

PRATIQUE DE L'ELECTRONIQUE (10<sup>e</sup> PARTIE)

# Les circuits linéaires

## Comment ne pas être piégé par les « tacts »

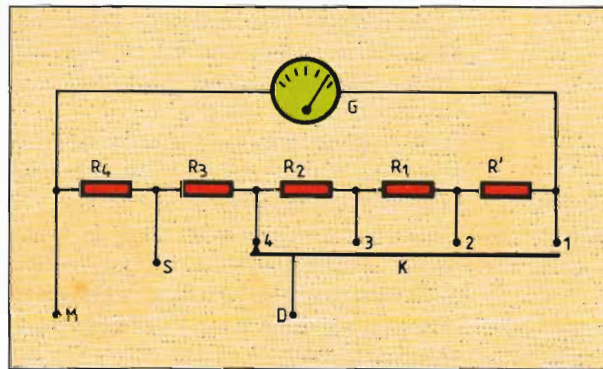
On sait depuis longtemps comment se tirer de ce vilain problème. Il suffit d'utiliser la disposition des shunts que l'on voit sur la figure 64.

Pour réaliser un ampèremètre à plusieurs échelles (nous supposons qu'il s'agit de courant continu pour simplifier le schéma), on emploie donc souvent le branchement indiqué sur cette figure. Cette disposition surprend un peu. En effet, on voit que, quand le contacteur K est dans la position 1, on n'a pas, entre les bornes D et M, une résistance « infinie ». C'était le cas dans la réalisation de la figure 63 : avec K en position L, la totalité du courant injecté par D allait dans  $R_0$ .

Dans l'ensemble schématisé par la figure 64, quand K est en position 1, il y a, entre D et M, une résistance non infinie (éventuellement grande) qui est la somme de  $R'$  et des résistances des shunts  $R_1$  à  $R_4$ . On pourrait la nommer un « shunt indésirable », car elle réduit la sensibilité de l'ensemble.

Par exemple, si l'on veut que la grande sensibilité soit de  $200 \mu\text{A}$  pour la pleine déviation, il faut prévoir un galvanomètre qui, sans aucun shunt, dévie à fond pour  $160 \mu\text{A}$ , par exemple. On s'arrangera donc pour avoir, sur l'échelle «  $200 \mu\text{A}$  », 20 % du courant total qui passe dans le « shunt indésirable » et 80 % dans le galvanomètre.

Le « shunt indésirable » devra donc avoir une résistance quatre fois plus forte que celle du galvanomètre.



## Tout revers a sa médaille

On peut se douter que la disposition des shunts indiquée sur la figure 64 n'a pas été choisie uniquement pour compliquer la vie des réalisateurs de contrôleurs universels. Si ce choix comporte l'inconvénient de réduire la sensibilité maximale du galvanomètre, il a, en revanche, l'immense mérite de faire la nique aux « tacts ».

Pourquoi ? Tout simplement parce que les différents résisteurs qui constituent les uns sont connectés une fois pour toutes. La résistance de contact existe toujours, bien entendu, mais elle n'intervient plus dans le partage du courant entre le shunt et le galvanomètre.

La figure 65 le montre plus clairement. Le résistor parasite qu'introduit le contact est figuré par un symbole classique de résistor, entouré d'un cercle. On voit que, en (a), ce résistor parasite intervient dans le partage du courant total  $I$  entre le courant  $i_S$  dans le shunt et le courant  $i_G$  dans le galvanomètre.

Fig. 64. – Dans la réalisation de la figure 63, la mesure est peu précise, surtout pour les fortes intensités, du fait de la résistance de contact du commutateur K. L'arrangement ci-dessus des shunts permet d'éliminer l'influence de cette résistance sur la mesure, mais il ne permet plus d'utiliser la pleine sensibilité de G.

En (b), en revanche, la répartition des courants  $i_S$  et  $i_G$  n'est pas influencée par la résistance de ce terme parasite, puisque cette répartition dépend uniquement du rapport de  $R_a$  à la somme  $R_b + R_G$ ,  $R_G$  étant la résistance du galvanomètre.

Nous avons précisé que la résistance de contact n'avait pas disparu : elle se trouve toujours en série entre les bornes M et P, mais la chute de tension aux bornes du résistor correspondant n'influe pas sur le partage des courants.

Cette chute de tension peut, évidemment, gêner l'utilisateur, mais relativement peu. Si elle n'est que de quelques millivolts, nous dirons « tant pis », puisque cela n'affecte pas la précision de la mesure. Si le résistor parasite avait, comme dans le cas de la figure 65(a), quelques millivolts de chute de tension auraient eu un effet désastreux, en rendant la mesure fautive.

Il ne faut pas, cependant, que la chute de tension due à ce terme parasite entraîne une perturbation du circuit prin-

cipal (celui dans lequel passe l'intensité à mesurer). Il ne faut pas, non plus, qu'un courant trop élevé, passant dans ce résistor parasite, le fasse chauffer, au point de détériorer le contacteur.

C'est la raison de la présence de la sortie séparée S sur la figure 64. Il s'agit, par exemple, du calibre 10 A, et l'on n'a pas voulu faire passer un tel courant dans le « tact » du commutateur K.

Donc, quand on veut mesurer un courant allant jusqu'à 10 A, on utilise les bornes M et S. Pour les courants plus petits, on utilise les bornes M et D, et, alors, le courant à mesurer passe par le contacteur. Quand on emploie les bornes M et S, la position de K est indifférente.

### Revenons à l'amplificateur opérationnel

Après cette digression sur les shunts et les « tacts », revenons à l'utilisation de l'amplificateur opérationnel, avec le montage de la figure 66.

Va-t-il falloir, là aussi, demander un galvanomètre déviant à fond pour un peu moins d'un milliampère, en raison de l'effet de « shunt parasite » introduit par le montage particulier des résistors de shunt ?

Mais non, ce ne sera pas nécessaire. Le « shunt parasite » a une résistance qui vaut :

$$S_P = R' + R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Donc, il ne consommera une proportion notable de courant « parasite » que si  $R_0$  n'est pas négligeable par rapport à  $S_P$ . D'où la conclusion : nous allons diminuer  $R_0$ . Jusqu'où ? Mais pourquoi pas jusqu'à zéro ?

### On supprime $R_0$

L'auteur a l'impression d'entendre déjà les hurlements de protestation des lecteurs : « Non mais, ça va pas ? Vous nous avez demandé un gros effort pour comprendre l'utilité du résistor  $R_0$ , et, maintenant, vous voulez le supprimer ! » Ne vous inquiétez pas, on va le retrouver, ce  $R_0$  ! Si nous supprimons, sur la figure 66, le résistor  $R_0$ , commençons par voir ce qui se passe quand K est en position 1.

La résistance d'entrée de l'ensemble amplificateur opérationnel-pont de diodes-galvanomètre, tel qu'il est représenté sur la figure 61, est, nous l'avons dit, **NULLE**.

Quel est l'effet d'un shunt mis en parallèle sur un appareil de mesure de résistance nulle ? Exactement le même que celui « d'un emplâtre sur une jambe de bois », autrement dit : nul.

Donc, sur l'ensemble de la figure 66, si  $R_0$  a été supprimé et que K soit en position 1, toute l'intensité injectée sur la borne D va dans le pont de diodes, et rien ne va dans le shunt. Si petite que soit la résistance de ce dernier, comme il y a une tension nulle à ses bornes (n'oubliez pas la « règle d'or » des amplificateurs opérationnels), le regretté Ohm nous enseigne que le courant passant dans ce shunt est nul.

Tout se passe comme s'il n'y avait pas de shunt, l'effet parasite signalé plus haut est donc éliminé.

Mettons maintenant K dans la position 2. Maintenant, le courant injecté en D va se partager en deux : une partie va à gauche, dans  $R_1$  à  $R_4$ , l'autre va à droite dans  $R'$ .

Voilà : nous l'avons retrouvé, le  $R_0$  : c'est maintenant  $R'$ . Nous pouvons as-

sez facilement établir la valeur des shunts. Supposons que nous souhaitions avoir, en position 2, une sensibilité dix fois moins grande qu'en position 1. Il suffira, pour y arriver, que la valeur de  $R'$  (que nous pouvons choisir de façon quasi arbitraire) soit neuf fois plus grande que la somme :

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Si, par exemple, nous avons choisi  $R' = 18 \Omega$ , il faudra que la somme des shunts de  $R_1$  à  $R_4$  fasse  $2 \Omega$ .

Arrivons à la position 3 de K, où l'on souhaite, par exemple, avoir une sensibilité cent fois moins grande qu'en position 1. L'intensité injectée en D va, d'une part, à droite vers l'amplificateur opérationnel à travers  $R_1$  et  $R'$ , et d'autre part, à gauche, vers M, à travers  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$ . Il faut donc que  $R_1 + R'$  soit 99 fois plus grande que la somme  $R_2 + R_3 + R_4$ . Autrement dit, cette dernière somme sera petite - inférieure à  $(18+2)/99 = 0,2 \Omega$  -, ce qui nous indique que  $R_1$  est voisin de  $1,8 \Omega$ .

### Pour calculer plus facilement

Le calcul des valeurs de  $R_1$  à  $R_4$  nécessite donc de procéder par approxima-

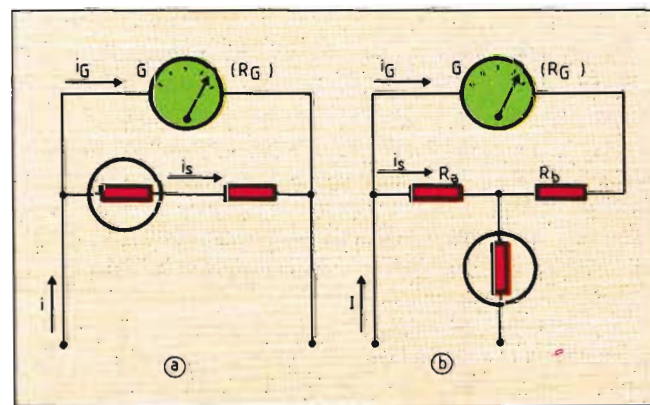


Fig. 65. - Le résistor parasite (entouré d'un cercle) que constitue le contact de K est, dans le montage (a), en série avec le shunt, il modifie la répartition des courants  $i_s$  et  $i_G$ . A l'opposé, en (b), qui correspond à la disposition de la figure 64, le résistor parasite ne modifie plus la répartition de ces courants, il n'affecte plus la précision.

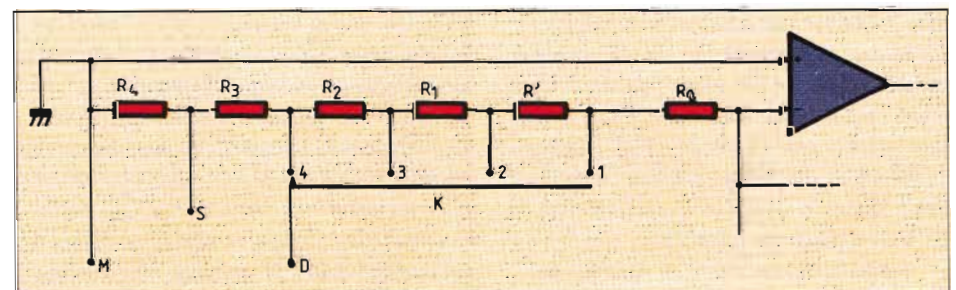


Fig. 66. - Appareil de mesure d'intensité alternative à plusieurs échelles, avec une prise séparée S pour les fortes intensités (qui pourraient détériorer K).

tions successives (ou de laisser travailler un ordinateur). Mais on peut faire plus simple, en changeant un peu de point de vue. Au fond, qu'est-ce qu'un shunt ? Un résistor dans lequel le passage du courant à mesurer fait naître une tension que l'on applique à un galvanomètre, cette tension étant celle qui le fait dévier à fond.

Ce dernier point peut surprendre. Un galvanomètre, prévu pour mesurer une intensité, n'est pas fait, en principe, pour qu'on lui applique une tension donnée. Exact, mais, pour le faire dévier à fond (intensité  $I$ ), s'il a une résistance  $R_G$ , cela revient bien à lui appliquer la tension :  $I \times R_G$

Alors, il devient normal d'utiliser le montage de la figure 67. Le passage du courant à mesurer dans les résistances  $R_1$ , ou  $R_1 + R_2$ , ou  $R_1 + R_2 + R_3...$  provoque l'apparition, aux bornes de ce résistor (ou de cette chaîne de résistances), d'une tension. On la retrouve intégralement entre le point (A) et la masse, puis l'entrée de l'amplificateur opérationnel ne consomme aucun courant. On retrouvera  $k$  fois cette tension en  $V_0$ , à la sortie de l'amplificateur, puisque nous l'avons monté en amplificateur de tension.

Dès lors, il suffira de l'appliquer, à travers un résistor, à l'entrée E du montage de la figure 62, et le tour sera joué. Le calcul des valeurs des shunts, dans ce cas, est extrêmement simple. Nous supposons, par exemple, que nous ayons admis une chute de tension maximale (déviations à pleine échelle) de 0,1 V. Si, entre M et S, on veut une sensibilité de 10 A, il faudra que 10 A provoque, dans  $R_1$ , une chute de tension de 0,1 V. Donc,  $R_1 = 0,01 \Omega$  exactement.

On souhaite, pour la position 4 de K, une sensibilité de 1 A entre M et D. Il faut donc que 1 A, passant dans  $R_1 + R_2$ , provoque une chute de tension de 0,1 V, donc la somme de ces deux résistances doit être égale à 0,1  $\Omega$ , donc :

$$R_2 = 0,1 - 0,01 = 0,09 \Omega$$

Si l'on veut que la position 3 de K corresponde à une sensibilité de 100 mA, il faut que la chute de tension dans l'ensemble  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  soit de 0,1 V sous 100 mA, soit une résistance totale de 1  $\Omega$  donc une valeur de 0,9  $\Omega$  pour  $R_3$

De même, avec  $R_4 = 9 \Omega$ , la position 2

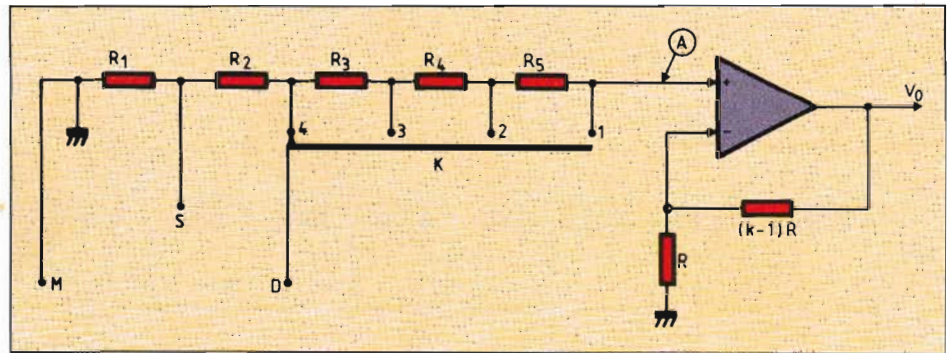


Fig. 67. — Ici, on emploie un principe différent : l'intensité à mesurer provoque, dans une chaîne plus ou moins longue de résistances remplaçant les shunts, une tension que l'on amplifie  $k$  fois.

de K correspond à une sensibilité de 10 mA, et il faudra  $R_5 = 90 \Omega$  pour avoir une sensibilité de 1 mA en position 1 de K.

Avec un résistor  $R_6$ , de résistance égale à 900  $\Omega$ , en ajoutant une position au contacteur K, nous aurions une échelle de 0,1 mA.

Dans le montage de la figure 67, nous bénéficions de l'avantage inhérent au montage particulier des shunts, analogue à celui des figures 64 et 66. Nous avons, par ce choix, éliminé l'erreur de mesure due aux « tacts ».

En effet, la tension présente en (A) est bien due à la chute de tension dans les shunts, mais elle ne prend pas en compte la chute de tension dans la résistance parasite du contact de K.

En plus, nous avons éliminé l'effet de « shunt parasite », puisque l'entrée (A) ne consomme aucun courant.

### La « parole » est au fer à souder

Il est grand temps de passer à l'action, ce que nous ferons donc, mais il eût été inadéquat que nous le fissions plus tôt (un bon imparfait du subjonctif, de temps en temps, ne fait de mal à personne !).

Précisons, pour commencer, ce que va pouvoir faire notre instrument, dont la figure 68 donne le schéma détaillé.

Utilisant un galvanomètre de 1 mA (nettement moins cher qu'un modèle de 100  $\mu$ A), il va permettre les mesures des courants continus et alternatifs (sinusoïdaux) sans commutation, avec indication automatique de la nature du courant mesuré (continu positif, continu

négatif, alternatif). Il aura des échelles allant de 10  $\mu$ A pour la pleine déviation à 10 A, et une chute de tension de 100 mV à pleine échelle.

En gros, il se décompose en une première partie, avec les shunts et l'amplificateur opérationnel  $A_1$ , qui reprend le système de la figure 67. La seconde partie, avec l'amplificateur opérationnel  $A_2$ , les diodes et le galvanomètre, est très proche du montage de la figure 62. Enfin, un jeu de deux transistors permet de connaître la polarité.

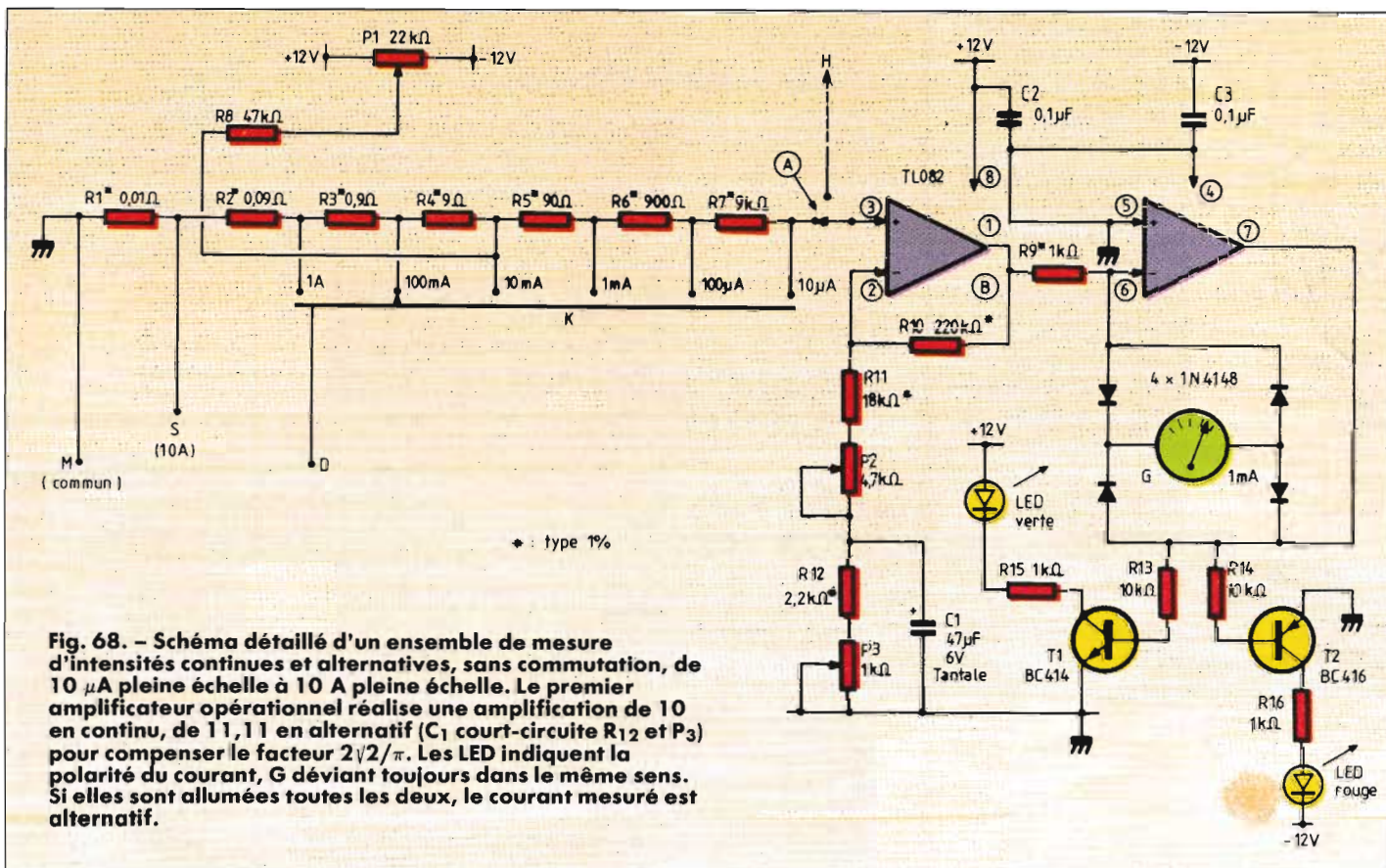
Pour ce qui est du système des shunts, rien à signaler : il est conforme à ce que nous avons vu plus haut. La seule chose qui puisse surprendre est le résistor de 47 k $\Omega$  arrivant entre les shunts de 9 et 90  $\Omega$  : il s'agit tout simplement de la correction d'offset de  $A_1$ .

Suivant la position du curseur de  $P_1$ , on injecte par la 47 k $\Omega$   $R_8$  un courant qui peut aller de - 0,25 à + 0,25 mA vers la masse, à travers les shunts qui totalisent 10  $\Omega$ . On ajoute ainsi à la tension due au courant qui traverse les shunts une tension constante, ajustable entre - 2,5 et + 2,5 mV.

### Continu/alternatif sans commutation

Un autre point de différence entre l'amplificateur  $A_1$  de la figure 68 et celui de la figure 67 est la présence de plusieurs résistances et d'un condensateur dans le réseau de contre-réaction.

D'abord, en continu (et alors, tout se passe comme si  $C_1$  n'existait pas), nous voulons, entre les points (A) et (B), un gain proche de 10, ajustable de  $\pm 5 \%$ . Cet ajustage permet de compenser un



écart éventuel entre la valeur vraie de R<sub>9</sub> et 1 000 Ω (valeur théorique), ainsi qu'une éventuelle erreur dans l'intensité de déviation maximale de G (théoriquement 1 mA).

En alternatif, nous souhaitons un gain de 11,11 entre le point (A) et le point (B), pour compenser ce fameux coefficient  $2\sqrt{2}/\pi$ . Le condensateur C<sub>1</sub>, dès que la fréquence est suffisante (20 Hz), constitue un quasi-court-circuit pour le résistor R<sub>12</sub> et le potentiomètre P<sub>3</sub>. Pour le réglage, on opère donc d'abord en alternatif (à 50 Hz, par exemple) en réglant l'étalonnage de l'appareil par ajustage de P<sub>2</sub> (un ajustable à dix tours de préférence). Une fois ce réglage fait, on opère en continu, et on étalonne l'appareil en jouant sur P<sub>3</sub>.

### Indication de polarité

L'intérêt de l'utilisation du système de diodes même en continu est que le galvanomètre dévie toujours dans le même sens, que le courant à mesurer passe de D vers M, ou de M vers D.

On n'a donc jamais besoin de permuter le branchement des fils vers l'entrée de l'appareil, comme on doit le faire avec un contrôleur passif classique.

Mais il faut connaître le sens du courant.

Or le potentiel de l'entrée (6) de l'amplificateur opérationnel est maintenu à zéro (règle d'or). Donc, dès qu'il passe un peu de courant dans l'ensemble de G et des quatre diodes, la sortie (7) de l'amplificateur est immédiatement :

- soit au-dessus de + 0,9 V ;
- soit au-dessous de - 0,9 V, comme le montre la courbe de la figure 60.

Donc, si le courant d'entrée est « positif » (allant de D vers la masse, ou de S vers la masse pour une intensité supérieure à 1 A), le point B est positif, donc la sortie (7) du TL 082 est négative, au-dessous de - 0,9 V.

Alors, par le résistor R<sub>14</sub>, on débloque (et on sature) le transistor T<sub>2</sub>, ce qui provoque l'allumage de la LED rouge.

A l'opposé, si le courant d'entrée est « négatif », la sortie (7) de l'amplificateur opérationnel est positive, ce qui

débloque et sature le transistor T<sub>1</sub>, via R<sub>13</sub>, allumant la LED verte.

Avec un courant alternatif, les deux LED sont allumées en même temps (en fait, alternativement, mais on a l'impression qu'elle sont allumées toutes les deux en permanence).

Les condensateurs C<sub>2</sub> et C<sub>3</sub> sont là pour découpler les alimentations en VS+ et VS- de l'amplificateur opérationnel, ainsi qu'on l'a montré sur la figure 43.

Reste le commutateur K'. Normalement, il est dans la position représentée sur la figure, et l'appareil est un ampèremètre universel. Mais, si on le met sur l'autre position, on dispose alors, en H, de l'entrée d'un voltmètre continu/alternatif sans commutation, donnant la déviation totale pour 0,1 V d'entrée.

En adjoignant quelques diviseurs de tension, on compléterait l'instrument en le rendant apte à mesurer aussi les tensions continues et alternatives sans commutation. Mais, comme le disait Rudyard Kipling : « This is another story. »

J.-P. OEHMICHEN