

Pratique de la Mesure

LES MULTIMETRES NUMERIQUES

(suite voir n° 1704)

II – Fonction voltmètre

Nous avons indiqué, dans notre article précédent, que le convertisseur A/D avait la particularité de posséder une très haute impédance d'entrée, ce qui est particulièrement intéressant pour faire un bon voltmètre. Effectivement, si le convertisseur est utilisé seul et directement connecté au circuit sous mesure, il est difficile de trouver mieux ! Plusieurs milliers de mégohms ! C'est vraiment parfait !

Hélas ! dans ces conditions, le convertisseur n'accepte de mesurer les tensions que dans une fourchette limitée. Généralement, le calibre obtenu est de 200 mV, ce qui permet de couvrir de - 200 mV à + 200 mV, compte tenu de la possibilité de mesurer ces deux types de tension ! Toute tension dépassant ces limites n'est plus mesurable directement. Il faut alors prévoir un atténuateur ramenant la tension à mesurer dans les limites précédentes. Deux types sont possibles : l'un à résistances série, l'autre à résistan-

ces en parallèle.

a) **Résistance série** (voir fig. 8). Pour chaque point intermédiaire, la valeur de la résistance, côté masse, est le dixième de celle côté entrée. Ce type d'atténuateur présente quelques avantages :

La résistance parasite des contacts du commutateur n'est pas en série avec les résistances du pont diviseur, mais avec celle du convertisseur. Comme celle-ci est énorme, l'effet parasite est nul.

Un autre avantage matériel vient du fait que beaucoup de fabricants proposent des ensembles de

résistances permettant la réalisation de l'atténuateur complet (Caddock, Allen Bradley...).

On notera cependant que de tels fabricants se limitent à une valeur de 10 M Ω pour la résistance globale du diviseur. Il est en effet très difficile de réaliser des résistances de précision de valeurs plus élevées. Il faut adopter un compromis entre les performances et le prix de revient ! 10 M Ω correspondent au meilleur rapport qualité-prix ! C'est malheureusement ici que les milliers de mégohms du convertisseur fondent

comme neige au soleil, pour ne plus faire que... 10 M Ω ! C'est évidemment beaucoup moins !

Au désavantage du montage de la figure 8, nous signalerons l'interaction des valeurs de chaque résistance sur l'ensemble des calibres. Ceci complique beaucoup la réalisation éventuelle d'un tel pont diviseur, avec des résistances à ajuster.

b) **Résistances parallèles** (voir figure 9)

C'est cette fois la résistance basse du pont diviseur qui est sélectionnée. Le montage présente

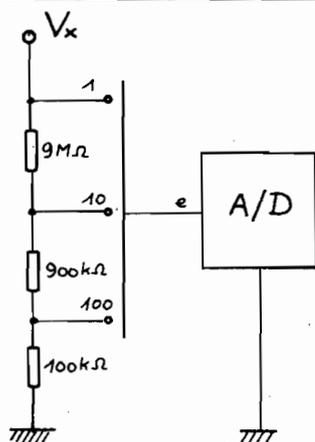


Fig. 8. – Atténuateur à résistances/série.
 $Z = 10 \text{ M}\Omega$;
trois calibres : 1, 10, 100.

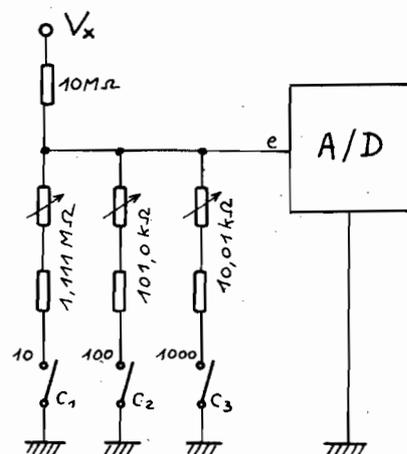


Fig. 9. – Atténuateur à résistances/parallèles.
 $Z \approx 10 \text{ M}\Omega$; quatre calibres :
1, 10, 100, 1 000 (pour 1 : C₁, C₂, C₃ ouverts).

l'avantage de permettre un ajustage facile du facteur de division, sans interrédaction d'un calibre sur l'autre. Autre avantage : la commutation peut s'effectuer à l'aide d'une batterie de contacts mécaniques ou analogiques, tous reliés à la masse. On peut ainsi prévoir bien plus facilement des circuits de sélection automatique de calibres.

Bien entendu, le problème de la valeur des résistances est le même que ci-dessus, et la valeur standard reste de 10 MΩ.

Il peut alors être intéressant de faire une comparaison entre le contrôleur à aiguille et le multimètre numérique.

Nous avons vu, dans les articles précédents, que la valeur moyenne adoptée pour les premiers était de 20 kΩ/V. Ainsi, en gamme 2 V, nous obtenons une résistance interne de 40 kΩ. Le multimètre numérique marque un gros point, puisque lui, avec ses 10 MΩ d'entrée, présente dans la même gamme une résistance de 10/2, soit 5 MΩ/V !

Oui, mais ! Lorsqu'on utilise une gamme plus élevée, l'avantage s'amenuise et finit par... s'inverser ! C'est que le multimètre numérique est à résistance d'entrée constante, ce qui fait que, en gamme 2 000 V, il fait toujours ses 10 MΩ, soit... 5 000 Ω/V. Dans les mêmes conditions, le contrôleur à aiguille a conservé ses

20 kΩ/V et présente une résistance interne de... 40 MΩ ! Le petit tableau de la figure 10 donne ainsi la résistance par volt du multimètre à aiguille classique, pour les gammes usuelles.

Ce tableau montre que, si le multimètre est excellent sur les gammes sensibles, il est presque mauvais sur les gammes hautes ! Ce n'est donc pas l'appareil idéal que l'utilisateur un peu naïf aurait pu imaginer ! Les lignes suivantes vont essayer d'entrer un peu plus avant dans ce problème.

Les difficultés sont d'ailleurs, toutes proportions gardées, les mêmes qu'avec le contrôleur à aiguille. La mesure d'une tension se fait dans deux cas différents. En effet, les tensions qui apparaissent dans un montage ont pour origine l'alimentation de ce montage. Si l'on mesure les tensions à l'origine, on les mesure en fait aux bornes du ou des générateurs alimentant l'appareil. Par ailleurs, ces tensions d'origine sont appliquées ici ou là, intégralement ou en partie, elles déterminent des courants, lesquels font apparaître d'autres tensions... qu'il faut mesurer également. D'où la distinction apportée dans les lignes suivantes.

1. Mesure aux bornes d'un générateur

Un générateur est une source de courant électrique caractérisé par sa force

électro-motrice (FEM) mesurée en volts. Le générateur présente aussi, comme tous les appareils électriques, une résistance interne. Si un générateur de FEM E et de résistance interne r délivre un courant I, la tension qui apparaît entre ses pôles est :

$$U = E - r I$$

Cette tension est donc toujours inférieure à la FEM. L'écart entre U et E est proportionnel à r et à I.

Si nous voulons mesurer une FEM, avec un multimètre numérique, quelle sera la précision de la mesure ? En tout premier lieu, signalons que la résistance interne d'un générateur est souvent faible ou très faible : quelques dizaines d'ohms pour les plus mauvaises des piles à quelques centièmes d'ohms pour de très bons générateurs. Certains générateurs de haute tension peuvent avoir une résistance interne de quelques centaines d'ohms.

Voyons deux exemples précis :

Soit à mesurer la FEM d'un élément d'accumulateur cadmium-nickel de 1,2 V typ. Supposons une résistance interne de 1/10 Ω, ce qui est raisonnable pour un élément de petite capacité (voir figure 11). Le multimètre, avec ses 10 MΩ de résistance interne, va consommer un courant de l'ordre de

$$I = U/R, \text{ soit } I = 1,2/10^7 = 0,12 \mu A.$$

La tension mesurée aux bornes de l'élément est alors de

$$U = E - r I, \text{ soit } U = E - (0,1 \times 12 \cdot 10^{-8}) \text{ d'où } U = E - 12 \cdot 10^{-9}$$

Ce résultat montre que le multimètre indique alors la valeur de la FEM avec sa précision propre, sans apporter d'erreur supplémentaire.

Soit maintenant à mesurer la FEM d'un générateur de 1 000 V et de résistance interne 500 Ω. Un calcul analogue au précédent donne une consommation du multimètre de

$$I = 1\ 000/10^7 = 0,1 \text{ mA. D'où une tension aux bornes, pendant la mesure } U = E - 500 \times 10^{-4} = E - 50 \text{ mV}$$

L'écart est cette fois de 50 mV, mais, comme le calibre à utiliser est de 2 000 V, la résolution en 2 000 points est de 1 V. Elle serait de 0,1 V en 20 000 points. Donc l'écart trouvé est en-dessous du seuil de résolution et est donc parfaitement négligeable.

En conclusion, nous pouvons considérer que toute mesure de FEM ou de tension directement aux bornes d'un générateur est une mesure donnant toute satisfaction puisqu'elle se fait avec l'entière précision du multimètre, sans dégradation d'aucune sorte. Lorsque le générateur alimente un montage, sa tension aux bornes n'est plus égale à sa FEM (sauf s'il s'agit d'un générateur à ré-

GAMMES	R d'entrée	R par volt
2 V	10 MΩ	5 MΩ/V
20 V	10 MΩ	500 kΩ/V
200 V	10 MΩ	50 kΩ/V
2 000 V	10 MΩ	5 kΩ/V

Fig. 10. - Variation de la résistance par volt d'un multimètre 10 MΩ. Ce n'est très bon que pour les deux premières gammes !

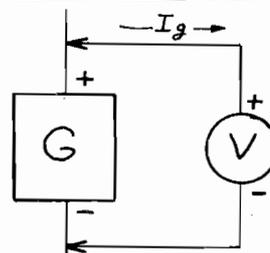


Fig. 11. - Mesure de FEM. Précision excellente !

gulation électronique) mais la mesure avec le multimètre numérique se faisant avec un supplément de débit tellement faible que la lecture a les caractéristiques ci-dessus et est donc très précise. Bien sûr, le résultat de la mesure n'est plus la FEM, mais la tension en charge.

2. Mesure aux bornes d'une résistance

Si la mesure de la tension d'alimentation est primordiale, il faut mesurer aussi les tensions partielles développées dans le montage. Ces mesures se font toujours aux bornes de résistances matérielles ou apparentes. Les tensions apparaissant entre deux points du montage sont appelées, nous le savons, différences de potentiel, ou « ddp ». Nous allons étudier le problème sur un exemple pour vous montrer que, cette fois, ce n'est pas si simple (voir fig. 12).

Pour fixer les idées, imaginons que nous voulions mesurer la ddp apparaissant aux bornes d'une résistance de 47 kΩ traversée par un courant constant de 100 μA. La théorie (loi d'Ohm) nous donne la valeur à trouver : $U = R I$

soit : $U = 47\ 000 \times 100 \cdot 10^{-6} = 4,7\ V = 4\ 700\ mV$.

Connectons maintenant notre voltmètre numérique, en gamme 10 V, avec ses 10 MΩ de résistance interne, se plaçant en parallèle sur la résistance R et venant, on s'en doute, en diminuer la valeur. La formule des résistances en parallèle nous permet de calculer la résistance équivalente de cette association :

$$R_{\text{eq}} = \frac{(47 \cdot 10^3 \times 10 \cdot 10^6)}{(47 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^6)}$$

$R_{\text{eq}} \approx 46\ 780\ \Omega$

Le courant constant de 100 μA développe alors aux bornes de cette association, donc aux bornes du voltmètre, une tension mesurée de :

$$U = 46\ 780 \times 100 \cdot 10^{-6} = 4,678\ V$$

au lieu des 4,7 V prévus et réels ! L'erreur est de 4 700 - 4 678 = 22 mV. La tension affichée 4,67 V par un 2 000 points et 4,678 V par un 20 000 points. L'imprécision apportée par les conditions de mesure est de

$$(22 \times 100) / 4\ 700 = 0,468\ \%$$

à ajouter à l'erreur propre au multimètre et qui varie suivant sa classe.

Nous voici donc déjà assez loin de la précision théorique de notre appareil ! Pourtant 47 kΩ est une valeur bien banale de résistance, plus que courante dans les montages. Qu'en serait-il alors, si

cette résistance était plus élevée ?

La figure 13 vous livre la réponse à cette inquiétante question !

Pas brillant, n'est-ce pas ! 1 % d'erreur aux bornes d'une 100 kΩ, 9 % aux bornes d'une 1 MΩ et catastrophe... 50 % aux bornes d'une 10 MΩ !

Pour ne pas dépasser l'erreur typique du multimètre lui-même, soit 0,1 %, il ne faut pas mesurer aux bornes d'une résistance de plus de 10 kΩ.

Bien sûr, en dessous tout va bien et on retrouve petit à petit les conditions parfaites de la mesure aux bornes du générateur.

Vous êtes consterné ! Peut-être ignorez-vous que votre magnifique multimètre était capable de tels méfaits ? C'est pourtant ainsi, et il faudra vous en contenter, car la seule solution serait d'augmenter

dans de grandes proportions la résistance interne du voltmètre. Hélas ! on se heurte à un problème technologique insoluble : la réalisation de résistances de très haute valeur et de haute précision. De telles résistances, quand elles existent... et à quel prix ! dépassent rarement la centaine de mégohms, ce qui ne change pas beaucoup le problème.

Quelques multimètres présentent la particularité de rendre disponible l'entrée du convertisseur, sans passer par l'atténuateur, ce qui permet de retrouver la très haute impédance de cette entrée, mais seulement dans la fourchette de valeurs admissibles par le convertisseur. L'usage est donc très limité. Dans ces conditions, si l'impédance du voltmètre est de 1 000 MΩ, l'erreur additionnelle aux bornes de la résistance de 47 kΩ n'est que de 0,0047 %. Cette erreur n'est que de 1 % (au lieu de 50 %) aux bornes de la 10 MΩ. L'amélioration est donc importante.

En conclusion de cette analyse rapide du comportement du multimètre numérique en fonction voltmètre, nous constatons que, finalement, les problèmes sont exactement les mêmes qu'avec son concurrent à aiguille. Ce dernier est moins bon en gammes basses, peut-être meilleur en gammes hautes. Par contre, on attend beaucoup plus de précision du multimètre et, par conséquent, la déception est sans doute plus grande de constater qu'il n'est pas sans reproche ! Le gros danger des appareils numériques est la tendance naturelle qu'ont les utilisateurs à croire naïvement leurs indications. Il faut

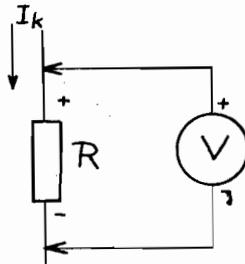


Fig. 12. - Mesure de d.d.p. Attention à l'erreur provoquée par le multimètre.

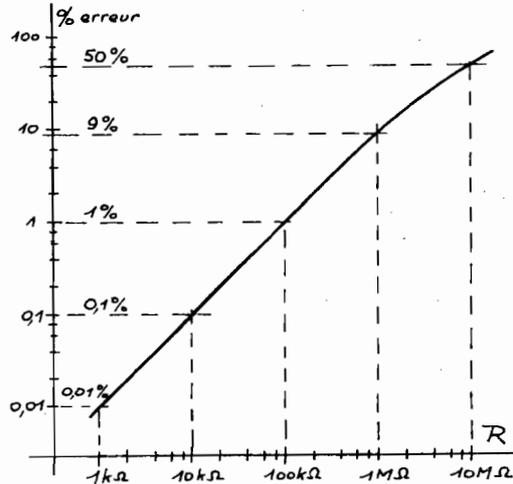


Fig. 13. - Variation de l'erreur en fonction de R (cf. fig. 11). $R_{\text{volt}} = 10\ M\Omega$.

simplement rester conscient des problèmes et en tenir compte !

III – Fonction Ampèremètre

Le galvanomètre des appareils à aiguille est sensible aux intensités ; il est donc parfaitement adapté à leur mesure. Il n'en est pas de même du convertisseur A/D qui est un voltmètre. Pour le transformer en ampèremètre, ce n'est pas très difficile : il suffit de faire passer l'intensité à mesurer dans une résistance de valeur connue et de mesurer la ddp développée aux bornes :

$$U = R I_x$$

La tension mesurée est bien proportionnelle à l'intensité à déterminer (voir fig. 14).

Malheureusement, ce principe simple a un inconvénient ! Le fait d'intercaler, dans le circuit sous mesure, cette résistance additionnelle, en modifie les caractéristiques : la résistance totale est augmentée, ce qui entraîne, évidemment, une réduction de l'intensité. La mesure se trouve ainsi quelque peu faussée !

Voyons ce fait plus en détail sur un exemple :

Supposons un générateur de 10 V, à résistance interne négligeable, débitant dans un circuit de résistance totale 100 Ω. Le calcul théorique donne la valeur de l'intensité réelle :

$$I = U/R = 10/100 = 0,1 \text{ A ou } 100 \text{ mA.}$$

Mesurons cette intensité, en gamme 200 mA, d'un multimètre dont le shunt mesure 10 Ω. En intercalant l'ampèremètre, la résistance totale passe à 100 + 10 = 110 Ω.

L'intensité devient $I' = 10/110 = 90 \text{ mA}$!

Cette intensité est affichée par l'appareil, soit 90 mA s'il s'agit d'un 2 000 points. L'erreur apportée par la mesure est ainsi de 10 % par rapport à la vraie intensité, avant connexion du multimètre. C'est déjà très gênant, même si nous n'envisageons pas les perturbations vicieuses que le branchement peut apporter au fonctionnement du circuit testé.

Passons maintenant en gamme 2 000 mA, le shunt mesurant alors 1 Ω. La résistance du circuit descend à

$$100 + 1 = 101 \Omega$$

et l'intensité indiquée par l'appareil est de $10/101 = 99 \text{ mA}$.

C'est beaucoup mieux, l'erreur n'étant plus que de 1 % avec un affichage de 99 en 2 000 points et 99 en 20 000 points.

Passons enfin en gamme 10 A, avec un shunt de 0,1 Ω. Nous lisons cette fois $10/(100 + 0,1) = 99,9 \text{ mA}$. Ce serait presque parfait, si l'afficheur donnait ce résultat. En fait, si c'est un 20 000 points, il ne marquera que 99 points, soit 0,099 A. Si c'est un 2 000 points, il indiquera 0,09 A !

Cette fois, le calibre est mal choisi, la lecture étant trop faible. Pour cette mesure, le meilleur calibre est de « 2 000 mA », vu ci-dessus !

Comme on le constate, le changement de gamme fait passer l'affichage de 90 mA à 99 mA, puis presque 100 mA. Il y a encore là matière à étonner quelques utilisateurs ! Le multimètre est presque toujours un médiocre ampèremètre.

Une caractéristique importante est la chute de tension apportée en fin de calibre. Cette chute de tension correspond d'ailleurs à la sensibilité du convertisseur. Ainsi, si le convertisseur donne son maximum pour 200 mV, cette valeur correspondra à la chute de tension de l'ampèremètre. Bien sûr, si le nombre de

points affichés est inférieur, la chute de tension sera réduite dans le même rapport. C'est d'ailleurs pourquoi, dans l'exemple précédent, la précision était meilleure en choisissant un calibre moins sensible. En pratique, toujours commencer la mesure par la gamme la moins sensible, 10 A, par exemple. Puis remonter les gammes et s'arrêter juste avant celle à partir de laquelle le résultat lu baisse nettement.

Ce serait le calibre « 2 000 mA », dans notre exemple, puisque, en passant en gamme plus sensible, la lecture tombe de 99 à 90 mA.

IV – Fonction Ohmmètre

Cette fois encore, la mesure doit se ramener à une mesure de tension, puisque le convertisseur ne sait faire que cela (voir fig. 15). Un courant constant I_k traverse la résistance R_x à mesurer et y développe une tension U proportionnelle à R_x .

Les différents calibres s'obtiennent en faisant varier la valeur du courant I_k . On peut d'ailleurs se reporter à la description de l'ohmmètre linéaire, parue dans le n° 1 702, dans cette série d'articles, et qui utilise justement le principe que nous venons d'indiquer. Dans ce cas, l'amplificateur opérationnel utilisé permet de connecter, sur le système, un voltmètre à basse impédance, sans perturbation.

Par contre, pour ce qui concerne les multimètres numériques, le montage se limite à celui de la figure 15. Il est donc impératif d'avoir un voltmètre à très haute impédance, pour mesurer la tension U . C'est

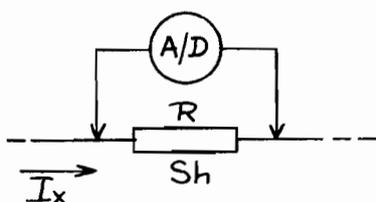


Fig. 14. – Principe de l'ampèremètre numérique. $U_{A/D} = R.I_x$.

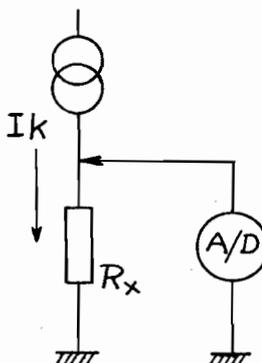


Fig. 15. – Principe de l'ohmmètre numérique. $U_{A/D} = I_k.R_x$.

heureusement le cas du convertisseur, lequel, avec ses milliers de mégohms, n'apporte qu'une charge insignifiante à la résistance sous mesure, même si sa valeur est grande. Il est ainsi possible de mesurer sans difficulté des résistances allant jusqu'à 20 M Ω .

Une particularité intéressante de l'ohmmètre numérique est l'absence de tarage. Le calage est fait à l'origine par le fabricant et est valable pour tous les calibres.

Sans précaution particulière, la tension maximum appliquée sur la résistance mesurée est égale à la sensibilité du convertisseur, soit généralement 200 mV. Une telle tension est insuffisante pour faire conduire une jonction de semi-conducteur, au silicium en particulier. Il faut donc avoir recours à un montage spécial pour une telle vérification. A noter que le résultat lu est sans signification précise comme nous l'avons déjà indiqué dans des lignes précédentes. On constate simplement la conduction ou le blocage de la jonction.

En définitive, la mesure des résistances au multimètre numérique est un vrai « régal » ! C'est une mesure sans problème, pour lesquelles le multimètre n'apporte guère d'imprécision supplémentaire. Par ailleurs, c'est sans doute l'une des rares mesures pour laquelle la grande précision de l'appareil est vraiment utile. On peut ainsi, par exemple, trier des résistances pour les besoins d'un montage performant, apparier des valeurs... Ne pas oublier cependant que, même en triant des résistances à 5 %, vous n'en ferez jamais des 1 %, car il reste le déli-

cat problème du coefficient de température qui est, évidemment, bien meilleur sur ces dernières que sur les autres.

Deux cas extrêmes de mesure de résistances peuvent retenir notre attention :

— **La mesure des faibles valeurs.** Souvent, le multimètre peut mesurer dans un premier calibre de 100 Ω , avec une résolution de 0,1 Ω . Cependant, dans ce cas, il faut savoir tenir compte de la résistance supplémentaire apportée par les cordons de liaison. Un dixième d'ohm, c'est très vite obtenu ! On vérifiera donc, en court-circuitant les cordons, que l'affichage donne bien « 0 » ! Sinon, noter la valeur affichée et la soustraire de la valeur trouvée pour la résistance mesurée.

— **La mesure des valeurs élevées.** Lorsque la valeur de la résistance mesurée dépasse le mégohm commencent à apparaître des problèmes d'induction. En effet le convertisseur a une impédance d'entrée très élevée et est donc particulièrement sensible. Il ne faut donc pas prétendre mesurer une résistance de 10 M Ω ou plus, au bout de fils non blindés faisant un bon mètre, et ceci sans ennui. Dans ce cas, on va constater que le résultat affiché est instable et « tourne » autour d'une valeur moyenne qui est celle qu'il faudrait lire. La perturbation correspond à un battement entre les cycles de mesure de l'appareil et la fréquence du réseau.

Pour réduire ou supprimer cet inconvénient, il convient de relier la résistance par des conducteurs blindés, avec terre éventuelle, ou plus simplement connecter cette résistance

aussi directement que possible au contrôleur.

Dans tous les cas, il faut éviter de mesurer une résistance, soudée dans un montage. Il y a en effet fort à parier que diverses résistances parasites se placent alors en parallèle et faussent complètement la mesure. Un moindre mal existe lorsque le montage n'est pas sous tension ! Par contre, si ce n'est pas le cas, remerciez le fabricant du multimètre d'avoir prévu ce genre d'étourderie ! Faute de cette précaution, vous seriez bon pour l'achat du dernier modèle, en réclame !

V — Mesures en alternatif

Rien de bien particulier à ajouter, si ce n'est que le multimètre numérique ne donne pas sa plus grande précision dans cette fonction ! Nous l'avons déjà vu avec le contrôleur à aiguille, la mesure de l'alternatif est chose difficile. Il y a le problème de la fréquence du signal : les multimètres courants ne dépassent pas quelques kilohertz. Il y a le problème de la forme : seuls les signaux sinusoïdaux sont mesurés correctement et avec une certaine précision. Pour toutes les autres formes, la mesure est sans signification précise. Comme le sinusoïdal parfait est rare comme les beaux jours, concluez vous-même !

Il existe, bien sûr, des multimètres de haut de gamme, possédant des circuits de mesure, des « tensions efficaces vraies » et qui donnent de ce fait des résultats exacts, quelle que soit la forme du signal.

Il ne reste que le pro-

blème de la mesure des petits signaux. Dans ce cas, un peu comme dans celui de la mesure des résistances élevées, il faut craindre les inductions parasites et, par conséquent, utiliser des sondes de préférence blindées.

Conclusion

Nous pensons que ces quelques considérations sur le multimètre numérique vous ont un peu éclairé sur les problèmes inhérents à cet appareil. Il serait vain, nous l'avons vu, de croire que ce multimètre, qui affiche un résultat en clair est au-dessus de tout soupçon ! Le multimètre numérique a, comme les appareils à aiguille, ses difficultés d'emploi, et il est tout simplement nécessaire d'en être bien conscient et constamment imprégné, pour en tirer bon usage.

Le multimètre numérique constitue, malgré tout cela, un progrès considérable et, s'il ne remplacera jamais le galvanomètre à aiguille pour la recherche d'un maximum, il tente de s'en rapprocher, puisque certains modèles combinent affichage digital et affichage analogique à échelle linéaire. Le nombre de points de cette échelle est encore un peu faible et donc peu précis, mais on peut faire confiance aux fabricants, ils feront sans doute mieux dans l'avenir !

Le multimètre numérique doit donc être considéré comme un appareil de base.

Il deviendra sans nul doute indispensable aux professionnels, mais aussi aux amateurs, s'il ne l'est pas déjà !

F. THOBOIS