

Principe de quelques voltmètres numériques

« DIGITAL VOLTMETER »

par Alain MATHIEU,
Lycée Condorcet.

L'évolution des technologies a complètement modifié la conception des instruments de mesures.

En particulier, les multimètres numériques ont, en raison de leur précision et de leur commodité d'emploi, généralement supplanté les multimètres analogiques. De plus, intégrés dans une chaîne de mesures automatiques, ils peuvent être programmés et commandés extérieurement, les résultats peuvent être utilisés ou mémorisés dans tous les systèmes logiques (commande numérique, ordinateur, calculateur, tables traçantes, etc.). Les choix des calibres et de la polarité étant souvent automatiques, les protections efficaces, leur utilisation est fortement simplifiée.

Les mesures de tensions en courant continu peuvent utiliser :

- des voltmètres analogiques dont l'élément final de la chaîne de mesure est un transducteur électromécanique, la lecture s'effectuant par déplacement mécanique d'un repère (aiguille, ruban, stylet, spot lumineux...); la précision de ces appareils dépasse rarement 0,1 % (10^{-3}),
- des méthodes d'opposition (ou de zéro) comparant la tension à mesurer à des tensions de référence, la précision peut être excellente jusqu'à 10^{-7} ,
- des voltmètres numériques, la lecture s'effectuant souvent directement sous forme de chiffres affichés, le résultat pouvant aussi être transmis à une table traçante, à un ordinateur, etc. La précision peut dépasser 10^{-5} .

Nous nous proposons d'étudier le principe de quelques voltmètres numériques, sans entrer dans les détails des circuits électroniques, des commandes logiques et de l'affichage.

Après quelques généralités et définitions, nous analyserons les différents types de convertisseurs analogiques-numériques et nous aborderons rapidement d'autres méthodes.

Les spécifications les plus importantes de ces voltmètres étant précisées, nous comparerons les voltmètres analogiques et les voltmètres numériques.

Les appareils dérivés des voltmètres numériques (ampèremètres, ohmmètres) et les voltmètres mesurant des tensions en courant variable (alternatif...) ne seront pas abordés, sachant qu'ils utilisent les précédents, la grandeur étudiée étant transformée dans la chaîne de mesure en tension continue (comme dans les appareils analogiques ; redresseurs, amplificateurs, shunts, transformateurs, etc.), laquelle est mesurée par un voltmètre numérique.

1) GENERALITES.

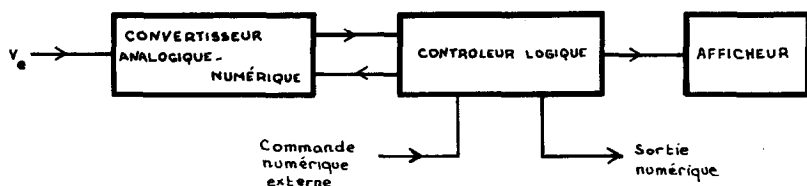
1.1. Schéma de principe des voltmètres numériques.

La tension à mesurer V_e doit être constante (courant continu), les parasites (bruits) qui lui sont superposés doivent être réduits (filtres).

V_e est traitée par un convertisseur analogique-numérique, piloté par un contrôleur logique qui commande l'affichage de la valeur mesurée.

Cet affichage peut être lumineux (diodes électroluminescentes, tubes à décharge...), à cristaux liquides ou mécanique.

Le contrôleur logique peut être commandé extérieurement (numérique) et le résultat de la mesure peut être traité par d'autres systèmes (ordinateur, commande numérique...).

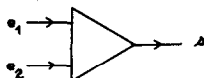


1.2. Définitions.

Grandeur analogique : elle présente une infinité d'états possibles (continue).

Grandeur numérique : elle présente un nombre fini d'états possibles (discontinue, quantifiée).

Comparateur : il comporte deux entrées e_1 et e_2 et une sortie s :



si $e_1 > e_2$ alors s est à 1,

si $e_1 < e_2$ alors s est à 0,

(1 et 0 logiques : c'est-à-dire deux tensions différentes).

Exemple : amplificateur opérationnel utilisé en comparateur :

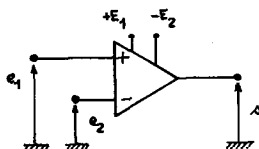


Schéma électronique

e_2 est fixe,

e_1 est variable (analogique),

s est numérique.

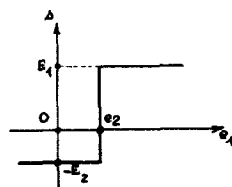
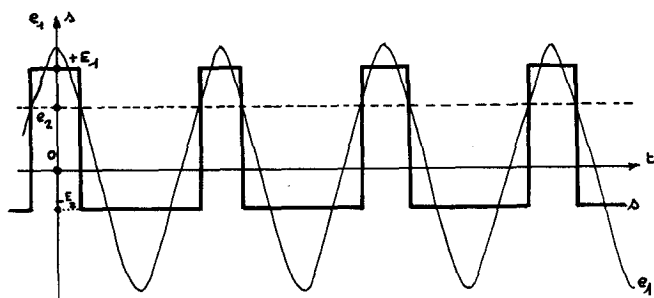


Schéma de transfert

Cas particulier :

$$e_1 = e \cos \omega t,$$

$$e > e_2.$$

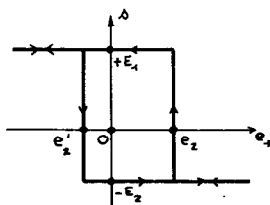


Amélioration : comparateur à hystérésis.

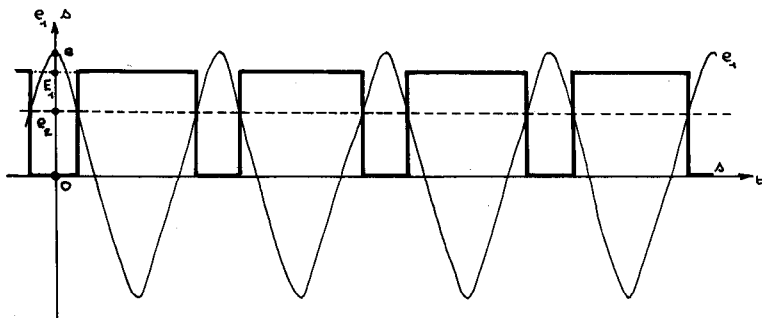
Des fluctuations de e_1 autour de e_2 peuvent rendre instable le comparateur simple. Pour éviter cet inconvénient, on utilise des comparateurs à hystérésis : e_2 et e'_2 sont des constantes,

pour e_1 croissant si $e_1 < e_2 \rightarrow s = E_1$
 si $e_1 > e_2 \rightarrow s = -E_2$

pour e_1 décroissant si $e_1 > e'_2 \rightarrow s = -E_2$
 si $e_1 < e'_2 \rightarrow s = E_1$.

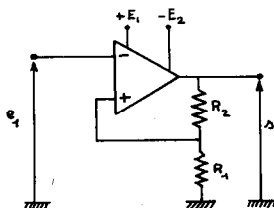


Exemple : reprenons le cas où $e_1 = e \cos \omega t$ avec $e_2 > 0$, $e'_2 = 0$, $E_2 = 0$.



Remarque :

Les comparateurs à hystérésis peuvent être réalisés par des circuits logiques ou des circuits électroniques. Ci-dessous est présenté un comparateur à hystérésis réalisé à l'aide d'un amplificateur opérationnel alimenté par des tensions E_1 , $-E_2$ dissymétriques, avec réaction positive (fonctionnement à saturation).



On montre facilement que ce circuit fonctionne bien en comparateur à hystérésis avec :

$$e_2 = E_1 \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

et :

$$e'_2 = -E_2 \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

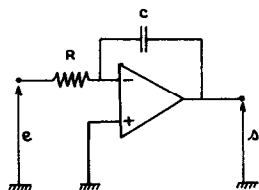
Intégrateur.

Entrée : e fonction du temps, sortie : $s = k \int_{t_0}^t e \, dt + s(t_0)$

k étant une constante et $s(t_0)$ la condition initiale sur s .

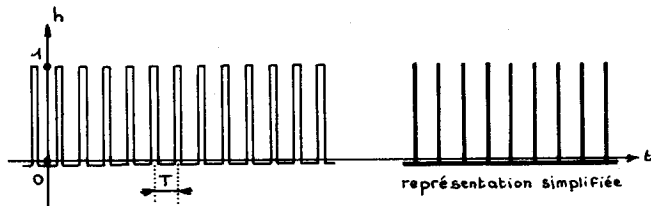
Exemple : amplificateur opérationnel utilisé en intégrateur.

$$s = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t e \, dt + s(t_0).$$

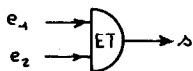


Horloge logique : c'est une source d'impulsions périodiques (numériques) à fréquence élevée (ex. : 120 Hz).

Elle est pilotée par un oscillateur à quartz et permet de commander des circuits logiques (sortie à 1 ou 0).



Porte logique « ET » : la sortie est à $s = 1$ si les deux entrées sont à 1 ($e_1 = 1, e_2 = 1$), sinon $s = 0$,

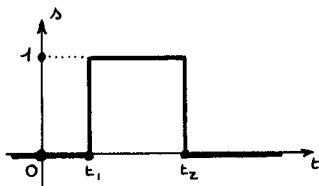
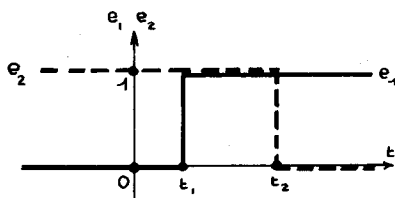


si $e_1 = 1$ et $e_2 = 1$ alors $s = 1$

si $e_1 = 0$ et $e_2 = 0$ ou 1 alors $s = 0$

si $e_2 = 0$ et $e_1 = 0$ ou 1 alors $s = 0$.

Exemple : e_1 échelon unité ($0 \rightarrow 1$) et e_2 échelon unité ($1 \rightarrow 0$).



Compteur : il reçoit des impulsions logiques, les compte, stocke leur nombre dans des registres (mémoires), commande à l'afficheur d'afficher ces nombres (ou des grandeurs proportionnelles à ces nombres).

La durée du comptage peut être imposée par une porte logique.

Une remise à zéro (RAZ) du compteur ou des registres est souvent nécessaire (fin de comptage).

Exemple : affichage de la durée d'un créneau e_2 (e_1 : impulsions d'horloge).

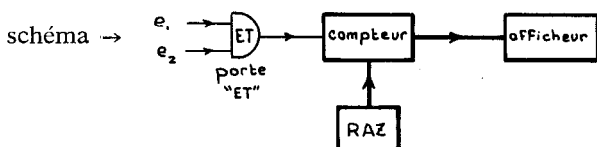
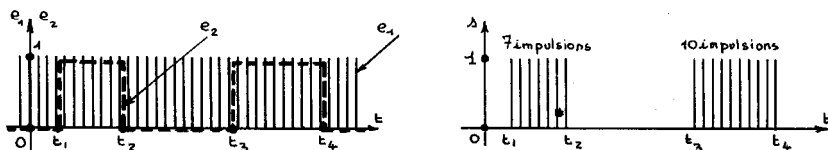


Diagramme des tensions :



Dans des registres du compteur seront stockés les nombres d'impulsions 7 et 10 (000111 et 001010 en binaire). Ces nombres pourront par exemple être affichés.

Cadenceur de mesure : il assure le renouvellement des différents cycles (mesures, affichages...), des opérations logiques, des remises à zéro, etc.

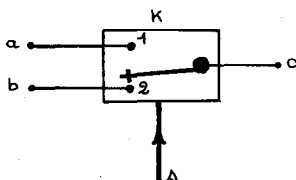
Convertisseur analogique-numérique : il transforme des grandeurs analogiques en grandeurs numériques (ex. : comparateur), il est noté « C.A.N. ».

Convertisseur numérique-analogique : il transforme des grandeurs numériques en grandeurs analogiques, il est noté « C.N.A. ».

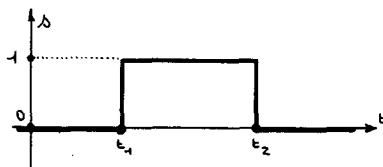
Contrôleur logique : il assure toutes les opérations logiques d'un système. Il est constitué de portes logiques, de l'horloge, du cadenceur, du compteur, de mémoires, de calculateurs... Il est noté « C.L. ».

Interrupteur électronique « K », à deux ou plusieurs positions. Son passage d'un état à un autre est commandé par un circuit logique.

Exemple : interrupteur à 2 positions (1 et 2) commandé par la tension numérique s : si $s = 0$: K en position 1, si $s \neq 0$ ($s = 1$) alors K en position 2.



a , b et c sont des circuits analogiques, s est un circuit logique.



Dans le cas particulier ci-dessus, on a :

- de t_1 à t_2 : K est en position 2,
- pour $t < t_1$ et $t > t_2$: K est en position 1.

1.3. Nature de la valeur affichée.

Il existe deux méthodes d'affichage :

* sans intégration : c'est la valeur instantanée donnée par chaque mesure qui est affichée, c'est le cas des appareils simples ou à cadence de mesure élevée ;

* avec intégration : c'est la valeur moyenne sur une série de mesures qui est affichée, c'est le cas des appareils de laboratoire ou à cadence lente (10 ms à 10 s soit 10 à 10 000 mesures).

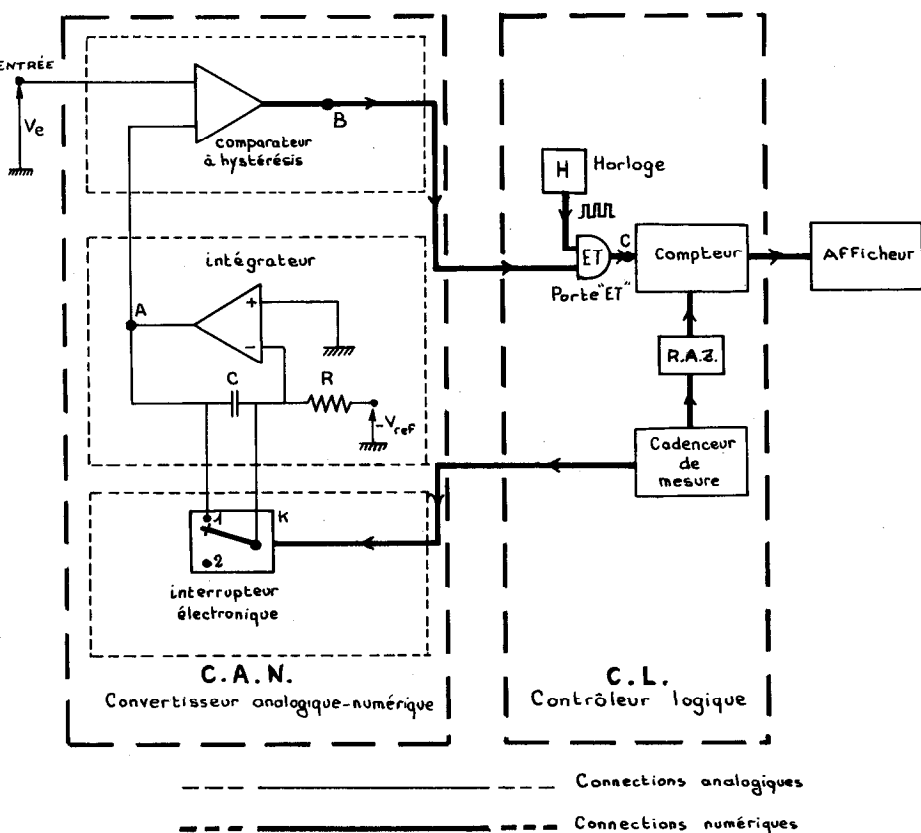
II) DIFFERENTS TYPES DE CONVERTISSEURS ANALOGIQUES-NUMERIQUES.

Ils sont aussi appelés convertisseurs à rampe analogique.

II.1. Convertisseurs à simple rampe.

Une rampe de tension (kt) est générée par un intégrateur. On mesure le temps t_e pour que cette rampe atteigne la valeur à mesurer : V_e . On a alors $V_e = kt_e$.

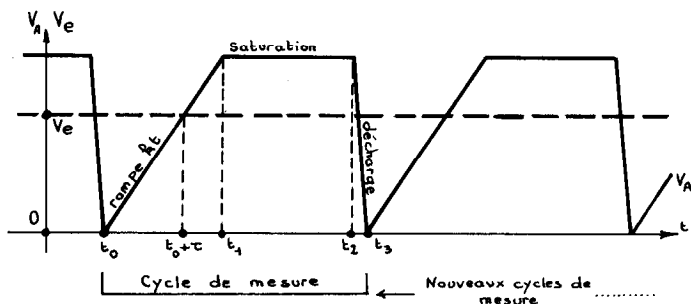
a) SCHÉMA DE PRINCIPE.



b) DIAGRAMME DES TENSIONS.

* Tension à la sortie de l'intégrateur : V_A .

La tension constante — V_{ref} (référence) est intégrée (à partir d'une condition initiale $V_A(t_0)$ nulle) de t_0 à t_1 , de t_1 à t_2 il y a saturation de l'intégrateur, de t_2 à t_3 décharge brutale du condensateur C (court-circuit).



* Signaux de commande de la porte ET :

→ V_B : sortie du comparateur à hystérésis. Le comparateur a comme tension de basculement 0^+ et V_e et une sortie à 0 et E.

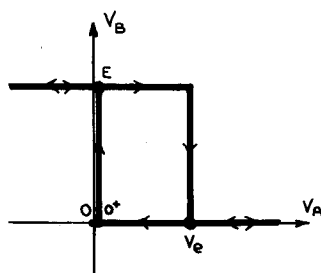


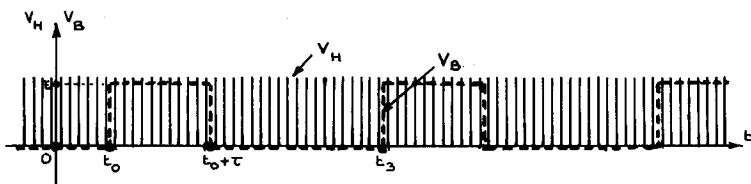
Schéma de transfert :

donc pour $t \in (t_0, t_0 + \tau)$, on a $V_B = E$

pour $t \notin (t_0, t_0 + \tau)$, on a $V_B = 0$

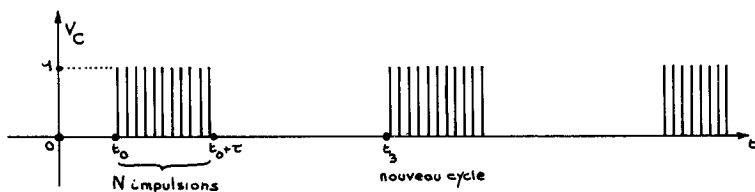
et cela pour un cycle de mesure.

→ V_H : sortie horloge : impulsions (période T) :



* *Entrée du compteur V_c :*

La porte logique ET ne donnera des impulsions au compteur que pendant l'intervalle de temps $t_0, t_0 + \tau$.



c) ANALYSE.

* à t_0 : le circuit de cadencement met le compteur à zéro (RAZ), fait passer l'interrupteur K de 1 à 2 (décourt-circuite le condensateur); on a alors $V_A = 0$. Comme $V_A = 0$ est inférieur à 0^+ , le comparateur est dans l'état $V_B = E$. La porte ET est donc débloquée pour le comptage : les impulsions d'horloge sont envoyées sur le compteur, leur nombre est stocké dans un registre R.

* de t_0 à $t_0 + \tau$: l'interrupteur est en position 2, l'intégrateur fonctionne et intègre $-V_{ref}$,

$$\text{soit : } V_A = 0 + \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t V_{ref} dt = \frac{t - t_0}{RC} \times V_{ref}.$$

Tant que V_A est inférieur à V_e , le comparateur est dans l'état $V_B = E$ (V_A croissant). La porte ET est ouverte et le nombre d'impulsions d'horloge est stocké dans le registre R.

* A $t_0 + \tau$: on a $V_A = V_e = V_{ref} \tau / RC$. Le comparateur bascule dans l'état $V_B = 0$, la porte ET se bloque et ne laissera plus passer les impulsions d'horloge vers le compteur. A cet instant, dans le registre R est stocké le nombre N d'impulsions comptées

$$\text{pendant } \tau, \text{ soit } \tau = NT. \text{ On a alors : } V_e = V_{ref} \frac{NT}{RC}.$$

* De $t_0 + \tau$ à t_1 : on a $V_A = V_{ref} \frac{t - t_0}{RC} > V_e$ et croissant, le

comparateur reste dans l'état $V_B = 0$, la porte ET est bloquée, le comptage stoppé et le nombre N du registre R reste constant.

* A t_1 : l'intégrateur se sature à $V_{A \max}$.

* De t_1 à t_2 : l'intégrateur est saturé à $V_{A \max}$, aucune modification du comparateur, de la porte et du registre.

* A t_2 : le circuit de cadencement met l'interrupteur K en position 1 (fermé), le condensateur C se décharge très rapidement de t_2 à t_3 . La tension V_A passe de $V_{A\max}$ à 0. Lorsque $V_A = 0$, le comparateur bascule dans l'état $V_B = E$ (instant t_3). La porte ET se débloque.

* A t_3 : on se retrouve dans le même état qu'à t_0 .

* Le cycle peut recommencer. C'est le cadenceur qui commande par les instants t_2 et t_3 la périodicité des mesures.

Nous avons ainsi $V_e = V_{ref} \frac{NT}{RC}$ soit $V_e = k N$ (k constante).

N étant le nombre (stocké dans le registre R) d'impulsions comptées.

A la constante k près, N est affiché, exprimant V_e en volts.

d) PERFORMANCES DE CES VOLTMÈTRES.

Pour que les performances soient bonnes, il faut que la rampe : $V_A = V_{ref} \frac{t - t_0}{RC}$ soit stable et linéaire et que la fréquence de l'horloge soit stable.

Généralement R, C, V_{ref} mais surtout T ont une mauvaise stabilité, la précision est donc médiocre (de l'ordre de 1 % à 0,05 %).

Ces voltmètres ont une faible réjection en mode commun, des bruits importants se superposent à la tension à mesurer V_e . Ces bruits doivent être filtrés, ce qui augmente fortement le temps de réponse de l'appareil.

Pour ces raisons, ces voltmètres sont maintenant moins utilisés, sauf à des forts niveaux (supérieurs à 1 ou 10 V) dans des indicateurs numériques de tableaux, où ces limitations ne sont pas des critères fondamentaux de choix.

Le cadencement de ces appareils (temps de mesure) est de l'ordre de 0,1 s donc assez lent.

e) REMARQUE : il existe d'autres types de convertisseurs simple rampe, dont le principe est comparable à celui décrit précédemment, mais dont la logique est légèrement différente. Par exemple, les convertisseurs simple rampe à deux comparateurs ou à interrupteur basculant à l'instant $t_0 + \tau$ (instant où $V_A = V_e$).

11.2. Convertisseurs à double rampe.

Pour améliorer la précision du convertisseur à simple rampe, on cherche à s'affranchir des grandeurs de référence R, C (pour l'intégration), T (pour le comptage).

Pour cela, on intègre la tension à mesurer V_e dans l'intégrateur :

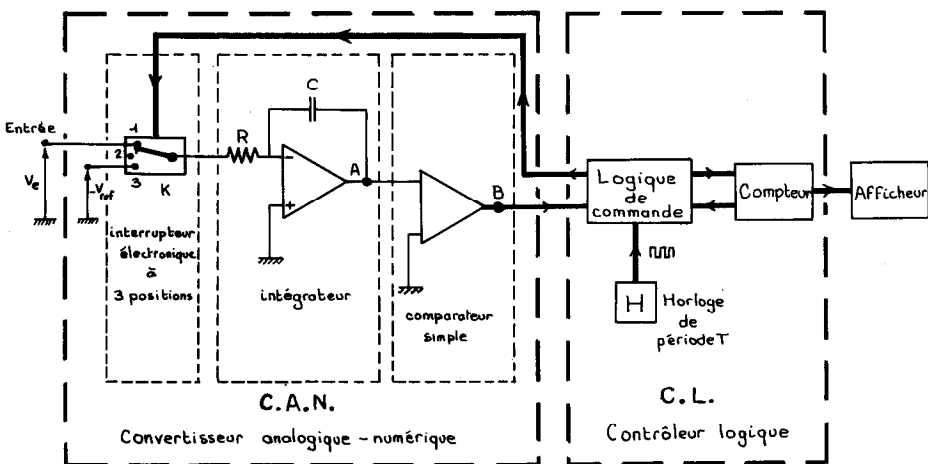
$$\text{tenseur : } \frac{V_e t}{RC} \text{ et la tension de référence } V_{ref} \text{ dans le même intégrateur } \frac{V_{ref}}{RC} t.$$

On mesure les temps t_1 et t_2 pour que ces deux grandeurs atteignent une même valeur :

$$\frac{V_e t_1}{RC} = \frac{V_{ref} t_2}{RC} \quad \text{soit} \quad V_e = V_{ref} \frac{t_2}{t_1}.$$

Mais pour obtenir ces opérations, la logique de commande est plus complexe.

a) SCHÉMA DE PRINCIPE.

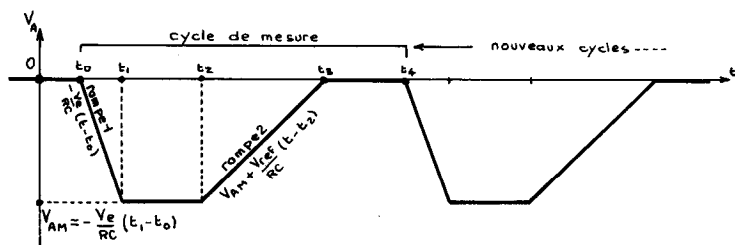


b) DIAGRAMME DES TENSIONS.

* Tension à la sortie de l'intégrateur : V_A .

La tension à mesurer V_e est intégrée de t_0 à t_1 (conditions initiale $V_A(t_0) = 0$). La tension de référence négative $-V_{ref}$ est inté-

grée de t_2 à t_3 (condition initiale $V_A(t_2) = V_A(t_1) = -V_e(t_1 - t_0)/RC$). A t_3 la nouvelle valeur de V_A s'annule.



* Tension à la sortie du comparateur : V_B .

Le comparateur a comme tension de basculement 0 et une tension de sortie à E ou 0.

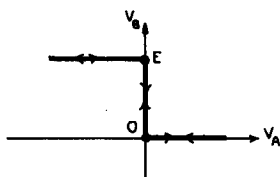
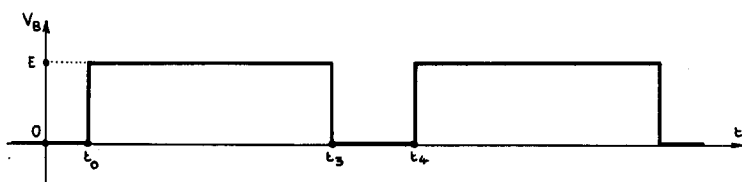


Schéma de transfert :

$$V_A \geq 0 \rightarrow V_B = 0$$

$$V_A < 0 \rightarrow V_B = E.$$



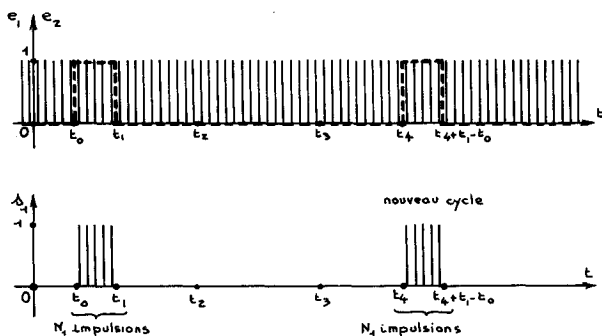
* Portes logiques internes à la logique de commande.

Porte P_1

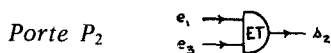


e_1 impulsions d'horloge

$e_2 \begin{cases} 1 \text{ si l'interrupteur K en 1} \\ 0 \text{ si K en 2 ou 3} \end{cases}$

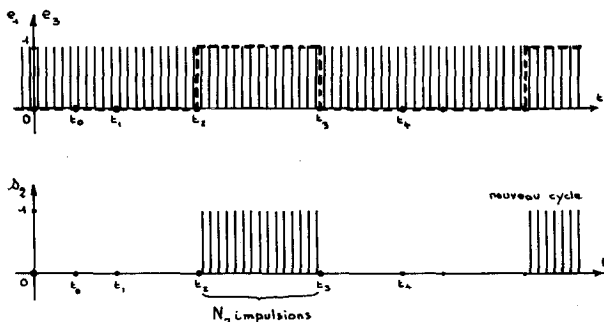


N_1 stocké sous forme binaire dans un registre R_1 du compteur.



e_1 impulsions d'horloge

$e_3 \begin{cases} 1 \text{ si } K \text{ est en } 3 \\ 0 \text{ si } K \text{ est en } 1 \text{ ou } 2. \end{cases}$



N_2 stocké sous forme binaire dans un registre R_2 du compteur.

c) ANALYSE.

* A t_0 la logique de commande met les registres de comptage à zéro, bascule l'interrupteur électronique K en position 1, le comparateur passe de 0 à E (car la tension V_A commence à devenir négative), la porte de comptage P_1 s'ouvre.

* De t_0 à t_1 : K en position 1, l'intégrateur intègre la tension V_e avec comme condition initiale à t_0 la valeur 0 soit

$V_A = -\frac{1}{RC} V_e (t - t_0)$, comme $V_A < 0$ le comparateur a toujours

sa sortie V_B à $+E$, la porte P_1 compte les impulsions d'horloge et le compteur stocke leur nombre dans un registre R_1 , la porte P_2 est bloquée.

* $A t_1$: la logique de commande bascule K de 1 sur 2, la porte P_1 se ferme, dans R_1 est stocké le nombre d'impulsions N_1 correspondant au temps $t_1 - t_0$ donc $N_1 = (t_1 - t_0)/T$ (T période des impulsions d'horloge), la porte P_2 est toujours bloquée, on a

$$V_A = V_{AM} = -\frac{V_e}{RC} (t_1 - t_0).$$

* $De t_1$ à t_2 : l'intégrateur ne fonctionne pas, donc $V_A = V_{AM}$, le comparateur reste à $V_B = E$. Les portes P_1 et P_2 restent bloquées, le compteur est remis à zéro, le registre R_1 n'est pas modifié (nombre N_1).

* $A t_2$: la logique de commande bascule K de la position 1 sur 2, la porte P_2 s'ouvre, la porte P_1 reste fermée, l'intégrateur commence à intégrer la tension $-V_{ref}$ avec la condition initiale V_{AM} .

* $De t_2$ à t_3 : K en position 3, l'intégrateur intègre $-V_{ref}$

$$\text{donc } V_A = -\frac{V_e}{RC} (t_1 - t_0) + \frac{V_{ref}}{RC} (t - t_2) \text{ le comparateur a}$$

toujours sa sortie $V_B = E$ (car $V_A < 0$). La porte de comptage P_1 est fermée. La porte P_2 est ouverte, le compteur compte les impulsions d'horloge et stocke leur nombre dans un second registre R_2 .

$$* A t_3 : V_A = -\frac{V_e}{RC} (t_1 - t_0) + \frac{V_{ref}}{RC} (t_3 - t_2) \text{ s'annule, donc}$$

le comparateur bascule en sortie à la valeur $V_B = 0$, imposant par la logique de commande à l'interrupteur K de passer de 3 à 2, alors la porte P_2 se bloque, dans le registre R_2 est alors stocké N_2 , nombre d'impulsions d'horloge de l'intervalle de temps $t_3 - t_2$ soit $N_2 = (t_3 - t_2)/T$.

* $De t_3$ à t_4 , K en position 2 : l'intégrateur ne fonctionne pas, $V_A = 0$, le comparateur est bloqué à $V_B = 0$, les portes P_1 et P_2 restent fermées, les nombres N_1 et N_2 des registres R_1 et R_2 peuvent être utilisés pour calculer et afficher la valeur de V_e .

* A t_4 la logique de commande met les registres à zéro, le compteur à zéro, bascule l'interrupteur de 2 en 1, on se retrouve ainsi dans le même état qu'à t_0 .

* Le cycle peut recommencer. C'est la logique de commande qui, par les instants t_1 , t_2 et t_4 , impose la durée d'un cycle de mesure.

Nous avons ainsi :

$$V_A(t_3) = -\frac{V_e}{RC}(t_1 - t_0) + \frac{V_{ref}}{RC}(t_3 - t_2) = 0$$

$$\text{donc : } V_e = V_{ref} \frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_0} \quad \text{d'où} \quad V_e = V_{ref} N_2/N_1.$$

Les nombres d'impulsions N_1 et N_2 étant stockés dans les registres R_1 et R_2 , un calculateur peut exprimer N_2/N_1 et afficher directement $V_{ref} N_2/N_1 = V_e$ en volts.

d) PERFORMANCES.

— Seule, la précision sur V_{ref} intervient. Les valeurs de R , C et T (à dérive lente) n'interviennent pas dans la mesure de V_e , à condition que pendant la durée de conversion ($t_4 - t_0 \simeq 10$ ms) leurs variations soient négligeables, ce qui est pratiquement toujours le cas.

— Les bruits superposés à la tension à mesurer sont intégrés avec elle, si leur valeur moyenne est nulle (cas très courant), leur intégrale sur l'intervalle $t_1 - t_0$ peut être très faible, la réjection est donc très grande. Si la période des bruits est un sous-multiple de $t_1 - t_0$ (souvent période du secteur) la réjection est infinie, c'est généralement dans ces conditions que l'on travaille pour éliminer les bruits.

— On atteint, sans difficulté, une bonne précision pour ces voltmètres : de l'ordre de 0,01 %.

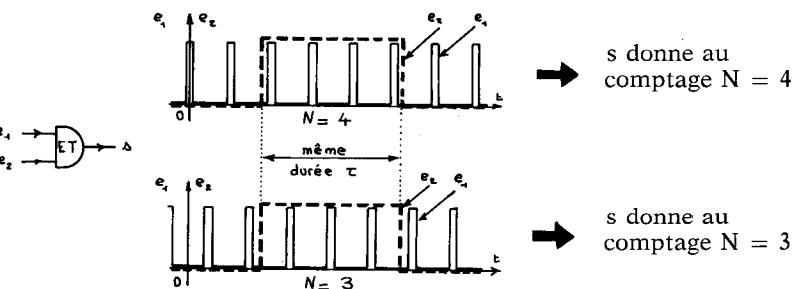
— Le cadencement de ces appareils est plus rapide que pour la simple rampe : de l'ordre de 10 ms (pour éviter les variations de R , C et T).

II.3. Convertisseurs à rampes multiples.

Ces appareils fonctionnent sur un principe voisin des convertisseurs à double rampe, mais la détermination des durées par comptage est améliorée.

Voyons quelle est la difficulté de l'évaluation des durées par comptage d'impulsions d'horloge.

Exemple : incertitude d'une unité sur le comptage des impulsions pour une durée τ donnée :



On voit donc que cette incertitude, d'une impulsion, peut devenir importante pour le comptage d'un faible nombre d'impulsions.

Si on veut obtenir une précision de 0,001 %, il faudra compter au moins 10^5 impulsions. La période classique d'une horloge logique étant de $8 \mu\text{s}$, la durée de comptage devra dépasser 0,8 s soit un temps de conversion supérieur à 1 s. Ce qui est beaucoup trop long pour assurer une bonne précision sur des variations éventuelles de R, C et surtout T.

Dans les convertisseurs à rampes multiples, on évite en partie cet inconvénient en imposant aux durées de comptage d'être des nombres entiers de période d'horloge T, et en utilisant plusieurs rampes successives.

Le principe de ces appareils est plus compliqué, mais ils présentent plusieurs avantages supplémentaires :

- temps de mesure assez court pour une bonne précision $\sim 10 \text{ ms}$,
- précision 0,001 % (meilleur rapport précision - prix).

(Pour plus de précisions sur le fonctionnement de cet appareil, voir les techniques de l'Ingénieur, R 975, Marc JOUVE).

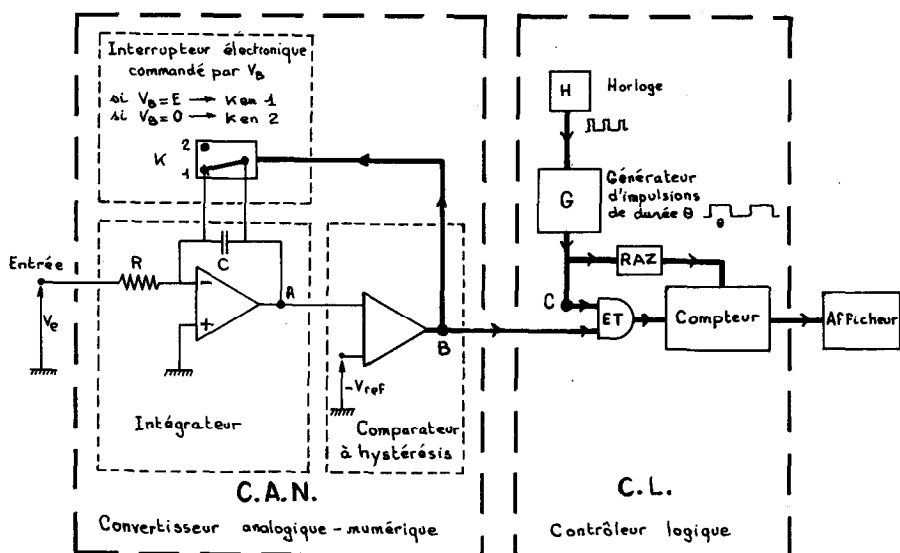
11.4. Convertisseur tension-fréquence.

Dans ces convertisseurs, on transforme la tension à mesurer V_e en un signal périodique numérique de fréquence f , qui lui est proportionnelle : $f = k V_e$.

f peut être mesurée en comptant le nombre d'impulsions de ce signal pendant un temps donné (fréquence-mètre) ou le temps correspondant à N impulsions de ce signal.

La tension V_e est appliquée à un intégrateur qui génère une rampe $V_A = -\frac{1}{RC} V_e t$ et lorsque V_A atteint une valeur donnée, l'intégrateur est remis à zéro. On obtient donc une tension périodique en dents de scie, transformée en signal numérique périodique par un comparateur à hystérésis.

a) SCHÉMA DE PRINCIPE.

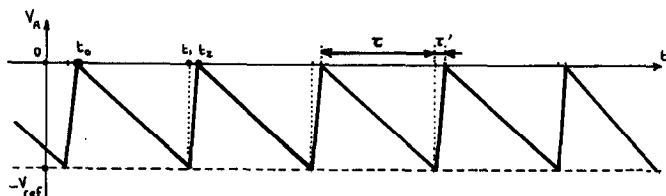


b) DIAGRAMME DES TENSIONS.

* Tension V_A à la sortie de l'intégrateur :

La tension constante à mesurer est intégrée avec $V_A = 0$ comme condition initiale : $V_A = -\frac{V_e}{RC} (t - t_0)$. Lorsque V_A atteint

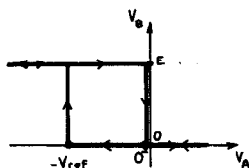
la valeur $-V_{ref}$ (durée τ) le condensateur est déchargé (durée $\tau' \ll \tau$), alors on a $V_A = 0$ et le cycle recommence.



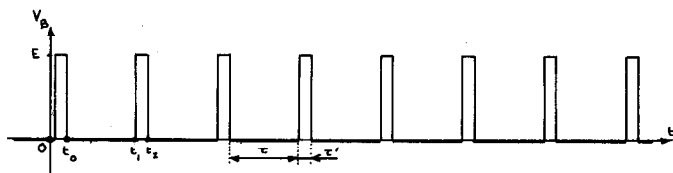
* Tension V_B à la sortie du comparateur :

Le comparateur à hystérésis bascule pour des valeurs de V_A égales à 0^- (légèrement négative) et $-V_{ref}$ en prenant les valeurs 0, E.

Schéma de transfert du comparateur :



Tension V_B à la sortie du comparateur :

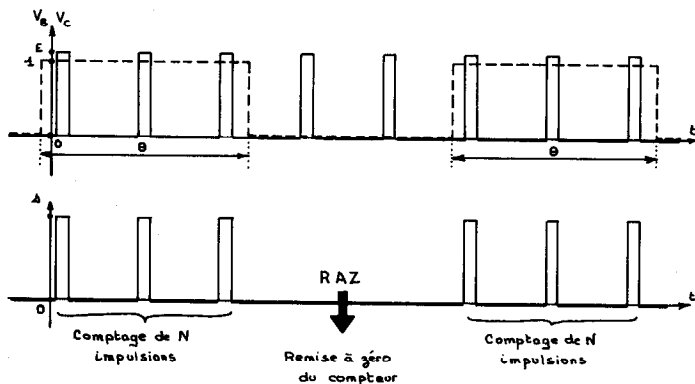


* Tension s à la sortie de la porte logique « ET » :

A l'entrée de « ET » sont appliqués les signaux numériques V_B et V_C .



V_C est générée par un générateur commandé par l'horloge, cette tension est constituée de créneaux de durée $\vartheta = nT$ (T période de l'horloge).



c) ANALYSE.

* A t_0 : le condensateur est déchargé donc $V_A(t_0) = 0$, le comparateur bascule à la valeur $V_B = 0$, l'interrupteur K passe de la position 1 à la position 2, mettant en fonction l'intégrateur.

* De t_0 à t_1 : K en position 2.

L'intégrateur soumis à la tension V_e génère la rampe $V_A = -\frac{V_e}{RC}(t - t_0)$, la condition initiale à t_0 étant $V_A(t_0) = 0^-$.

Comme V_A décroît de 0 à $-V_e(t_1 - t_0)/RC$, la sortie du comparateur est bien à $V_B = 0$ (l'interrupteur est donc en position 2).

* A t_1 , $V_A = -V_{ref} = -\frac{V_e}{RC}(t_1 - t_0)$. Le comparateur bascule de $V_B = 0$ à E. L'interrupteur passe donc en position 1, court-circuitant ainsi le condensateur C.

* De t_1 à t_2 . Le comparateur a toujours sa sortie à $V_B = E$, l'interrupteur reste en position 1, le condensateur se décharge très rapidement, la tension V_A croît rapidement de $-V_{ref}$ à 0.

* A t_2 , le condensateur est déchargé : $V_A = 0$, le comparateur bascule de E à 0. L'interrupteur K passe en position 2. On se retrouve ainsi dans le même état qu'à t_0 .

Le cycle peut recommencer.

On a vu que :

$$-V_{ref} = -V_e \frac{t_1 - t_0}{RC}, \quad \text{soit} \quad t_1 - t_0 = \tau$$

donc :

$$V_e = V_{ref} RC/\tau.$$

La période d'un cycle est $t_2 - t_0 = \tau + \tau'$ (si $\tau' = t_2 - t_1$).

Supposons que la décharge soit suffisamment rapide pour que τ' soit négligeable devant τ (R très grand, résistance de l'interrupteur très faible), alors $t_2 - t_0 \simeq \tau$. Posons $f = \frac{1}{\tau}$ (fréquence des impulsions V_B); alors $V_e = V_{ref} RC f$ en supposant $V_{ref} RC = \frac{1}{k}$ (constante); on a alors $f = k V_e$: la fréquence du signal numérique V_B est proportionnelle à la tension à mesurer V_e .

d) ETUDE DU CONTRÔLEUR LOGIQUE (fréquencemètre).

La porte logique « ET » permet au compteur de dénombrer les impulsions V_B de période $\tau = \frac{1}{f}$ pendant la durée ϑ .

Soit N ce nombre d'impulsions.

Appelons T la période de l'horloge et N' le nombre d'impulsions d'horloge pendant ϑ (définition de ϑ : $\vartheta = N'T$).

On a alors : $N\tau = N'T$ (à une erreur d'une impulsion de V_B près), d'où : $V_e = V_{ref} \times RC \times \frac{1}{T} \times \frac{N}{N'}$, si V_{ref} , R , C , N' et T sont des constantes ; on a : $V_e = KN$.

Le compteur ayant déterminé N , on affichera cette valeur multipliée par K soit V_e directement en volts. Entre deux comptages, le compteur est remis à zéro (RAZ).

e) PERFORMANCES.

De nouveau, dans ce type d'appareil, la précision reste liée à V_{ref} , R , C et T . On retrouve donc les mêmes limitations que pour le convertisseur à simple rampe (stabilité de V_{ref} , R , C et surtout de l'horloge par T).

Mais cette fois, comme la tension V_e est intégrée, les bruits éventuels qui lui sont superposés seront également intégrés. Comme ces bruits sont généralement de valeur moyenne nulle, leur intégrale sera négligeable si $\tau \gg$ période des bruits (on peut également choisir τ , multiple de la période des bruits (sec-teur) pour améliorer la réjection des bruits).

En conclusion, les spécifications sont les suivantes :

- temps de mesure ~ 1 ms,
- réjection des bruits : excellente,
- prix de revient élevé si on veut atteindre une bonne précision : 0,01 % à 0,001 %,
- bon marché si on se satisfait de précisions médiocres 2 à 3 %.

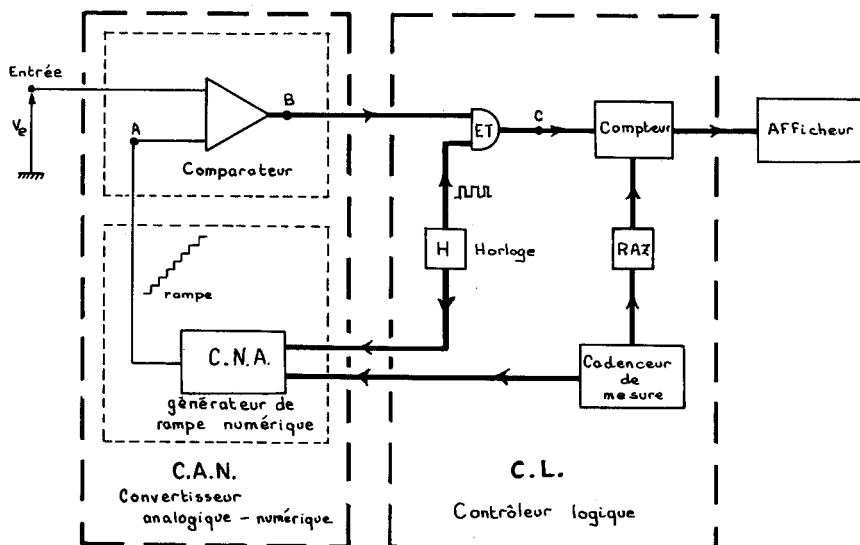
Ces appareils sont encore très utilisés.

III) AUTRES TYPES D'APPAREILS.

III.1. Convertisseur à rampe numérique («en marche d'escalier »).

Le principe de cet appareil est très voisin du convertisseur à simple rampe. Mais, dans ce cas, la tension à mesurer est comparée à une rampe numérique générée par un convertisseur numérique-analogique (CNA).

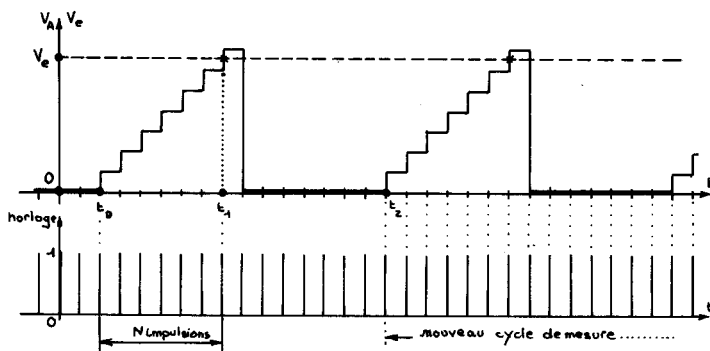
a) SCHÉMA DE PRINCIPE (à comparer avec celui du convertisseur simple rampe).



La rampe numérique est générée par l'ensemble : compteur (codage binaire à n bits), horloge (un pas ou marche par impulsion d'horloge) et le convertisseur numérique-analogique.

b) DIAGRAMME DES TENSIONS.

* Tension à la sortie du CNA.



c) ANALYSE SIMPLIFIÉE.

Le comparateur compare V_A à V_e :

- si $V_A < V_e$, la porte ET permet au compteur de compter les impulsions d'horloge,
- lorsque V_A devient supérieur à V_e , le comparateur bascule et ferme la porte de comptage.

Si N est le nombre d'impulsions comptées, on aura : $V_e = kN$ (k étant la tension d'un pas de la rampe).

On peut donc directement afficher N , exprimé en volts (facteur k près).

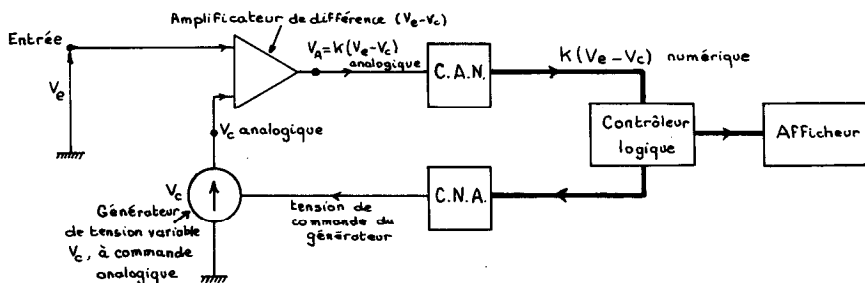
d) PERFORMANCES.

— Le temps de conversion $t_1 - t_0$ est fonction de V_e , la rapidité de la mesure dépendra donc de la grandeur à mesurer, cela est gênant.

— La rapidité de la mesure est limitée car on doit « écrire » tous les codes binaires avant de trouver le bon. L'appareil est donc lent (surtout s'il est précis).

— Les bruits superposés à V_e ne sont pas éliminés.

III.2. Méthode numérique de zéro (ou potentiométrique).



La différence entre la tension à mesurer V_e et une tension générée par un CNA, V_c est amplifiée $\rightarrow V_A = K(V_e - V_c)$. Cette tension V_A est transformée en tension numérique par un CAN qui, elle-même, est comparée à zéro. Suivant le résultat de cette comparaison, le contrôleur logique par l'intermédiaire du CNA augmente ou diminue V_c .

Lorsque $V_c = V_e$, le contrôleur logique affiche la valeur numérique de V_c .

INCONVENIENTS DE CETTE METHODE :

* Dans le cas où des bruits sont superposés à la tension à mesurer, ils sont également amplifiés et le dispositif est en constant déséquilibre. L'affichage est alors instable.

* Pour remédier à ce défaut, il faudrait :

- soit filtrer le signal d'entrée, mais alors on augmente le temps de mesure,
- soit diminuer le gain K de l'amplificateur différentiel, mais alors la résolution est moins bonne.

* Le temps de mesure dépend de V_e .

Exemple : 1 mV $\rightarrow$ 1 ms,
 1 V $\rightarrow$ 1 s.

III.3. Méthode par approximations successives.

C'est une variante de la méthode précédente. Pour augmenter la vitesse de réponse de l'appareil, on opère comme pour une pesée :

initialement V_c est à la valeur $V_0/2$ ($V_0 > V_e$)

V_e est comparée à $V_0/2$

si $V_e > V_0/2$ on compare alors V_e à $V_0 \times \frac{3}{4}$... etc.

si $V_e < V_0/2$ on compare alors V_e à $V_0 \times \frac{1}{4}$... etc.

Le processus se poursuit jusqu'à la résolution maximale.

Performances de ces appareils :

- la rapidité de mesure est bonne $\sim$ 30 ms,
- le problème des bruits superposés à V_e n'est pas résolu.

Ces appareils conviennent bien pour des mesures supérieures au volt.

IV) SPECIFICATIONS DES VOLTMETRES ELECTRONIQUES.

*** Résolution** (ou erreur de quantification).

Ces méthodes font correspondre à une valeur analogique (infinité d'états) une valeur numérique (nombre fini d'états ou codes binaires), dans cette correspondance, on commet donc une erreur minimum de $\pm 1/2$ quantum ou $\pm 1/2$ bit.

Définition de la résolution : plus petite variation à appliquer à l'entrée pour obtenir un changement du code binaire de sortie.

La résolution peut s'exprimer en % pleine échelle (calibre)
ou en nombre de bits.

*** Décalage.**

Définition : écart entre la tension réelle et la tension théorique qui, tous les bits étant initialement à zéro, met le bit de plus petit poids à 1.

(On peut dire que le décalage correspond à une résolution autour du zéro.)

Le décalage s'exprime en % pleine échelle ou en fraction du bit de plus petit poids LSB (least significant bit).

Exemple : considérons un convertisseur 12 bits ; il peut donc repérer $2^{12} = 4096$ états différents. Si le décalage est de 0,5 LSB, il correspondra alors à une fraction pleine échelle de 0,5/4096 soit 0,012 %.

*** Erreur de gain due aux amplificateurs.**

Elle s'exprime en % pleine échelle.

*** Erreur de linéarité.**

C'est l'écart entre la droite de transfert théorique et la courbe de transfert réelle.

Elle s'exprime en écart maximum sur toute la plage d'utilisation.

*** Précision.**

Elle regroupe les trois erreurs précédentes (décalage, gain, linéarité).

Elle s'exprime en : % de la valeur lue ou en % pleine échelle ou en valeur absolue (volt), ou en valeur absolue du quantum (digit ou LSB).

Cette précision est garantie par le constructeur, dans des conditions spécifiques d'utilisation (température, temps, etc.).

*** Temps de conversion ou temps de réponse.**

C'est le temps qui sépare l'ordre de mesure et l'instant où le résultat est disponible (il dépend fortement du type de conversion et de la précision).

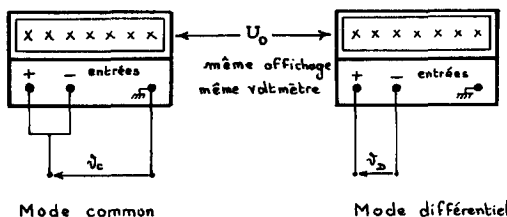
Pour les meilleures précisions ($\sim 0,001\%$), il est de l'ordre de la seconde.

*** Réjection des signaux parasites.**

Pour que l'erreur due aux signaux parasites soit faible, le taux (ou facteur) de réjection doit être grand :

— *Réjection en mode commun* (appareils à entrées différentielles). C'est la tension parasite existant entre la masse et les deux entrées différentielles mises en court-circuit (alors qu'aucune tension n'est effectivement appliquée). Cette tension engendre un affichage.

Définition du taux de réjection en mode commun TRMC :



v_c valeur du signal appliqué en mode commun, donnant U_0 à l'affichage.

v_D valeur du signal appliqué en mode différentiel, donnant la même valeur U_0 à l'affichage.

$$\text{TRMC} = 20 \log_{10} \frac{v_c}{v_D}$$

Pour un voltmètre correct, le TRMC vaut 120 à 140 dB.

Erreur de lecture due à la réjection en mode commun...

$$\dots = \frac{\text{tension existant entre les entrées différentielles et la masse}}{\text{TRMC}}$$

— *Réjection en mode série* (bruits superposés au signal) :

C'est la tension parasite se trouvant en série dans le multimètre, avec la tension à mesurer.

Taux de réjection en mode série TRMS en dB ...

$$\dots = 20 \log_{10} \frac{\text{valeur crête du signal alternatif produisant une certaine variation de l'affichage}}{\text{valeur du signal continu produisant le même effet}}$$

Pour les meilleurs voltmètres, le TRMS vaut de 60 à 90 dB et dépend essentiellement du convertisseur utilisé.

V) COMPARAISONS ENTRE LES VOLTMETRES ANALOGIQUES ET NUMERIQUES.

* Solidité.

Les voltmètres numériques supportent mieux des surcharges, dépassements d'échelle, erreurs de polarité, que les voltmètres analogiques.

* Résolution - précision.

A prix égal, les voltmètres numériques sont 100 à 1 000 fois plus précis. A faible précision, les voltmètres analogiques sont toujours beaucoup moins chers que les numériques.

* Impédance d'entrée.

Généralement inférieure à 1 M Ω pour les voltmètres analogiques et comprise entre 1 M Ω et 10 G Ω pour les numériques.

* Choix des calibres.

Beaucoup plus simple pour les voltmètres numériques (souvent automatique), ils peuvent être programmés sur certains voltmètres numériques.

* Mesure de tensions lentement variables.

Il est souvent plus commode d'utiliser un voltmètre analogique dont le déplacement de l'aiguille pourra être suivi facilement.

* Mesure de tensions fluctuantes.

Un voltmètre analogique présente l'avantage d'intégrer par inertie les fluctuations, la lecture donnant la valeur moyenne de la tension appliquée.

CONCLUSIONS.

La facilité d'utilisation et la précision des multimètres numériques ne doivent pas faire oublier les multimètres analogiques dont le prix, pour des précisions médiocres, est beaucoup moins élevé et dont la lecture est plus commode lorsque les tensions varient lentement (étude de l'évolution d'une tension, réglage rapide d'une tension à une valeur donnée, etc.).

Il faut également s'assurer que la grande précision des appareils numériques (donnée par le constructeur) n'est pas surévaluée, qu'elle correspond à la précision des autres appareils utilisés dans le montage (autres appareils de mesures, générateurs, etc.), que les bruits et fluctuations n'engendrent pas une forte incertitude dans les mesures, et que les conditions d'utilisation de l'appareil sont conformes aux spécifications du constructeur (temps de préchauffage, température ambiante, vieillissement des composants, étalonnage récent, etc.).

Les multimètres analogiques ont encore, dans les lycées, une longue carrière devant eux.

BIBLIOGRAPHIE

- Marc JOUVE. — *Techniques de l'Ingénieur* : R 975.
 - R. BEAUVILLAIN et J. LATY. — *Mesures électriques et électroniques*. Hachette technique.
 - J. THURIN. — *Mesures électriques et électroniques*. Eyrolles.
 - D. VENOT. — *Mesures et instrumentation*. Ecole Supérieure d'Electricité. 2899.
 - J.-M. VANZO, D. VENOT. — *Mesures et instrumentation*. Ecole Supérieure d'Electricité. 2963.
-