

# Pratique de la mesure

## LE CONTRÔLEUR UNIVERSEL

**L**E contrôleur universel est l'appareil de base, aussi bien de l'électricien que de l'électronicien. Qui veut faire de l'électronique doit obligatoirement posséder un contrôleur universel classique, c'est-à-dire à aiguille. Le multimètre numérique tend peut-être à remplacer ce bon vieux serviteur, sauf pour certaines fonctions. Nous pensons en particulier à tous ces réglages où l'on recherche un maximum (ou un minimum) de déviation, pour lesquels l'aiguille est bien plus efficace. Si nous voulons donc commencer cette rubrique par un conseil aux débutants : achetez d'abord un contrôleur à aiguille et n'envisagez le multimètre numérique que dans un second temps !

En fait, le contrôleur universel n'a d'universel que le nom car il ne mesure pas tout, loin s'en faut ! C'est cependant un voltmètre et un ampèremètre réunis en un seul boîtier, utilisables aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif. De plus un ohmmètre y est adjoind, permettant aussi bien les mesures de résistances que les vérifications de continuité. Certaines fonctions annexes sont parfois ajoutées, telle la mesure des capacités, des niveaux en décibels...

Bien entendu, quelle que soit la fonction, le cœur de l'appareil est un galvanomètre à cadre mobile. La figure 1 nous rappelle le principe de ce mécanisme. Le galvanomètre est sensible à une intensité. Le courant électrique continu passant dans le cadre (bobine mobile) y crée un

champ magnétique. L'antagonisme entre ce champ induit et le champ permanent de l'aimant provoque une rotation du cadre. On démontre que l'angle de déviation est proportionnel à l'intensité passant dans la

bobine. La graduation du galvanomètre est donc linéaire, c'est-à-dire qu'il apparaît des écarts angulaires égaux d'un bout de l'échelle à l'autre. Il faut donc distinguer le galvanomètre de l'appareil de mesure de type ferro-magnétique dans lequel la bobine traversée par le courant est fixe. Elle provoque la déviation de l'aiguille par l'intermédiaire d'une palette de fer doux. La graduation de ce genre d'appareil économique n'est pas linéaire. Les graduations sont serrées au début de l'échelle et plus écartées à la fin. Ces appareils sont incompatibles avec la mesure précise et ne peuvent être

utilisés que pour une vérification de fonctionnement à points fixes.

L'exactitude d'une lecture de déviation suppose :  
- que le zéro de l'aiguille est correct. Pour cela le constructeur a prévu une vis de correction qui agit sur le point d'attache de l'un des ressorts spiraux. En principe, le système mobile est équilibré, mais une retouche du réglage peut être nécessaire selon que le galvanomètre est horizontal ou vertical ;  
- que l'observateur ne commette pas une erreur dite de parallaxe. En effet,

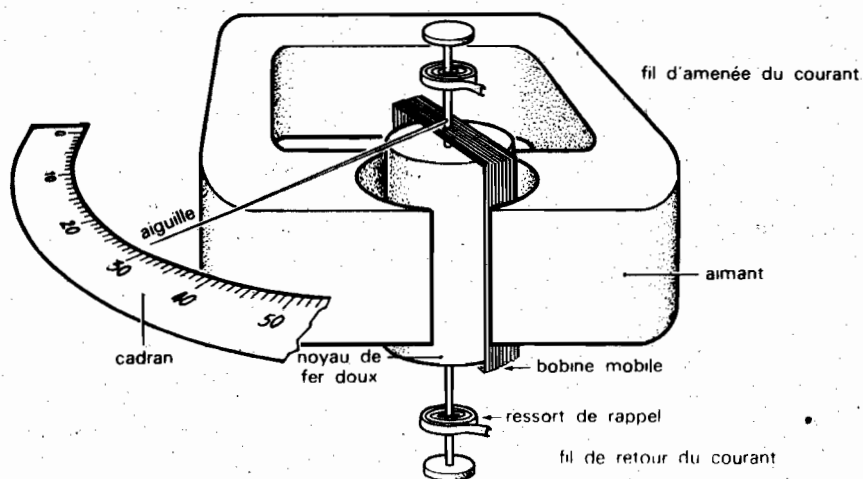


Fig. 1. - Le galvanomètre.

l'aiguille ne peut pas toucher le cadran et elle se trouve à 1 ou 2 mm en avant. Selon la position de l'œil, il peut exister une erreur de lecture de  $\pm 1$  division. Pour éviter cette imprécision, le constructeur a prévu sur les bons appareils un miroir de parallaxe montrant à l'observateur une image de l'aiguille, par réflexion. Lorsque l'observateur voit l'aiguille rigoureusement confondue avec son image, alors il est parfaitement en face du cadran et fait une lecture exacte.

Tous les appareils de mesure, même les meilleurs, sont imparfaits. Ils fournissent le résultat de la mesure avec une certaine erreur. Pour les galvanomètres, cette erreur est donnée par la classe de l'appareil. En principe, l'indication de cette classe est portée, en bas et à gauche du cadran, sous la forme d'un chiffre. Ainsi, si le cadran porte l'indication « 2 », cela veut dire : Classe 2, et signifie que l'erreur maximale commise en tout point de la graduation est au plus égale à  $\pm 2\%$  de la valeur de fin d'échelle. Si la graduation va jusqu'à 100, cette erreur est au maximum de  $\pm 2$  graduations. Ainsi donc, si vous lisez 100, il peut aussi bien s'agir de 98 ou de 102. Si vous lisez 50, la vraie valeur est entre 48 et 52. Si vous lisez 10, elle est entre 8 et 12.

Ces chiffres montrent clairement qu'il est souhaitable de faire des mesures

à déviation aussi grande que possible. En effet, pour la déviation pleine échelle, l'erreur relative est de  $\pm 2\%$ ; pour la moitié de l'échelle, elle atteint  $\pm 4\%$ ; pour le dixième, elle passe à  $\pm 20\%$  ! Ne jamais oublier, donc, que la précision d'un galvanomètre est d'autant plus grande que l'aiguille est plus proche de la déviation maximum.

Si la classe d'un bon galvanomètre est en principe toujours marquée en clair, ce n'est pas toujours le cas des contrôleurs complets. Ainsi, sur trois contrôleurs que nous avons entre les mains, le 819 Centrad ne porte pas d'indication, le MX011A porte la marque « 3-5 » et un CdA 102 n'indique rien non plus.

Si nous nous reportons à la notice de ces trois appareils, celle du Centrad est parfaitement claire, un paragraphe entier étant consacré à définir la notion de classe : le 819 est de classe 1, pour l'appareil en continu. Par contre, les notices des deux autres contrôleurs ne disent pas un traître mot de ce problème, pourtant important.

Bien sûr, la classe du contrôleur complet dépend à la fois de celle du galvanomètre et de celle des composants associés : les diverses résistances de précision définissant les calibres doivent avoir une tolérance meilleure que celle du cadre mobile pour ne pas compromettre encore la

précision. Pour le 819 Centrad, les résistances sont à 0,5 %, tandis que, pour le Métrix, elles ne sont qu'à 2 %, ce qui correspond sans doute à une classe moyenne de 4.

Comme on le constate, il s'agit là d'une caractéristique tout de même importante et il n'est pas équivalent de faire des mesures à 1 % ou à 4 %. L'acheteur éventuel d'un contrôleur doit donc s'attacher à connaître exactement la classe du modèle qui le tente, ce qui lui permet de mieux appréhender le fameux rapport qualité/prix !

### Fonction Voltmètre continu

C'est la fonction la plus simple du contrôleur universel permettant de mesurer les tensions continues. Voyons tout d'abord le principe de l'appareil.

Le galvanomètre, nous l'avons vu, est sensible à l'intensité d'un courant qui traverse son cadre. Généralement, cette sensibilité est très grande et un courant très faible est suffisant pour atteindre la déviation maximum. Ainsi les galvanomètres choisis pour réaliser les contrôleurs sont des modèles 100  $\mu\text{A}$ , 50  $\mu\text{A}$ , voire 25  $\mu\text{A}$  ou mieux !

Pour transformer un galvanomètre en voltmètre, c'est très simple : il suffit de lui adjoindre une résistance série (voir fig. 2). La résistance R ainsi ajoutée donne, avec celle du cadre r, une résistance totale  $R + r = R_t$ . Notons d'ailleurs ici que la résistance du cadre d'un galvanomètre sensible n'est jamais négligeable (elle peut atteindre le millier d'ohms) car la bobine mobile comporte de nombreuses spires de fil très fin.

En appliquant la loi d'Ohm au système de la figure 1, nous constatons que si une tension U est appliquée aux bornes d'entrée, il passera dans le cadre un courant

$$I = U / (R + r),$$

relation qui montre bien que l'intensité mesurée par le galvanomètre est proportionnelle à la tension appliquée.

Exemple :

Soit une résistance totale  $R_t = R + r = 100\,000\ \Omega$ .

Si  $U = 1\ \text{V}$ , alors

$$I = 1 / 100\,000 = 10\ \mu\text{A}$$

Si  $U = 2\ \text{V}$ , alors

$$I = 2 / 100\,000 = 20\ \mu\text{A}$$

Si  $U = 10\ \text{V}$ , alors

$$I = 10 / 100\,000$$

$$= 100\ \mu\text{A}$$

Il est très facile de transformer la graduation du galvanomètre pour en faire un voltmètre, tout simplement en notant 1 V en face de 10, 2 V en face de 20... et 10 V en face de 100. Le voltmètre ainsi réalisé est de calibre 10 V ! Pour faire, de la même manière, un voltmètre de calibre 1 V, il suffit de rendre  $R_t$  10 fois plus faible, c'est-à-dire de 10 000  $\Omega$ . Pour avoir le calibre 100 V,  $R_t$  serait, au contraire, 10 fois plus grande, soit 1 000 000  $\Omega$  ou 1 M $\Omega$ .

Le lecteur remarquera peut-être que le voltmètre à plusieurs calibres, ainsi réalisé, a une constante : c'est sa **résistance par volt**. Elle est de 10 000  $\Omega$  pour le modèle imaginé ci-dessus.

Si nous reprenons le travail précédent en partant d'un galvanomètre de 50  $\mu\text{A}$  au lieu du 100  $\mu\text{A}$ , nous trouverions qu'il faut  $R_t = 20\,000\ \Omega$  pour faire un voltmètre de calibre 1 V. Soit une résistance par volt de 20 000  $\Omega$ . Avec un cadre de 25  $\mu\text{A}$ , nous aurions une résistance de 40 000  $\Omega/\text{V}$ .

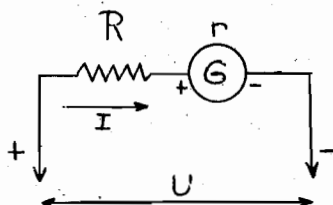


Fig. 2. — Transformation d'un galvanomètre en voltmètre.

Or la résistance par volt est la caractéristique essentielle d'un voltmètre, en dehors de sa classe, dont nous avons déjà parlé. Nous allons nous en rendre compte sur un exemple. Reportons-nous à la figure 3. Nous y voyons un montage des plus courants en électronique : le pont diviseur de tension ! Le générateur alimentant ce pont est supposé à tension constante, par exemple une alimentation stabilisée à régulateur intégré, pratique maintenant très courante. Le rôle du pont diviseur est de donner au point B un potentiel inférieur à celui de A.

Nous avons vu que le calcul de l'intensité  $I$  est facile :

$$I = U/R_1 + R_2, \text{ soit avec les valeurs du schéma :}$$

$$I = 10/90\ 000 + 10\ 000 = 10/100\ 000 = 100\ \mu\text{A}.$$

La tension qui apparaît entre B et C est donnée par  $U_2 = R_2 \cdot I$

$$= 10\ 000 \times 100 \cdot 10^{-6} = 1\ \text{V exactement !}$$

Notre pont diviseur est donc un diviseur par 10 ! La tension réelle obtenue entre B et C sera exactement celle donnée par le calcul si les composants ont des tolérances serrées !

Mais, la curiosité aidant, ou à l'occasion d'une intervention de mise au point ou de dépannage, mesurons cette tension de 1 V avec le voltmètre de calibre 1 V, réalisé précédemment. Rappelons que dans le premier cas (cadre de 100  $\mu\text{A}$ ) la résistance totale était de 10 000  $\Omega$ . Nous connectons donc ce bon voltmètre (?) entre les points B et C. La figure 3 devient ainsi figure 4. Or, les exercices que vous avez peut-être courageusement travaillés aidant, vous devinez que la mise en parallèle de 10 000  $\Omega$  sur  $R_2$  n'est pas sans modifier les choses.

La résistance équivalente existant entre B et C tombe ainsi à  $R_{\text{eq}}$  telle que :

$$1/R_{\text{eq}} = 1/10\ 000 + 1/10\ 000 = 2/10\ 000$$

d'où  $R_{\text{eq}} = 5\ 000\ \Omega$  !

Le courant  $I'$  traversant le système s'en trouve modifié car :

$$I' = U/R_1 + R_{\text{eq}} = 10/90\ 000 + 5\ 000 = 10/95\ 000 \approx 105\ \mu\text{A}.$$

La tension entre les points B et C, mesurée par le bon voltmètre, est de :

$$U_{\text{BC}} = R_{\text{eq}} \cdot I' = 5\ 000 \times 105 \cdot 10^{-6} \approx 0,52\ \text{V !}$$

Quelle catastrophe ! Vous vous attendiez à trouver l'exacte valeur de la tension de 1 V, à la précision de votre voltmètre près, et vous obtenez 0,5 V ! Soit la moitié, donc une erreur de 50 % ! Autant dire que cette mesure n'est pas du tout significative.

Nous vous proposons, en guise d'exercice de ce mois, de refaire le calcul, en partant d'un voltmètre 1 V construit avec un galvanomètre de 50  $\mu\text{A}$  (20 000  $\Omega/\text{V}$ ) puis ensuite avec un galvanomètre de 25  $\mu\text{A}$  (40 000  $\Omega/\text{V}$ ).

Ne trichez pas, faites vraiment ces calculs !

C'est fait ! Bien ! Vous avez donc trouvé respectivement 0,69 V et 0,81 V environ. Soit des erreurs de 30 et de 20 %.

Vous le constatez, l'erreur apportée par le branchement du voltmètre est donc d'autant plus faible que sa résistance par volt est plus forte. Il est alors très facile de définir le voltmètre idéal. Un tel voltmètre doit avoir une résistance interne infinie de manière à ne pas perturber du tout le circuit sur lequel on le connecte pour faire la mesure. Nous pouvons remarquer que, dans l'exemple traité, les valeurs sont très courantes :  $R_2$  de 10 000  $\Omega$  est même relativement faible puisqu'il n'est pas rare de manipuler des résistances de plusieurs centaines de milliers d'ohms dans les circuits électroniques.

Disons-le tout net : le contrôleur universel est loin d'être un voltmètre idéal ! Sa résistance par volt est toujours trop faible. Est-ce à dire qu'il faut mettre ce bel appareil à la poubelle ? Certes non, mais vous devez par contre l'utiliser avec une certaine prudence et en connaissance de cause !

Dans l'exemple que nous venons de développer, nous nous sommes volontairement placés dans le plus mauvais cas : nous avons tenté de mesurer « 1 V » avec un voltmètre de calibre 1 V, en espérant ainsi avoir la déviation maximum compatible, nous

l'avons dit, avec la meilleure utilisation de la classe de l'appareil. Hélas, cette excellente intention nous a apporté une erreur monstrueuse allant de 50 % au pire, à 20 % au mieux.

Reprenons donc la même mesure, mais en utilisant cette fois le même galvanomètre transformé en voltmètre de calibre 10 V, en portant  $R_1$  à 100 000  $\Omega$  (cadre de 100  $\mu\text{A}$ ). La mise en parallèle de 10 000  $\Omega$  sur les 10 000  $\Omega$  de  $R_2$  la fait tomber à... (Allons, du courage... à vos calculatrices !)... à 9 090  $\Omega$ , d'où  $I \approx 101\ \mu\text{A}$ , et la tension lue par le voltmètre est de 0,907 V !

L'erreur est donc tombée de 50 à 10 %, ce qui est tout de même bien mieux. Evidemment, dans ce cas, le calibre étant de 10 V, l'aiguille ne dévie que du 1/10 de l'échelle et, en contrepartie, l'imprécision inhérente à la classe commence à redevenir inquiétante ! Qu'il est donc difficile de faire une mesure précise !

Dans les mêmes conditions, les meilleurs voltmètres construits avec les cadres de 50 ou 25  $\mu\text{A}$  et toujours de calibre 10 V conduiraient à des erreurs respectives de 5 % et 3 %, le calcul annonçant 0,956 V et 0,977 V. Les

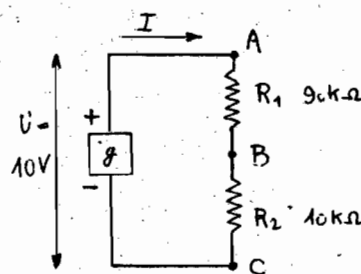


Fig. 3. - Le pont diviseur.

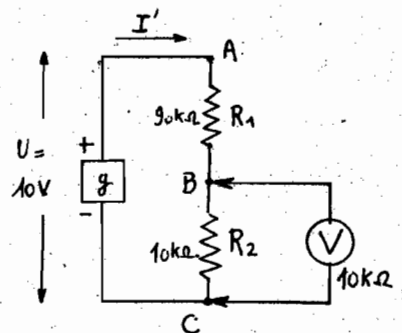


Fig. 4. - La connexion du voltmètre modifie les caractéristiques du pont diviseur.

résultats commencent à devenir corrects.

Essayons pour conclure cette étude de tirer quelques considérations pratiques utiles :

— Tout d'abord, si vous achetez un contrôleur, faites très attention à la notion de résistance par volt : 10 000 Ω/V sont insuffisants ; 20 000 Ω/V sont acceptables ; 40 000 Ω/V sont préférables mais conduisent à des appareils assez coûteux !

— Lors de la mesure d'une tension, — laquelle se fait toujours plus ou moins dans les conditions de notre pont diviseur —, il faut avoir une notion exacte des valeurs des résistances qui correspondent à R<sub>1</sub> et à R<sub>2</sub> de la figure 3. Ces deux valeurs sont, en effet, simultanément importantes. (Nous supposons que la mesure se fait aux bornes de R<sub>2</sub>. Si c'était aux bornes de R<sub>1</sub>, il suffirait d'inverser « 1 » et « 2 » dans les considérations suivantes.)

Voyons d'abord l'effet de R<sub>1</sub>. Si vous reprenez tous les calculs avec R<sub>1</sub> = 1 000 Ω vous aurez dans le pire des cas une erreur de 9 %, R<sub>2</sub> toujours à 10 000 Ω. L'erreur est donc d'autant plus grande que R<sub>1</sub> est grande par rapport à R<sub>2</sub>.

En poussant les choses à l'extrême, si R<sub>1</sub> = 0 Ω, donc R<sub>2</sub> connectée directement aux bornes du générateur, l'erreur devient nulle ! On en conclut qu'une mesure de tension aux bornes d'un générateur se fait avec la précision propre du voltmètre, sans erreur additionnelle.

A l'autre extrême, si R<sub>1</sub> devient très grande par rapport à R<sub>2</sub>, l'erreur devient prohibitive, la mesure s'avérant impossible. Il est des tensions que le contrô-

leur universel ne peut pas mesurer !

Passons maintenant au rôle plus précis de R<sub>2</sub>, résistance aux bornes de laquelle le voltmètre est branché. Il est facile de comprendre que la perturbation apportée par cet appareil sera d'autant plus grande que R<sub>2</sub> est de valeur élevée. Pour que la mesure ait un sens, il faut que le voltmètre ait une résistance interne au moins 10 fois plus grande que R<sub>2</sub>. En pratique cela s'obtiendra en choisissant convenablement le calibre. Il faut le prendre aussi fort que possible, avec une déviation exploitable. Faire une première lecture à calibre élevé, donnant une faible déviation. Passer au calibre suivant et ainsi de suite jusqu'à ce que la dernière mesure présente une chute de tension dépassant les 10 %. Si le résultat ne chute pas, c'est que l'on se trouve dans le cas R<sub>1</sub> faible et la lecture peut alors se faire à déviation maximum et bonne précision.

Comme vous le constatez, la mesure d'une tension dans un circuit électronique n'est pas aussi évidente qu'on pourrait le croire. Il ne suffit pas de brancher le voltmètre dans le bon sens et de lire. Une sérieuse réflexion sur le montage doit être faite ; un calcul préliminaire rapide, tels les calculs développés dans cet article, doit être posé de manière à cerner le cas particulier de mesure entreprise. C'est à ces conditions et seulement à ces conditions que la mesure de la moindre tension existant dans un montage aura un sens et vaudra pour tirer des conclusions.

Par ailleurs, pour consoler les lecteurs découragés par les difficultés mises en lumière dans les lignes pré-

cedentes, et qui verraient dans leur contrôleur un appareil diabolique, nous avons l'intention de décrire, le mois prochain, un petit montage permettant de s'approcher du voltmètre idéal. Il s'agira d'une interface à intercaler entre le voltmètre lui-même et le circuit sur lequel on fait la mesure et qui confèrera à notre voltmètre une résistance interne beaucoup plus élevée que la sienne propre. Tous les problèmes précédents seront alors écartés, même s'ils ne sont pas entièrement éliminés.

Nous vous donnons donc rendez-vous au mois prochain pour cette description, et pour parler encore de quelques mesures de tensions continues.

F. THOBOIS

Exercice à résoudre pour le mois prochain : (solution dans le n° suivant)

Se reporter aux figures 3 puis 4.

Le générateur est à tension constante de 15 V. R<sub>1</sub> = 94 kΩ et R<sub>2</sub> = 47 kΩ (valeurs supposées exactes).

a) Calculer la tension apparaissant entre les points B et C.

b) On mesure cette tension avec un voltmètre de calibre 10 V et de résistance interne 20 000 Ω/V. Calculer la tension lue par le voltmètre.

c) Ce voltmètre étant de classe 2, indiquer entre quelles valeurs se situera la lecture effective.

Solution de l'exercice du mois précédent :

— Résistance du groupe R<sub>2</sub>//R<sub>3</sub> :

$$\begin{aligned} 1/R_{\text{eq}} &= 1/R_2 + 1/R_3 \\ &= 1/200.10^3 + 1/300.000 \\ &= 120.000 \Omega = 0,12.10^6 \Omega. \end{aligned}$$

— Résistance totale du circuit :

$$\begin{aligned} R_t &= 0,8.10^6 + 0,12.10^6 + 0,33.10^6 \\ &= 1,25.10^6 \Omega, \text{ soit } 1,25 \text{ M}\Omega. \end{aligned}$$

— Intensité principale :

$$\begin{aligned} I &= E/R_t = 250.10^{-3}/1,25.10^6 \\ &= 0,2.10^{-6}, \text{ soit } 0,2 \mu\text{A}. \end{aligned}$$

— Différences de potentiels :

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I = 0,8.10^6 \times 0,2.10^{-6} = 0,160 \text{ V} \\ U_{2/3} &= R_{\text{eq}} I = 0,12.10^6 \times 0,2.10^{-6} = 0,024 \text{ V} \\ U_4 &= R_4 I = 0,33.10^6 \times 0,2.10^{-6} = 0,066 \text{ V} \\ \text{NB : } &0,160 + 0,024 + 0,066 = 0,250 \text{ V} \\ &\text{ou } 250 \text{ mV} = E \end{aligned}$$

— Intensités dans R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> :

$$\begin{aligned} I_2 &= U_2/R_2 = 0,024/200.000 = 0,12 \mu\text{A} \\ I_3 &= U_3/R_3 = 0,024/300.000 = 0,08 \mu\text{A} \\ \text{NB : } &0,12 + 0,08 = 0,20 \mu\text{A} = I \end{aligned}$$

— Puissances dissipées dans les résistances

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 I = 0,160 \times 0,2.10^{-6} = 32 \text{ nW} \\ P_2 &= U_2 I_2 = 0,024 \times 0,12.10^{-6} = 2,88 \text{ nW} \\ P_3 &= U_3 I_3 = 0,024 \times 0,08.10^{-6} = 1,92 \text{ nW} \\ P_4 &= U_4 I = 0,066 \times 0,2.10^{-6} = 13,2 \text{ nW} \\ \text{NB : } &32 + 2,88 + 1,92 + 13,2 = 50 \text{ nW} \\ P &= E I = 250.10^{-3} \times 0,2.10^{-6} = 50 \text{ nW}. \end{aligned}$$