

Le résultat final de cette mesure est donc:

$$\text{Resultat} = y = 8.0 \pm 0.4 \text{ cm}$$

V - Références

- [1] René Rateau - *OSCILLOSCOPES, fonctionnement utilisation* - Edition Techniques et Scientifiques Française (ETSF) - 1988 - ISBN 2 85535 172 3.
- [2] W.D. Cooper - *Electronic Instrumentation and Measurement* - Prentice Hall, 1985
- [3] S. Wolf - *Guide to Electronic Measurements and Laboratory Practice* - Prentice Hall, 1973