PRINCIPE DES MULTIMETRES NUMERIQUES

I CONVERTISSEUR ANALOGIQUE NUMERIQUE (CAN)

La grandeur de base mesurée dans un multimètre est la tension continue. Pour ce faire, on utilise des CAN

I.1 Les différents types de CAN

Il existe différentes techniques de conversion.

I.1.1 Convertisseurs à intégration

CAN simple rampe

CAN double rampe

I.1.2 Convertisseurs à comptage

CAN à rampe numérique

CAN à poursuite

CAN à conversion tension/fréquence

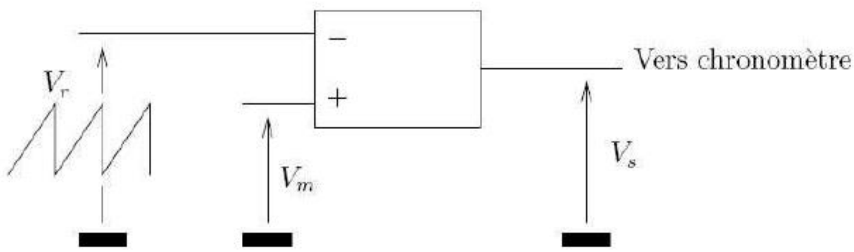
I.1.3 Autres techniques de conversion

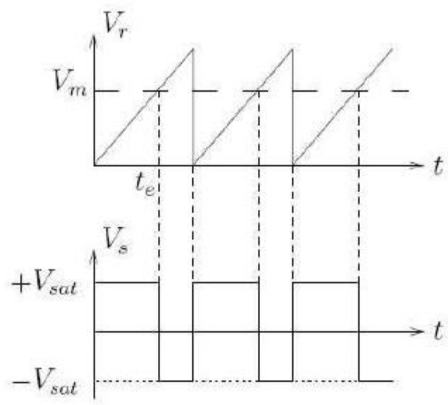
CAN flash

CAN à approximations successives

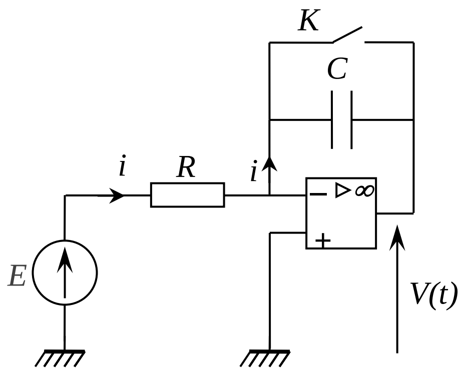
I.2 Le CAN simple rampe

Le principe est le suivant : on compare la tension à mesurer (V_m) à une tension (V_r) uniformément croissante au cours du temps (rampe), et on mesure le temps que met V_r à atteindre V_m





<u>Création de la rampe avec un intégrateur a courant constant</u> :

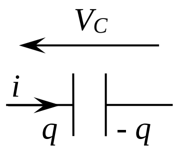


$\varepsilon = 0$ tant qu'on est en régime linéaire donc $V_- = V_+ = 0$, d'où :

$$i = \frac{E - V_-}{R} = \frac{E}{R} = \text{cte}$$

On a donc un générateur de courant constant.

On a $V(t) = V_- = 0$ quand la capacité est shuntée (A.O. en régime linéaire car contre réaction totale sur la patte -). Lorsqu'on ouvre l'interrupteur, on a $V(t) = -V_C(t)$ et le condensateur se charge :



$$\rightarrow \quad V(t) = -V_C = \frac{q(t)}{C} \quad (a)$$

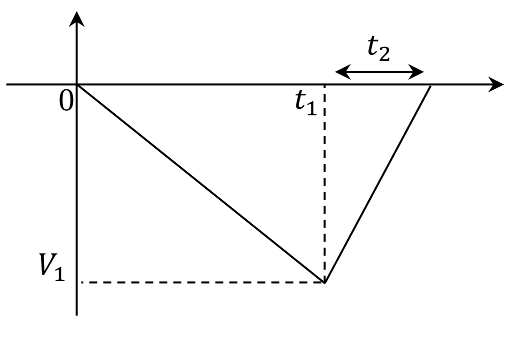
$$i = \frac{dq}{dt} \quad \rightarrow \quad \int dq = \int i.dt = i.\int dt \quad car\ i = cte \quad \rightarrow \quad q = i.t \qquad (b)$$

$$\text{(b) dans (a)} \rightarrow \quad \boxed{V(t) = -V_C = -\frac{i}{C}.t = -\frac{E}{RC}.t}$$

On a une rampe décroissante ou croissante suivant le signe de E.

<u>Limites du CAN simple rampe</u> :
Sensibilité aux variations du produit RC (dispersion de fabrication et vieillissement dans le temps)

I.3 <u>Amélioration : le CAN double rampe</u>



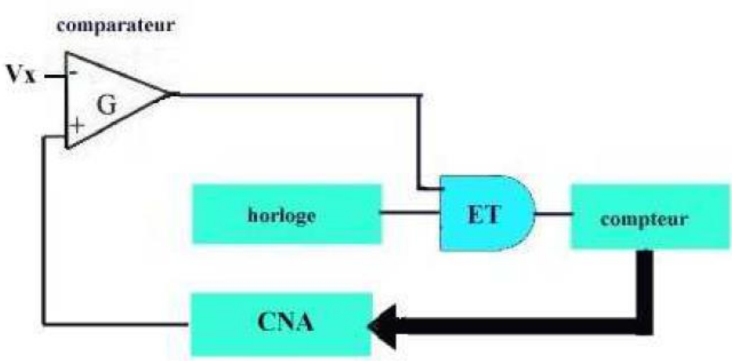
On applique la tension à mesurer V_X (supposée positive ici) sur l'intégrateur (initialement à zéro) pendant un temps prédéterminé t_1. On obtient alors une tension $V_1 = -\,V_X t_1/RC$.

On commute l'intégrateur sur une tension de référence E de polarité opposée à V_X. La tension décroît linéairement de V_1 jusqu'à 0 et on compte ce temps de décroissance. On obtient $V_1 = -Et_2/RC$.

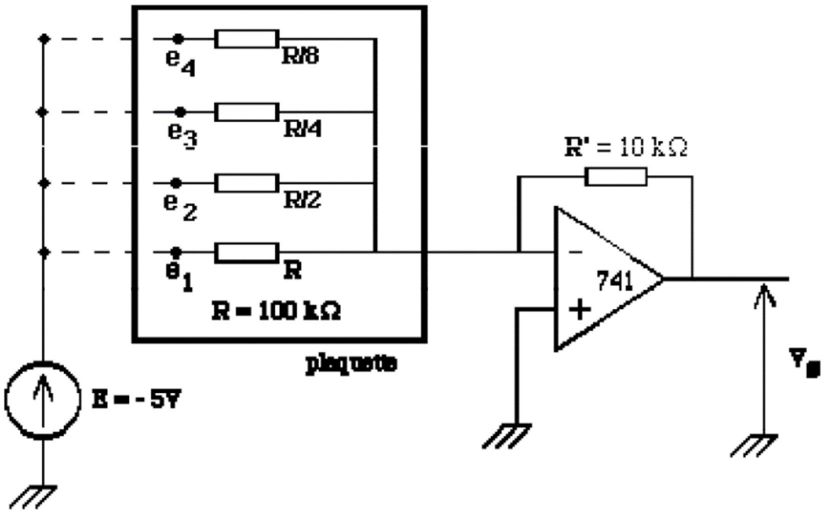
On obtient $V_X = E.t_2/t_1$ en égalant les deux relations → **le résultat ne dépend plus de RC** → une variation de la constante de temps RC n'introduit plus d'erreur sur le résultat.

I.3.1 CAN a rampe numérique

La rampe de tension peut être générée non pas par un intégrateur mais par un convertisseur numérique analogique (CNA) alimenté par un compteur. Ce montage est intéressant puisqu'il a la linéarité et la stabilité du CNA ce qui est plus facile à garantir que celle d'un intégrateur à circuit RC. La sortie du CNA est comparée à la tension à convertir, et le comparateur en changeant d'état lors de l'égalité, arrête le comptage. On obtient alors à la sortie du compteur un nombre N proportionnel à V_X.



Exemple de CNA (R/n) :



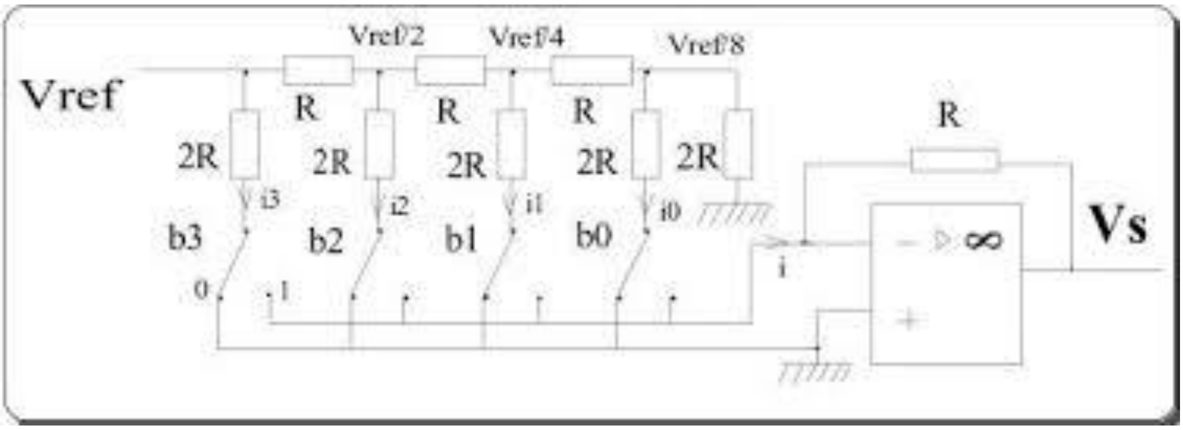
Par exemple, pour obtenir la valeur analogique V_S correspondant au nombre décimal 5 (0101 en binaire), relier la tension E aux entrées e_1 et e_3. On obtient

$$V_S = -ER'\left(1\cdot\frac{1}{R}+0\cdot\frac{2}{R}+1\cdot\frac{4}{R}+0\cdot\frac{8}{R}\right) = K(1\cdot 2^0+0\cdot 2^1+1\cdot 2^2+0\cdot 2^3)$$

Ce CNA permet ensuite de réaliser un CAN. Pour cela, envoyer le signal V_S ainsi que la tension à mesurer sur un comparateur. Faire croître progressivement le nombre binaire jusqu'à ce que le comparateur change d'état. Il y a alors égalité entre les deux tensions. On en déduit l'expression binaire de la tension à mesurer (à une constante multiplicative près qui peut être ajustée).

CNA R/2R :

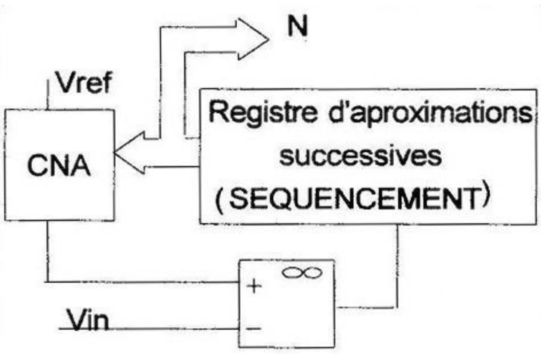
Le réseau de résistances (R/n) n'est pas utilisé en pratique, essentiellement pour des raisons de précision. Pour obtenir un convertisseur à 8 bits, il faudrait utiliser des résistances allant de R à $R/2^7$, or la précision des composants est généralement de l'ordre de 5 à 10 %. On utilise plutôt un réseau $(R - 2R)$ plus simple car il n'utilise que 2 résistances R et $2R$ (cf. Duffait, p.283).

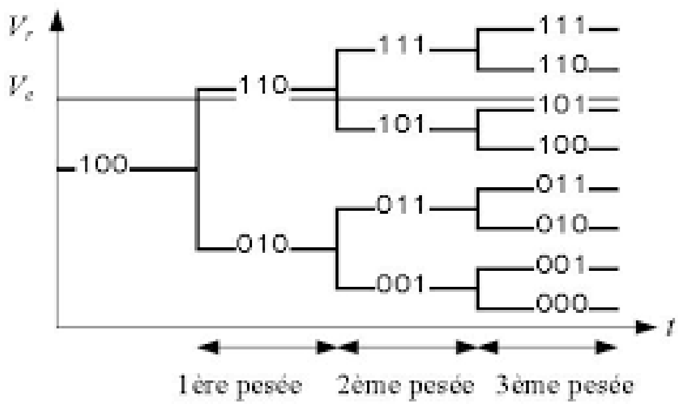


I.4 **Le CAN à approximations successives**

La plupart des techniques précédentes ont l'inconvénient commun d'un temps de conversion important et dépendant de la valeur V_X de la tension à convertir. En effet, il faut dans la majorité des cas « attendre » qu'un compteur atteigne une valeur numérique suffisante. Le CAN à approximations successives est intéressant quand on a besoin de rapidité.

Le principe est de déterminer successivement les n bits du nombre représentatif de la tension d'entrée en n coups d'horloge grâce à une logique générant celui-ci par approximations successives en commençant par le bit de poids fort (MSB) et en finissant par le bit de poids faible (LSB).

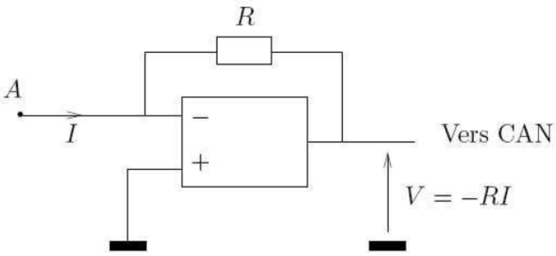




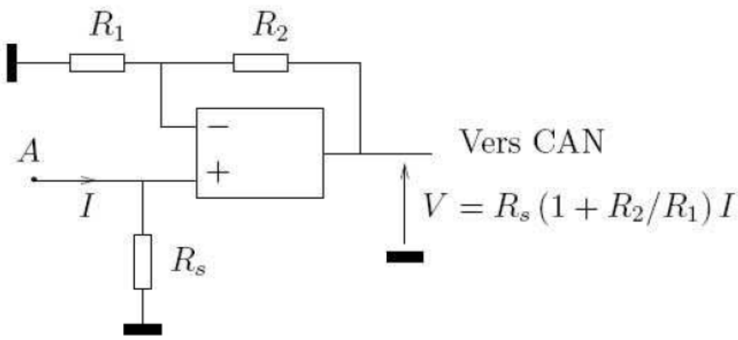
Ce convertisseur présente l'avantage d'avoir un temps de conversion fixe, indépendant de la valeur de l'information analogique à convertir, ce qui se prête bien à l'acquisition de données pour un traitement informatique (oscilloscope, carte d'acquisition, multimètre à échantillonnage, …).

II **MESURE D'UN COURANT**

L'élément de base du multimètre étant un voltmètre, on peut transformer l'intensité I à mesurer en une tension V au moyen d'un convertisseur I → V :



Le courant *I* mesurable ainsi est limité à environ 10 mA à cause de la saturation en courant de l'AO. De plus, il est risqué de faire passer du courant dans l'électronique de l'appareil → en pratique, on fait passer l'intensité *I* dans une résistance de shunt *Rs* :

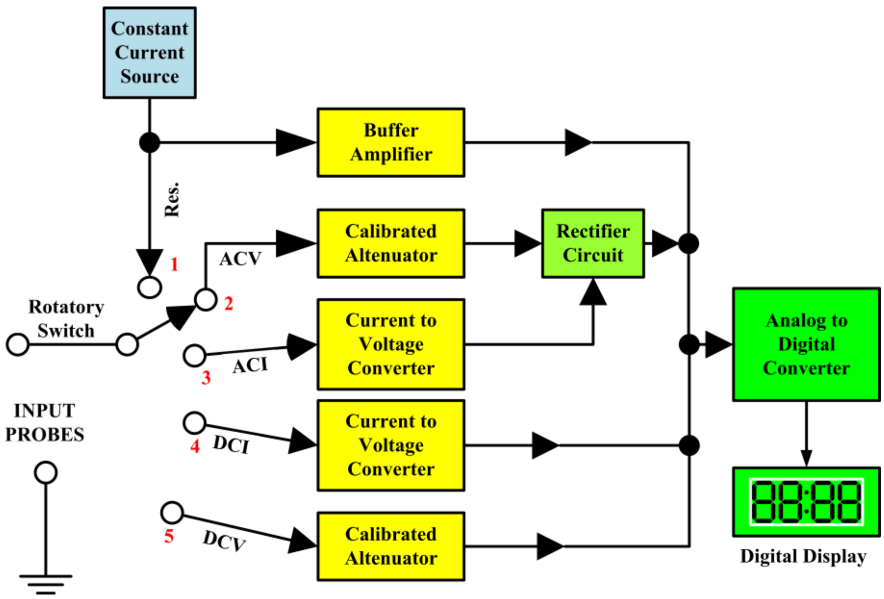


La résistance d'entrée de l'ampèremètre est R_S (ampèremètre non idéal). On peut la réduire grâce au facteur d'amplification $1 + R_2/R_1$. Dans les faits, elle est ≈ nulle sur le calibre 10 A mais augmente au fur et à mesure que le calibre baisse (≈ 10 Ω sur 100 mA, 100 Ω sur 1 mA, 1kΩ sur 1 A).

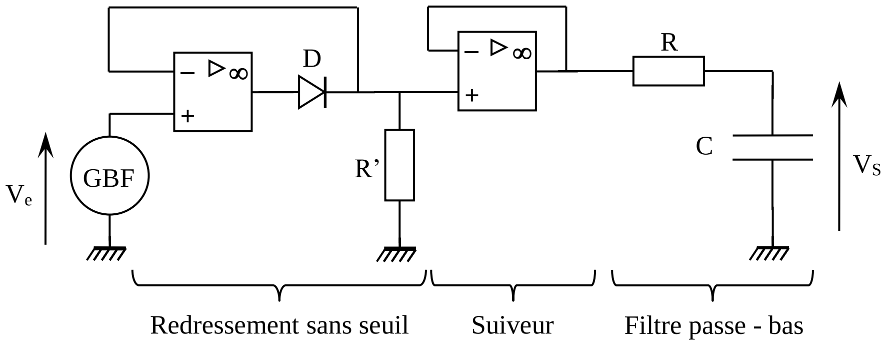
III MESURE DE GRANDEURS ALTERNATIVES

Les voltmètres alternatifs numériques les plus performants échantillonnent la tension à mesurer (acquisition d'un grand nombre de valeurs instantanées avec un échantillonneur bloqueur), numérisent (discrétisation des valeurs instantanées, codage binaire et mémorisation), et effectuent les calculs nécessaires pour extraire la valeur efficace, qui est envoyée sur un afficheur (multimètres RMS ou TRMS).

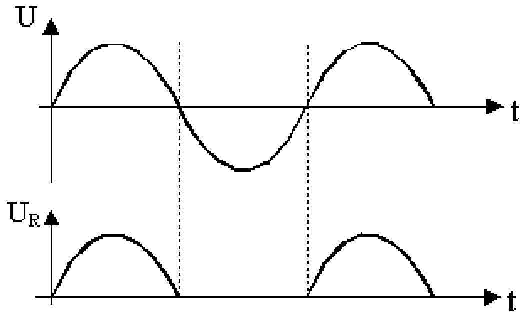
Les multimètres basiques quant à eux, utilisent un principe plus simple car moins couteux :



Pour mesurer une tension alternative (pour un courant, on le fait d'abord passer dans un convertisseur I → V), on peut imaginer la structure de base suivante :



Le premier étage effectue un redressement mono alternance de la tension à mesurer (diode sans seuil) :



Si le signal d'entrée est sinusoïdal, on a alors en sortie un signal de valeur moyenne $V_{moy} = V_{max}/\pi$.

Le filtre passe-bas RC sert à extraire cette valeur moyenne. En effet, le signal redressé étant toujours périodique mais plus sinusoïdal, il peut être décrit en termes de transformée de Fourier comme la somme d'une valeur moyenne plus des harmoniques.

Si la fréquence de coupure du filtre est suffisamment basse par rapport à celle du signal, on récupère à la sortie du filtre la valeur $V_S = V_{moy}$.

On peut en déduire la valeur efficace du signal d'entrée puisqu'on a $V_{eff} = V_{max}/\sqrt{2}$ pour un signal sinusoïdal. Comme $V_S = V_{max}/\pi$ ici, on a alors $V_{eff} = \pi V_S/\sqrt{2}$. Cette conversion s'effectue en pratique en plaçant à la sortie du filtre un ampli non-inverseur de gain adapté pour effectuer la multiplication de V_S par le facteur de forme convenable :

$$F = \frac{V_{EFF.SIGNAL.SINUSOIDAL}}{V_{MOY.SIGNAL.REDRESSE.SIMPLE.ALTERNANCE}}$$

<u>Cas des signaux alternatifs non sinusoïdaux</u> :

Dans le cas d'une sinusoïde, le facteur de forme F facteur vaut $\pi/\sqrt{2}$ mais pour un signal carré ou triangulaire, cette valeur change ! → Le multimètre multipliant la valeur moyenne redressée simple alternance par le facteur de forme sinusoïdal quel que soit la forme du signal, le résultat est automatiquement faussé dans le cas des signaux non sinusoïdaux (on peut le vérifier sur les multimètres basiques). Si on veut alors la bonne valeur, il faut effectuer une conversion sachant l'erreur qu'introduit leur principe de mesure.

Multimètres RMS TRMS :

Un signal peut comporter une partie alternative et une composante continue. La mesure de la valeur efficace doit alors normalement englober la totalité de ce signal mais ce n'est pas toujours le cas : certains multimètres mesurent la valeur efficace de la totalité du signal, d'autres en revanche ne mesurent que la valeur efficace de la composante alternative.

La logique voudrait qu'on appelle les premiers des appareils TRMS (True RMS) et les seconds des appareils RMS. Dans la pratique, l'appellation retenue diffère suivant les constructeurs : de nombreux appareils notés TRMS ne mesurent en réalité que la partie alternative du signal. Le plus sûr est donc de vérifier la mesure effectuée en étudiant par exemple une tension alternative issue d'un GBF auquel on rajoute un offset.

Un calcul simple montre cependant que les deux types de mesures sont reliés par la relation suivante :

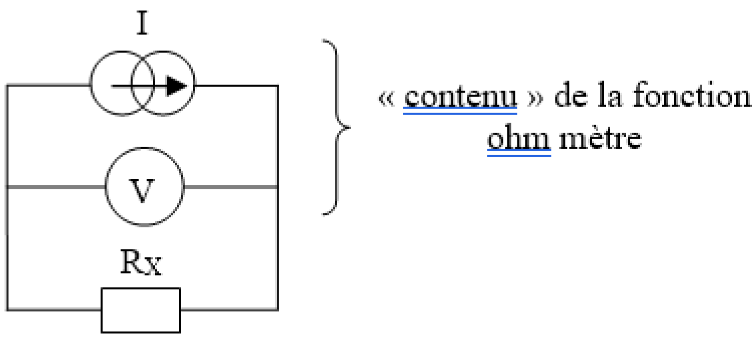
$$V_{eff}^2(totale) = V^2(moyenne) + V_{eff}^2(composante\ alternative)$$

→ on peut obtenir la valeur efficace totale d'un signal avec un multimètre « RMS simple » en combinant une mesure en mode continu (DC) et une mesure en mode alternatif (AC). Certains appareils permettent les deux types de mesures (efficace « vrai » et efficace « simple).

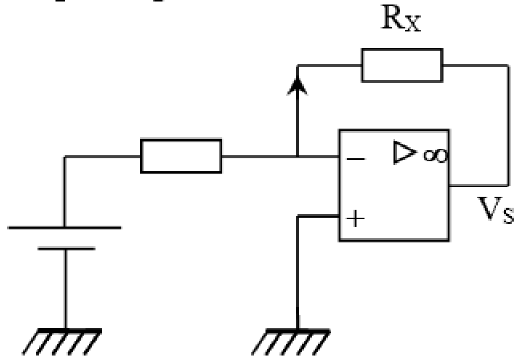
IV MESURES D'AUTRES GRANDEURS

IV.1 Résistance

La mesure dans un multimètre se ramenant généralement à celle d'une tension continue, l'idée pour constituer la fonction ohm mètre dans un tel appareil est de mesurer la tension V = R_x I aux bornes de la résistance R à mesurer, l'intensité I étant fournie par une source de courant stabilisée intégrée dans l'appareil :



Montages de principe :

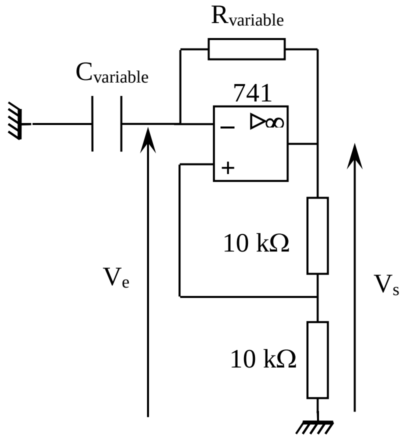


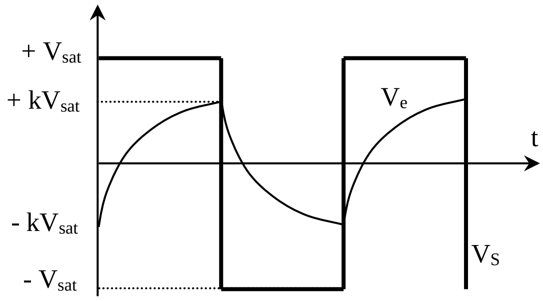
On peut raffiner le montage avec 4 connecteurs pour obtenir un montage 4 fils

IV.2 Capacité

IV.2.1 Par la mesure de la période d'un oscillateur

On réalise un oscillateur de relaxation dont la période dépend de la valeur de la capacité. Cette méthode se prête bien à la réalisation d'un capacimètre car on sait mesurer très précisément un temps.





Le principe de fonctionnement du circuit est décrit dans le montage sur les systèmes bouclés (oscillateurs autoentretenus). On mesure la période de V_S. On en déduit la valeur de C par la relation

$$\boxed{T = 2RC\,ln\,3}$$

IV.2.2 Par une charge a courant constant

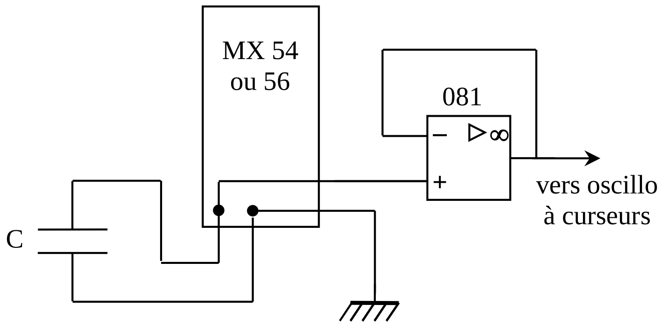
On a vu comment réaliser un intégrateur a courant constant lors de l'étude du CAN simple rampe. Il fournit une tension du type :

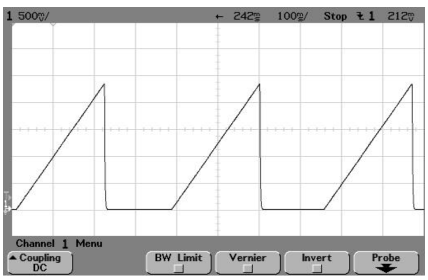
$$\boxed{V(t) = -V_C = -\frac{i}{C}.t = -\frac{E}{RC}.t}$$

La tension à la sortie du montage évoluant de façon linéaire en fonction du temps, il suffit de mesurer la pente de cette courbe pour en déduire la valeur de la capacité par la relation suivante :

$$\boxed{C = \frac{E}{R}.\frac{\Delta t}{\Delta V}}$$

Certains multimètres, comme les Métrix MX 54 ou 56, utilisent cette technique. Il suffit d'observer la tension aux bornes de la capacité lorsqu'on effectue une mesure (on intercale un amplificateur opérationnel monté en suiveur pour que l'oscilloscope ne perturbe pas l'appareil) :





La pente des rampes change lorsqu'on modifie la valeur de la capacité et quand on change de calibre de mesure (modification du courant de mesure).

V AUTRES INSTRUMENTS DE MESURE

V.1 Courants forts : la pince ampère métrique

La plupart des multimètres courants ne permettent pas la mesure de courant supérieur à 10 – 20 A. Au-delà, on a recours aux pinces ampère métriques. Ces instruments effectuent une mesure indirecte du courant.

V.1.1 Pinces fonctionnant uniquement en alternatif

Elles utilisent la loi sur le courant du transformateur. On fait passer le fil dans lequel circule le courant à mesurer dans un noyau ferromagnétique. Il constitue le primaire du transformateur. Le secondaire est constitué d'un bobinage inclus dans la pince et refermé sur un détecteur de courant à faible impédance.

.

V.1.2 En continu

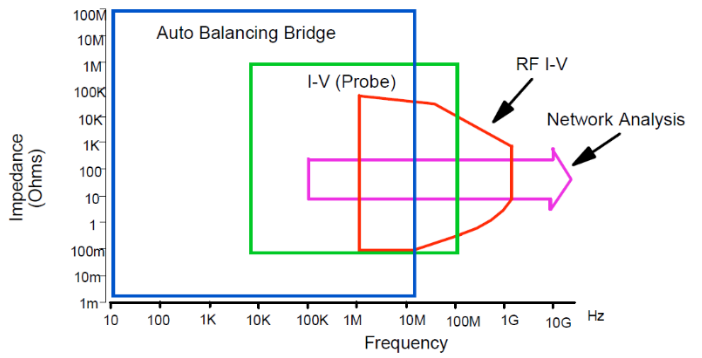
Certaines pinces permettent des mesures en continu. Elles utilisent alors une sonde à effet Hall qui mesure le champ magnétique créé par la circulation du courant dans le fil. Il y a toujours une carcasse ferromagnétique dans la pince pour renforcer le champ $\vec{B}$ crée par le fil car il est très faible (cf. loi de Biot et savart). Par contre, elle n'est pas refermée intégralement pour linéariser la relation entre B et I (on le remarque d'ailleurs quand on ouvre la pince, on voit le revêtement plastique de la pince et pas la carcasse ferro comme dans une pince purement alternative).

V.2 RLC mètres

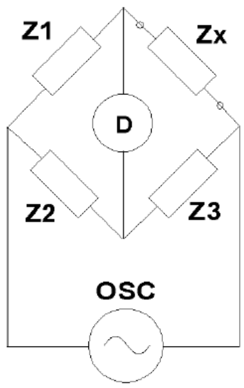
Measurement Techniques

- Auto Balancing Bridge
- Resonant (Q-adapter / Q-Meter)
- I-V (Probe)
- RF I-V
- Network Analysis (Reflection Coefficient)
- TDR (Time Domain Reflectometry)

Solution by Frequency Comparison



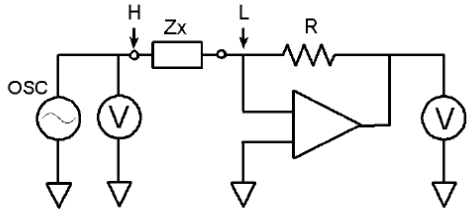
Bridge method



$$Zx = \frac{Z1}{Z2} Z3$$

When no current flows through the detector (D), the value of the unknown impedance Zx can be obtained by the relationship of the other bridge elements. Various types of bridge circuits, employing combinations of L, C, and R components as the bridge elements, are used for various applications.

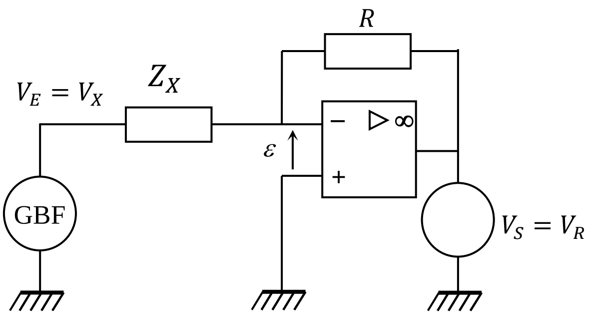
Auto balancing bridge method

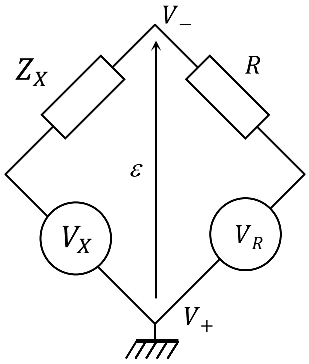


The current, flowing through the DUT, also flows through resistor R. The potential at the "L" point is maintained at zero volts (thus called a "virtual ground"), because the current through R balances with the DUT current by operation of the I-V converter amplifier. The DUT impedance is calculated using voltage measurement at High terminal and that across R.

Note: In practice, the configuration of the auto balancing bridge differs for each type of instrument.
Generally LCR meters, in a low frequency range typically below 100 kHz, employ a simple operational amplifier for its I-V converter. This type of instrument has a disadvantage in accuracy, at high frequencies, because of performance limits of the amplifier. Wideband LCR meters and impedance analyzers employ the I-V converter consisting of sophisticated null detector, phase detector, integrator (loop filter) and vector modulator to ensure a high accuracy for a broad frequency range over 1 MHz. This type of instrument can attain to a maximum frequency of 110 MHz.

Ce montage est équivalent à un pont avec deux branches pour Z_X et R et les deux autres branches pour les deux voltmètres.





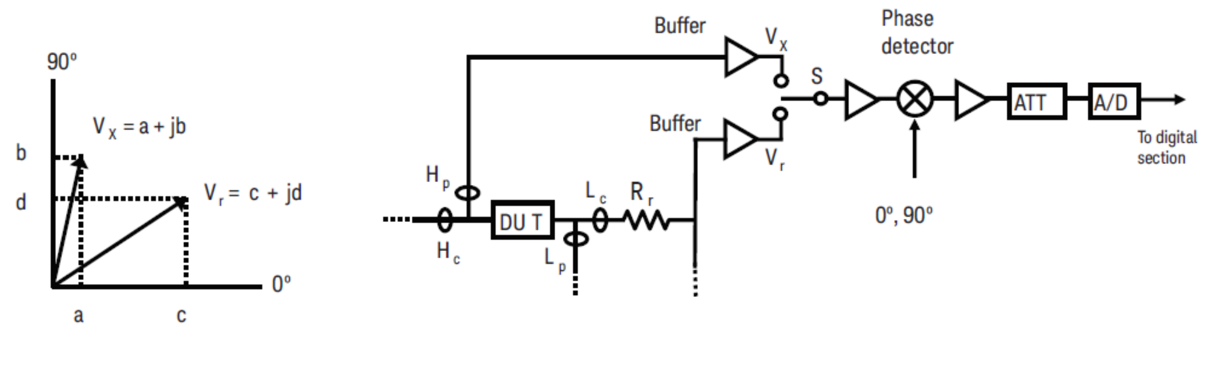
Le signal d'erreur correspond à la tension ε de l'AO. Elle est nulle puisque la rétroaction via R est faite sur la patte -, d'où le terme de pont auto-équilibré.

L'égalité des courants dans Z_X et R (car aucun courant ne rentre dans l'AO) aboutit à la relation :

$$Z_X = -\frac{V_X}{V_R} R$$

Les tensions V_X et V_R sont envoyées successivement dans une détection synchrone qui les multiplie par un signal de référence en phase puis déphasé de 90 °. Cette opération permet de récupérer la partie réelle et imaginaire des deux tensions, ce qui permet d'obtenir après calcul la partie réelle et imaginaire de l'impédance Z_X :

The vector ratio detector (VRD) section measures the ratio of vector voltages across the DUT, V_x, and across the range resistor (Vr) series circuit, as shown in Figure 2-5 (b). The VRD consists of an input selector switch (S), a phase detector, and an A-D converter, also shown in this diagram.) The measured vector voltages, Vx and Vr, are used to calculate the complex impedance (Zx) in accordance with equation 2-3.



(a) Vector diagram of V_x and V_r

(b) Block diagram

In order to measure the Vx and Vr, these vector signals are resolved into real and imaginary components, Vx = a + jb and Vr = c + jd, as shown in Figure 2-5 (a). The vector voltage ratio of Vx/Vr is represented by using the vector components a, b, c, and d as follows:

$$\frac{Vx}{Vr} = \frac{a + jb}{c + jd} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j\,\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \qquad (2\text{-}4)$$

The VRD circuit is operated as follows. First, the input selector switch (S) is set to the Vx position. The phase detector is driven with 0° and 90° reference phase signals to extracts the real and imaginary components (a and jb) of the Vx signal. The A-D converter next to the phase detector outputs digital data for the magnitudes of a and jb. Next, S is set to the Vr position. The phase detector and the A-D converter perform the same for the Vr signal to extract the real and imaginary components (c and jd) of the Vr signal.

From the equations 2-3 and 2-4, the equation that represents the complex impedance Zx of the DUT is derived as follows (equation 2-5):

$$Zx = Rx + jXx = Rr\,\frac{Vx}{Vr} = Rr\left[\frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j\,\frac{bc - ad}{c^2 + d^2}\right] \qquad (2\text{-}5)$$

The resistance and the reactance of the DUT are thus calculated as:

$$Rx = Rr\,\frac{ac + bd}{c^2 + d^2}\,, \quad Xx = Rr\,\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \qquad (2\text{-}6)$$

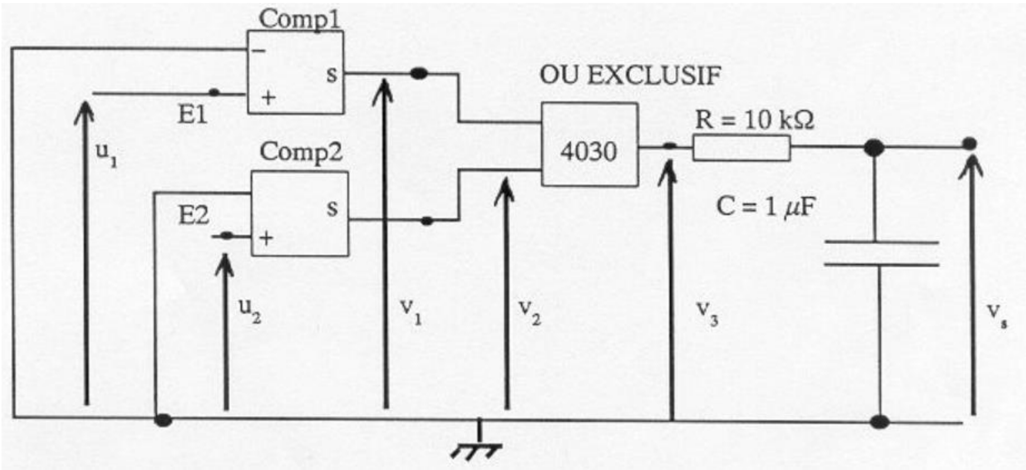
Various impedance parameters (Cp, Cs, Lp, Ls, D, Q, etc) are calculated from the measured Rx and Xx values by using parameter conversion equations which are described in Section 1.

<u>Bibliographie</u> :

Keysight Technologies Impedance Measurement Handbook A guide to measurement technology and techniques 6th Edition (disponible sur internet)

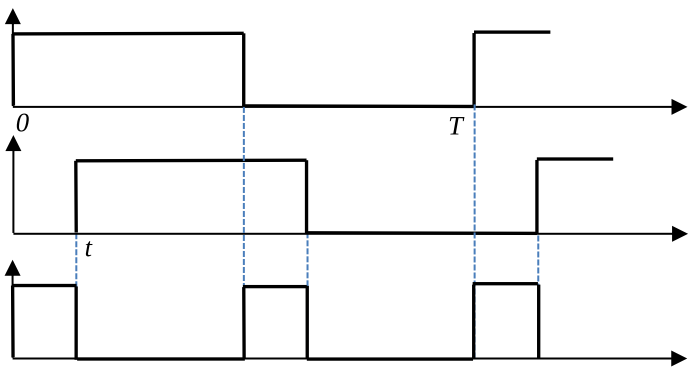
V.3 Mesure d'un déphasage

Il existait des appareils dédiés à une époque (phasemètres) mais les oscilloscopes numériques et leurs fonctions de mesures automatiques les remplacent avantageusement maintenant. Le déphasage entre deux signaux peut être obtenu avec le montage de principe suivant :



Les signaux sont mis en forme par des comparateurs en tout ou rien qui sortent un signal carré $0/{+U}$ synchrone des tensions U_1, U_2.

Les ddp V_1 et V_2 sont appliquées aux entrées d'un OU EXCLUSIF → La tension de sortie V_3 est donc à + U *lorsqu'une seule des ddp des deux entrées est à un niveau + U* et elle est à 0 dans les autres cas.



On obtient la valeur moyenne de la ddp V_3 en sortie du filtre passe-bas RC. Si t correspond au décalage temporel entre les deux signaux de période T, on montre facilement que sa valeur est une fonction linéaire du déphasage entre les tensions U_1, U_2 :

$$V_S = 2 \times \frac{1}{T}\int_0^t U\,dt = 2U\frac{t}{T} \qquad \rightarrow \qquad \varphi = 2\pi\frac{t}{T} = 2\pi\frac{V_S}{2U}$$