

## Pratique de la Mesure

# LES MULTIMETRES NUMERIQUES

Le principe des multimètres numériques est évidemment très différent de celui des appareils à aiguille. Dans ces derniers, la déviation est obtenue par effet magnétique d'un courant « emprunté » au circuit sous mesure. Ceci détermine une bonne partie des inconvénients de l'appareil, à savoir la consommation d'une puissance électrique perturbant l'appareil sous test.

Par contre, les multimètres sont construits autour d'un circuit électronique particulier, assurant la conversion d'une tension en sa valeur numérique : il s'agit d'un convertisseur Analogique/Digital ou Analogique/Numérique (A/D ou A/N). Une différence essentielle apparaît donc déjà entre les deux types d'appareils : toute grandeur à mesurer doit être convertie en INTENSITE dans le cadre du contrôleur à aiguille ; au contraire, elle doit être convertie en TENSION pour attaquer le convertisseur A/D de l'appareil à affichage numérique.

Si le principe de fonctionnement du cadre mobile est élémentaire, celui du convertisseur A/D l'est beaucoup moins. Nous allons passer en revue les procédés les plus courants pour assurer cette fonction.

### I - Principe des multimètres numériques

#### 1. Conversion tension/fréquence

Se reporter à la figure 1. C'est évidemment la technique la plus simple. Un oscillateur est construit de manière que la fréquence délivrée soit proportionnelle à la tension d'entrée  $V_x$ . On a donc :

$$F_s = k \cdot V_x$$

Un fréquencemètre mesure cette fréquence et affiche le résultat de la mesure. Les éléments du système sont calculés pour obtenir la vraie valeur à l'affichage avec positionnement correct du point décimal.

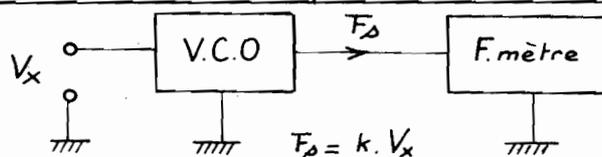


Fig. 1. - Un V.C.O. (Voltage Controlled Oscillateur) fournit une fréquence proportionnelle à  $V_x$ .

Le système est très simple à comprendre et à réaliser. Il présente cependant un certain nombre d'inconvénients :

- Il est très difficile d'obtenir une réponse parfaitement linéaire de l'oscillateur. Le coefficient  $k$  de la formule ci-dessus est susceptible de variations dans la fourchette des valeurs admissibles à l'entrée.

- On sait combien il est difficile de réaliser un oscillateur stable ! Ici, cet oscillateur doit être à la fois variable, pour suivre les variations de  $V_x$ , et stable, pour ne pas dériver si  $V_x$  reste constant. Ce n'est pas facile à obtenir ! La précision du convertisseur en dépend cependant.

- Le montage n'accepte que les tensions d'entrée d'une polarité donnée. On ne peut donc mesurer les polarités contraires qu'en prévoyant un circuit de commutation, soit manuel, soit automatique.

Malgré ces inconvénients, le procédé ci-dessus permet la réalisation de

convertisseurs A/D simples... si l'on dispose du fréquencemètre !

C'est ce que nous avons fait, par exemple, pour le TFX3 et ses adaptateurs (n° 1670) ou, plus récemment, pour notre nouvel émetteur de radio-commande (n° 1698). Les résultats obtenus sont tout à fait satisfaisants !

#### 2. Conversion simple rampe

Ce système utilise la technique du double comparateur permettant de situer la tension à mesurer par rapport à une rampe de tension couvrant tout le calibre envisagé (voir fig. 2 et 3).

Cette rampe de tension aussi linéaire que possible est fabriquée par le convertisseur lui-même et appliquée aux entrées du comparateur recevant, par ailleurs, l'un la tension à mesurer  $V_x$  et l'autre le potentiel zéro !

A l'instant  $t_1$ , la rampe démarre : on a  $V_r > V_x$ . A l'instant  $t_2$ , soit en A,  $V_r = V_x$ , et le comparateur I bascule, entraînant l'ouverture de la porte du compteur. Celui-ci commence à dénombrer les impulsions d'horloge. A l'instant  $t_3$ , point B, la tension  $V_r$  de

rampe est nulle et le comparateur II bascule à son tour, entraînant la fermeture de la porte. Le compteur s'arrête et affiche le résultat de la mesure n.

La pente de la rampe étant constante, on voit que dans le triangle rectangle ABC, on a :  $\cotg a = BC/AC = (t_3 - t_2)/V_x$  soit

$t_3 - t_2 = k V_x \cotg a$  ce qui montre que le nombre n compté pendant  $t_3 - t_2$  est bien proportionnel à  $V_x$ . L'affichage de la polarité est obtenu par un circuit annexe qui indique + ou - selon que le premier basculement est celui correspondant à I ou à II.

Le procédé de la simple rampe a l'avantage de la simplicité. Il peut très facilement se réaliser en composants discrets. Ses performances dépendent cependant :

- de la linéarité de la rampe,
- de la stabilité de l'oscillateur d'horloge,
- de la qualité des comparateurs.

Ces considérations ont amené les fabricants de circuits intégrés spécialisés à utiliser des techniques un peu plus élaborées, permettant de réduire les causes d'imprécision. Ce sont ces techniques que nous allons voir maintenant.

### 3. Convertisseur à double rampe (voir fig. 4 et 5)

La tension à mesurer est appliquée en  $V_x$  tandis qu'une double tension de référence symétrique est appliquée en  $+V_r$  et  $-V_r$ , ceci permettant de mesurer les tensions positives et négatives.

A l'instant  $t_1$ , la porte analogique PL1 est ouverte alors que les portes PL2 et PL3 sont fermées. Dans l'intégrateur, le condensateur C se charge à travers R. L'intensité de charge est très voisine de  $I_{ch} = V_x/R$ . Cette charge dure un temps constant, correspondant à un nombre

précis d'impulsions d'horloge. Elle s'achève à l'instant  $T_2$ . Pendant  $T_2 - T_1$ , le condensateur C a acquis une charge  $Q_{ch} = I t = (V_x/R)(T_2 - T_1)$ .

Notons que l'intégrateur fournit sur sa sortie une rampe montante ou descendante, selon que  $V_x$  est positive ou négative. La pente de cette rampe dépend de la valeur de  $V_x$  et son extrémité, à  $t_2$ , est donc à un niveau dépendant lui aussi de  $V_x$ .

A l'instant  $t_2$ , PL1 se ferme et l'une des portes PL2 ou PL3 s'ouvre, selon l'ordre donné par le détecteur de polarité qui a déterminé si la rampe était positive ou négative. Le

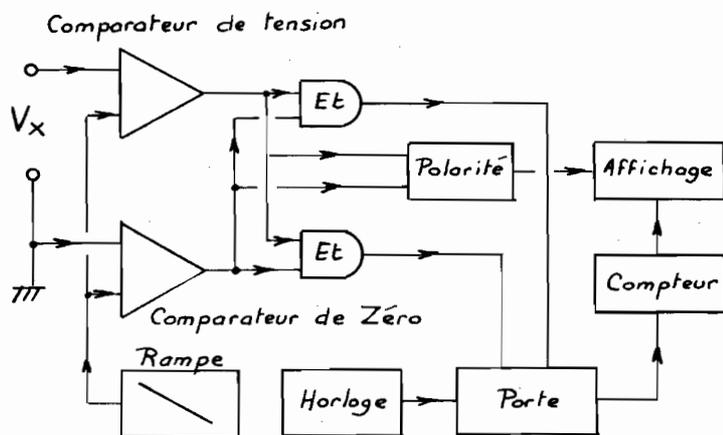


Fig. 2. - Convertisseur A/D simple rampe.

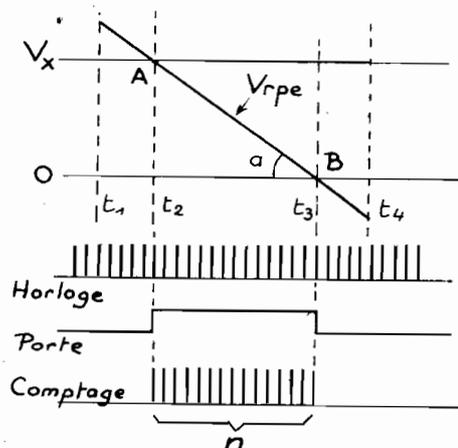


Fig. 3. - Signaux « simple rampe ».

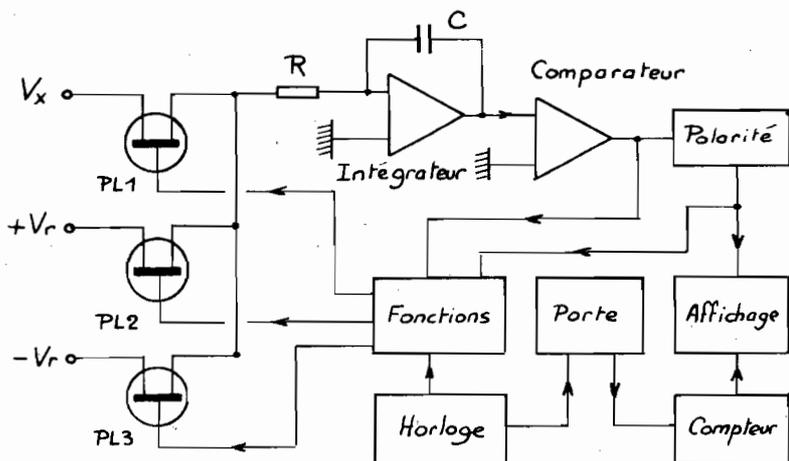


Fig. 4. - Convertisseur double rampe.

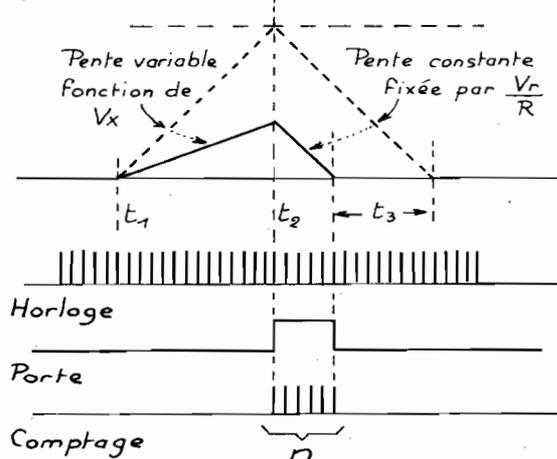


Fig. 5. - Signaux « double rampe ».

## INITIATION

condensateur C va donc maintenant se décharger par l'intermédiaire de cette tension de référence, à travers la même résistance R. On a :  $I_{déch} = V_r/R$ .

Quand la tension du condensateur passe par 0, le comparateur bascule et stoppe la décharge à l'instant  $t_3$ . On a ainsi :

$$Q_{déch} = I t = (V_r/R) (T_3 - T_2).$$

Comme le condensateur C est alors ramené dans l'état initial, on peut écrire :  $Q_{ch} = Q_{déch}$

$$(V_x/R)(t_2 - t_1) = (V_r/R)(t_3 - t_2)$$

$$d'où : t_3 - t_2 = V_x \cdot (t_2 - t_1)/V_r.$$

Nous savons que  $t_2 - t_1$  est constant, car prédéterminé par les éléments de comptage. La tension de référence est aussi constante. La mesure de  $t_3 - t_2$  est donc elle de  $V_x$ . Pour cela, les impulsions d'horloge sont dénombrées pen-

dant cet intervalle de temps par le compteur interne, donnant le résultat à afficher « n » !

Le gros avantage du système est que la précision de la mesure ne dépend plus :

- de la fréquence de l'horloge. En effet si celle-ci dérive, elle joue de la même manière sur les durées  $t_3 - t_2$  et  $t_2 - t_1$ , et par conséquent ne change pas le résultat n ;

- de la valeur de composants R et C dont l'action se répercute aussi sur la rampe de charge et sur celle de décharge, ne modifiant pas non plus le nombre n mesuré par le compteur.

La technique de la double rampe est très utilisée par les fabricants de circuits de voltmètre. Elle est en particulier retenue par la firme Intersil pour ses circuits ICL7106, ICL7107,

ICL7135... Toutefois, quelques perfectionnements ont été ajoutés au schéma d'étude proposé figure 4.

- Tout d'abord, un système de commutateur-inverseur interne a permis de s'affranchir de la double référence. Une seule suffit alors, aussi bien pour les tensions positives que négatives.

- Un système d'auto-zéro a été ajouté de manière que le convertisseur indique bien 0 lorsque la tension d'entrée est nulle. Pour assurer le fonctionnement de cette correction, une phase supplémentaire a été ajoutée. Elle précède la phase d'intégration de la tension  $V_x$  et dure le même temps que celle-ci : 10 000 impulsions d'horloge, pour les « 20 000 points », 1 000 seulement pour les « 2 000 points » (voir fig. 6).

Dans ces circuits très

spécialisés, la source de référence est souvent intégrée, ce qui fait que leur mise en œuvre se limite à l'ajout de quelques composants. La précision obtenue est de l'ordre de 0,1 %.

### 4. Convertisseur à balance de charge

Le principe en est donné figure 7.

Un comparateur reçoit sur ses entrées la tension à mesurer  $V_x$  et celle existant aux bornes du condensateur C.

- Si  $V_x > V_c$ , le comparateur fait basculer le bistable de manière que C se charge à travers R, via la porte PL1 qui s'ouvre, par la tension de référence positive  $+V_r$ . D'autre part, le bistable met le compteur-décompteur en fonction de comptage.

- Si  $V_x < V_c$ , le phénomène inverse se produit : C se décharge à travers R et PL2 par  $-V_r$ . Le compteur-décompteur est en fonction de décomptage.

On voit tout de suite que le système tend à mettre  $V_x$  et  $V_c$  à égalité et que l'on peut admettre que la valeur moyenne de  $V_c$  est égale à  $V_x$ .

Les basculements du bistable sont toutefois déclenchés par le signal d'horloge appliqué à l'entrée « clock », ce qui fait que, dans le maintien de l'équilibre, le condensateur C est alimenté au rythme de l'horloge par des impulsions de valeur de crête égale à  $V_r$ , ces impulsions étant comptabilisées par le compteur-décompteur qui reçoit sur son entrée les mêmes signaux d'horloge.

Un temps de mesure est caractérisé par un nombre bien défini de ces signaux d'horloge. Soit N ce nombre, déterminé par d'autres

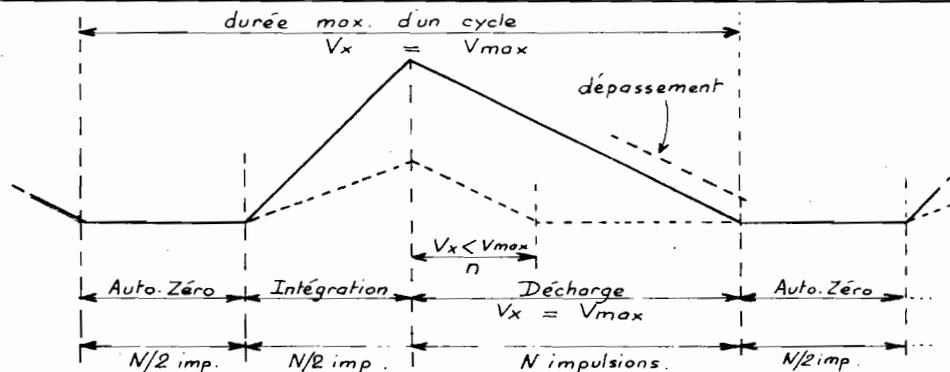


Fig. 6. - Double rampe avec phase d'auto-zéro.  
N = 2 000 ou 20 000 (2 000 ou 20 000 points).

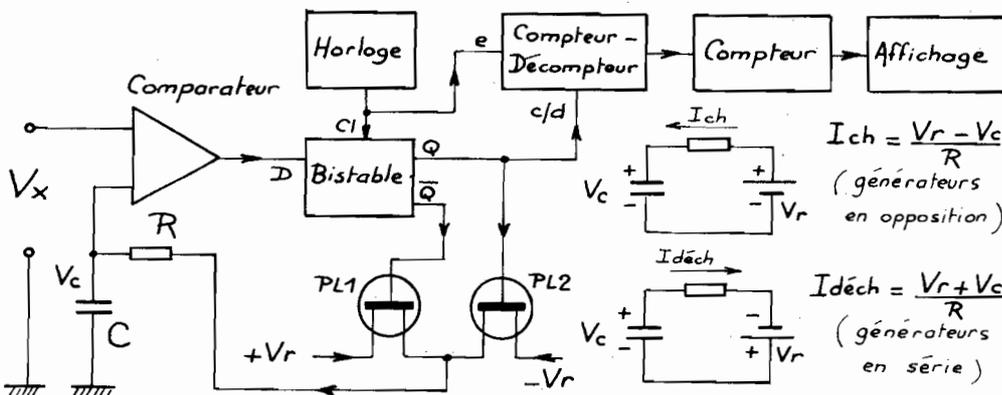


Fig. 7. - Convertisseur A/D à balance de charge.

circuits de comptage, non représentés sur la figure. Si T est la durée d'une impulsion, la durée de la mesure est N T.

Pendant ce temps, C, dans le maintien de l'équilibre, a subi des charges et décharges successives : soit n le nombre d'impulsions de charge. Le nombre d'impulsions de décharge est alors (N - n).

La charge totale acquise par C est :  $Q_{ch} = I t$   
 $= (V_r - V_c) / R \cdot n T$   
 (voir annexes de la figure 7).

La décharge, pendant le même temps, est  
 $Q_{dch} = I t$

$$= (V_r + V_c) / R \cdot (N - n) \cdot T.$$

Si l'on suppose l'équilibre maintenu pendant toute la séquence ( $V_x = V_c$ ), la tension  $V_c$  ne varie pas en valeur moyenne et la charge équilibre la décharge

$$Q_{ch} = Q_{dch}$$

$$(V_r - V_c) / R \cdot n T$$

$$= (V_r + V_c) / R \cdot (N - n) T$$

ce qui donne, après simplification par R et par T :

$$(V_r - V_c) n$$

$$= (V_r + V_c) (N - n), \text{ soit}$$

$$V_r n - V_c n$$

$$= V_r N + V_c N - V_r n - V_c n$$

$$2 V_r n - V_r N = V_c N$$

$$V_r (2n - N) = V_c N$$

d'où l'on tire, sachant que  $V_x = V_c$  :

$$V_x = (V_r / N) (2n - N) \text{ ou}$$

$$V_x = (V_r / N) (n - (N - n))$$

résultat très intéressant puisque n est le nombre d'impulsions de charge et (N - n) le nombre d'impulsions de décharge. Les unes sont comptées et les autres décomptées, la différence étant par conséquent l'indication finale du compteur-décompteur ! Ce dernier donne donc bien une mesure de  $V_x$ , puisque  $V_r$  et N sont des constantes du système.

Bien entendu, comme dans le procédé à double rampe, il faut que la ten-

sion  $V_r$  de référence soit particulièrement stable pour une bonne précision. Le facteur N est donné par la structure d'un compteur et est donc constant.

On remarque par ailleurs que T s'est éliminé du calcul : la stabilité de l'horloge n'intervient donc pas. Enfin, on peut constater l'absence des valeurs R et C, ce qui prouve que ces composants peuvent être quelconques.

La technique du convertisseur à balance de charge a été utilisée par Philips dans ses circuits de voltmètre. Elle est également retenue par Siliconix pour ses convertisseurs, par exemple pour le LD130, utilisé dans le multimètre MX130 que nous avons décrit dans le Haut-Parleur, ainsi que dans le thermomètre numérique TCF1 ou TCF2, décrit dans les mêmes pages.

La précision des mesures donnée par cette autre technique est du même ordre que celle de la double rampe. Des circuits d'auto-zéro peuvent aussi être ajoutés.

Quelle que soit la technologie choisie pour la réalisation du convertisseur, ce dernier présente généralement les caractéristiques suivantes :

— **Nombre de points de mesure :**

● 2 000 points pour les appareils les plus classiques.

● 20 000 points pour les plus performants, restant abordables.

● Quelques appareils mesurent en 3 000 ou 4 000 points.

Bien évidemment, la précision du convertisseur est liée à ce nombre de points, puisque ces montages assurent en général des mesures à 1 point près !

— **Très haute impédance**

d'entrée. Le convertisseur A/D est finalement un voltmètre, mais c'est un très bon voltmètre. Son entrée de mesure est toujours associée à des circuits à très haute impédance : de l'ordre de plusieurs milliers de mégohms. Directement utilisés, ils apportent donc au circuit sous test une charge parasite, pratiquement nulle ! Malheureusement, il est souvent impossible de les utiliser dans ces conditions, ce qui compromet leurs performances. Nous verrons cela un peu plus loin.

— **Mesure des tensions positives et négatives**, avec indication de la polarité. Cela est très utile, évitant les inversions de fils, mais aussi permettant de garder le point froid de l'entrée à la masse, ce qui réduit fortement les risques de perturbations parasites extérieures, par exemple les inductions du secteur.

— **Le zéro automatique**, nous l'avons vu ! Ceci supprime tout réglage à ce niveau, assorti des inévitables retouches par dérives diverses.

— **Indication du dépassement de capacité**, par divers moyens visuels ou sonores. L'appareil est protégé contre les dépassements excessifs et, de ce fait, ne risque absolument rien, ce qui n'est pas le cas des appareils à aiguille.

L'appareil de mesure numérique semble donc être la panacée universelle, dans ce domaine du moins ! De fait, depuis quelques années, il remplace de plus en plus le traditionnel appareil à aiguille, lequel semble inexorablement voué à prendre place au musée des antiquités ! Les caractéristiques générales de ces appareils sont en effet suffisamment per-

suasives pour expliquer leur succès.

En tout premier lieu, on peut signaler la **plus grande facilité de lecture** : l'affichage en clair du résultat, avec la virgule positionnée, voire l'unité elle-même affichée, c'est tout de même autre chose. Souvent, avec son concurrent à aiguille, la lecture s'avère difficile. Le cadran est encombré de plusieurs échelles, entre lesquelles il faut choisir. Puis il faut se livrer au casse-tête de l'interprétation du résultat ! Si c'est parfois simple, c'est tout juste, dans d'autres cas, s'il ne faut pas sortir le papier et le crayon !

Nous pensons en particulier au 819 de Centrad, dont les graduations valent tantôt 5 unités et tantôt 4, ce qui est bien gênant !

En second lieu, il y a la **précision**. Alors que les appareils à aiguille ne font guère mieux que 3 %, un bon multimètre atteint 0,5 % sur certaines gammes ! Une telle précision n'est pas toujours utile, mais c'est tout de même un argument convaincant !

Mais nous avons abandonné notre bon convertisseur A/D, et il faut y revenir. En effet, ce montage, essentiel dans un multimètre numérique, ne se suffit pas à lui seul ! Il faut lui adjoindre des interfaces, permettant de le transformer en voltmètre à plusieurs calibres, en ampèremètre, ohmmètre... et c'est ce que nous verrons dans notre prochain numéro. (A suivre.)

F. THOBOIS