

Pratique de la mesure

# AMELIORATION DES AMPEREMETRES

**N**OUS avons vu, le mois dernier, que la mesure d'une intensité à l'aide du contrôleur universel était perturbante. Le mal venait de la résistance trop forte de l'ampèremètre ainsi constitué, résistance ayant pour effet de réduire quelque peu l'intensité du circuit en fonctionnement, d'où évidemment une mesure erronée.

Peut-on remédier à ce grave défaut des ampèremètres ? Certes oui ! Dans une certaine « mesure » ! Et c'est ce que nous allons voir dans les lignes qui suivent.

## I - Qualité du galvanomètre

Il existe tout d'abord des galvanomètres meilleurs que d'autres à ce point de vue. Si nous considérons, par exemple, celui du Centrad 819, nous lui trouvons les caractéristiques suivantes : 40  $\mu$ A, 1 600  $\Omega$ . Donc une sensibilité de 40  $\mu$ A avec un cadre mobile dont le bobinage de fil très fin a une résistance de 1 600  $\Omega$ . La Loi d'Ohm nous permet de calculer la tension à appliquer aux bornes de ce cadre pour une déviation pleine échelle :

$$U = RI$$

$$1\,600 \times 40 \cdot 10^{-6} = 64 \text{ mV}$$

Il s'agit d'une performance correcte et la chute de tension maximale apportée par cet appareil devrait être de cette valeur, ce qui n'est pas trop gênant : moins de 1/10 de volt !

Nous possédons un autre galvanomètre de sensibilité 1 mA et dont le cadre ne mesure que 23  $\Omega$  ! Cet appareil n'apporte donc à pleine échelle qu'une chute de tension de  $23 \times 1 \cdot 10^{-3}$  soit 23 mV. C'est donc encore bien mieux, la sensibilité étant toutefois 25 fois moins forte !

## II - Place des shunts

Nous savons qu'un galvanomètre s'utilise rarement seul, mais presque toujours en association avec des shunts permettant de diminuer sa sensibilité. Nous avons vu, dans le précédent article, que ces shunts pouvaient être disposés de deux manières, soit de manière indépendante, avec sélection par commutateur, soit en shunts fractionnés, ce qui

permet d'avoir les différents calibres sans commutation.

Dans le premier cas, le schéma se ramène à celui de la figure 1 pour chaque calibre. Comme on a, de toute évidence,  $U_{AB} = U_{CD}$ , quelle que soit la valeur du shunt, la performance du galvanomètre est conservée, la chute de tension du groupement étant égale à la chute de tension du galvanomètre seul. Ainsi monté, le galvanomètre du 819 Centrad ne chuterait que 64 mV, quel que soit le calibre !

Mais en réalité, dans ce contrôleur, le montage retenu est le second, celui à

shunts fractionnés. La figure 2 donne d'ailleurs la disposition exacte et les valeurs des différents éléments, pour les six calibres possibles. (Voir exercice corrigé de ce mois.)

Il est facile de constater que, dans ce système, les shunts « inutiles » viennent se placer en série avec le cadre et en augmentent la résistance, d'où détérioration de la performance retenue plus haut.

Ainsi en gamme « 5 mA », par exemple, le shunt « utile » mesure :  $0,064 + 0,576 + 5,76 + 57,6 = 64 \Omega$ .

Les shunts « inutiles » 576 + 5 760 sont en série

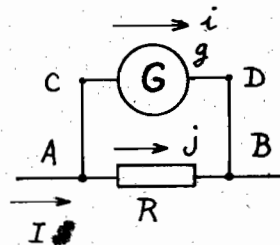


Fig. 1. - Shunt indépendant.

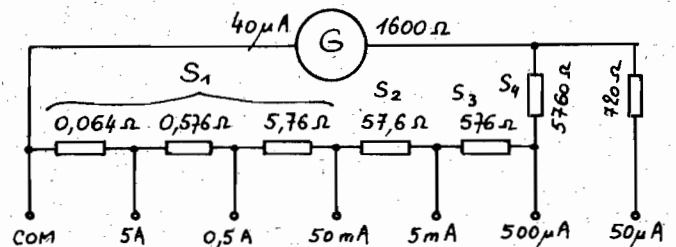


Fig. 2. - Shunts fractionnés.

avec le cadre portant sa résistance totale à :  
 $1\ 600 + 576 + 5\ 760 = 7\ 936\ \Omega$ .

Les deux chaînes sont en parallèle l'une sur l'autre et présentent ainsi une résistance équivalente  $R_{eq}$  telle que  $1/R_{eq} = 1/64 + 1/7\ 936$  d'où l'on tire  $R_{eq} = 63,488\ \Omega$ .

La chute de tension apportée par le système est alors de :

$$U = RI = 63,488 \times 5 \cdot 10^{-3} = 317,5\ \text{mV, soit cinq fois plus que ne le permettrait le galvanomètre monté selon la première méthode !}$$

Nous avons vu que, malheureusement, cette solution, bien meilleure sur le plan électrique, présentait des inconvénients pratiques au niveau de la commutation des shunts indépendants. C'est évidemment pourquoi on la trouve assez rarement dans les contrôleurs universels. La solution de la figure 2 est beaucoup plus fiable et beaucoup plus économique !

A noter que si nous utilisons notre milliampèremètre 1 mA/23  $\Omega$ , convenablement shunté pour avoir une sensibilité égale à celle de l'exemple, nous aurions toujours nos 23 mV de chute maximum, soit 14 fois mieux que le 819 Centrad !!

### III - Amélioration par amplification

Il existe bien sûr une autre possibilité permettant d'améliorer les performances d'un ampèremètre, c'est celle du montage d'un interface amplificateur.

Par exemple, il est parfaitement possible de reprendre notre adaptateur « voltmètre » et de nous en servir pour améliorer la fonction ampèremètre. Il suffira pour cela de monter

des shunts extérieurs, de les faire traverser par le courant à mesurer, puis d'amplifier la tension développée aux bornes avant de l'envoyer dans le galvanomètre.

Pour rester dans les limites du raisonnable, nous pouvons ainsi nous fixer une chute de tension maximale admissible de 10 mV, ce qui améliore tout de même de 10 à 30 fois les performances du 819, puisque nous avons raisonné sur cet appareil en exemple. Au-delà, en augmentant l'amplification, nous risquons d'avoir des difficultés avec les inductions parasites, sans gros avantage en contrepartie.

La modification à l'adaptateur est minime. Voir figure 3. Elle se limite au montage d'une batterie de shunts, à la modification de la valeur de  $R_1$ , à la pose d'un inverseur Tensions/Intensités. (Se reporter au n° 1 694 de Juillet.)

On note l'utilisation de shunts fractionnés. Le courant à mesurer traverse le shunt choisi et y développe une tension appliquée à travers  $R_1$  à l'entrée  $e^-$  de l'ampli OP. Cette résistance passe sensiblement à

50 k $\Omega$  (utiliser l'entrée I de la figure 1, p. 53, n° 1 694) tandis que la résistance  $R_3$  est supprimée, par  $INV_1$ , mettant l'entrée  $e^+$  directement à la masse, donc au point commun du pont de mesure.

Le gain de l'ampli OP est égal à  $R_2/R_1$  soit à  $1,5\ \text{M}\Omega/50\ \text{k}\Omega = 30$  ce qui donne une sensibilité 10 fois plus élevée que dans la gamme 0,1 V de l'adaptateur en voltmètre, soit de 10 mV à pleine échelle. Pour cela, il faudra placer le commutateur de gammes de l'adaptateur sur l'une des trois gammes 0,1 ou 1 ou 10 volts, sélectionnant la résistance  $R_2$  de 1,5 M $\Omega$ .

La suppression de  $R_3$  permet de corriger un décalage du 0 qui a tendance à apparaître avec cette élévation du gain.

On remarquera que nous avons utilisé la technique des shunts fractionnés, pourtant critiquée dans les lignes précédentes. Seulement ici, les shunts « inutiles » ne sont traversés que par le courant d'entrée de l'amplificateur. Or ce courant est au maximum de  $I = U/R = 10\ \text{mV}/50\ \text{k}\Omega$  soit de 0,2  $\mu\text{A}$  ! Ce courant

ne peut donc développer dans les shunts « inutiles » qu'une tension de  $0,2 \times 11 = 2,2\ \mu\text{V}$ , tension dérisoire que le galvanomètre est bien incapable de discerner, avec sa sensibilité réglée à 10 mV !

Les deux premiers shunts sont à prendre dans la gamme 1 % commerciale : 10  $\Omega$  et 1  $\Omega$ . Ce sont des valeurs disponibles. Une puissance de 1/4 W est largement suffisante. Le shunt de 0,1  $\Omega$  se trouve déjà plus difficilement, surtout en précision de 1 %. Il est bien plus simple et économique de le fabriquer en fil de constantan de 4/10. Signalons que ce fil en alliage résistant a un coefficient de température très faible et qu'il se soude très bien à l'étain. (La maison Selectronic a ce genre de fil au catalogue, dans les diamètres préconisés). Le constantan de 4/10 mesure 3,8  $\Omega/\text{m}$ . Il en faut donc environ 2,7 cm pour avoir les 0,1  $\Omega$  désirés !

Le shunt de 0,01  $\Omega$  se fera aussi en constantan, mais de diamètre 10/10, faisant 0,8  $\Omega/\text{m}$ . Comme il n'en faudrait que 1,25 cm pour avoir la résistance voulue, il est préférable d'associer deux longueurs doubles en parallèle, soit deux morceaux de 2,5 cm environ.

Enfin, pour le shunt de 0,001  $\Omega$ , on utilisera tout simplement du fil de cuivre étamé de 10/10. Une longueur de 5 à 6 cm donne sensiblement la résistance désirée.

Le montage pratique se fait très facilement. Les bornes d'entrée de mesure des intensités peuvent être des douilles bananes de 2 mm, placées à 2 cm les unes des autres. Les shunts sont soudés directement entre les douilles. On emploiera un fer à souder bien chaud et de taille suffisante

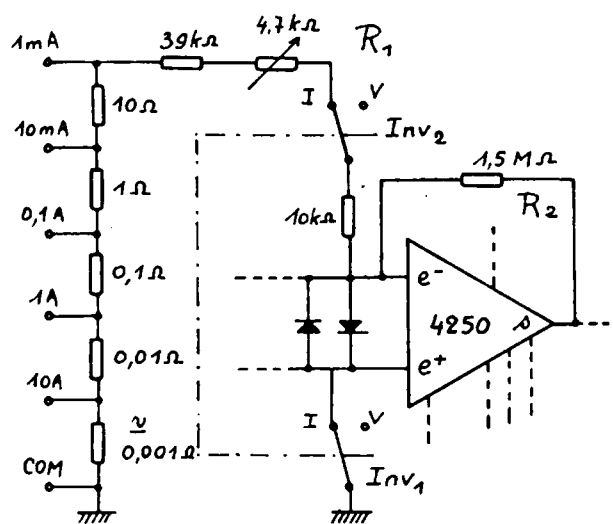


Fig. 3. - Adaptateur modifié pour la mesure des intensités.

pour que la soudure fonde parfaitement. On évitera ainsi les « collages » fréquents dans les réalisations des débutants... et parfois des autres !

On soudera définitivement les shunts de 10 et 1 Ω. Les autres shunts seront provisoirement soudés « trop longs » de manière à autoriser leur réglage : il est possible de raccourcir, mais pas de rallonger !

La résistance  $R_1$  est constituée de la résistance de 10 kΩ se trouvant déjà sur le circuit imprimé et d'une partie supplémentaire en série amenant la valeur finale aux environs de 50 kΩ. On pourra incorporer une partie ajustable, de valeur relativement faible, 4,7 kΩ par exemple. Signalons qu'une résistance ajustable est toujours un élément apportant de la dérive en temps et en température.

Commencer par le calage du gain de l'amplificateur. Pour cela, faire passer un courant de 1 mA dans le calibre correspondant et amener le galvanomètre en fin d'échelle par le réglage de  $R_1$ . Bien sûr, pour cette opération, il faut un générateur stable, une résistance extérieure réglable et un autre ampèremètre permettant le réglage par comparaison. Si vous pouviez disposer d'un multimètre numérique pour ce faire, ce serait parfait, mais nullement indispensable. On peut également se servir du contrôleur même, à condition d'avoir un générateur très stable et surtout en tension suffisamment élevée pour que l'introduction du contrôleur en ampèremètre dans le circuit ne fasse pas baisser sensiblement l'intensité. En effet, dans ce cas, il faut d'abord se servir de l'appareil pour régler l'intensité passant dans le shunt exactement à

1 mA, puis le contrôleur est enlevé du circuit et branché à la sortie de l'adaptateur. Il reste alors à régler la déviation à pleine échelle.

Le gain de l'amplificateur étant ainsi réglé, il faut maintenant étalonner les shunts de constantan et de cuivre. On commencera par le shunt 10 A.

Faire passer dans ce calibre, une intensité de 10 A exactement réglée à l'aide d'un ampèremètre annexe de préférence. En principe, le shunt ayant été prévu trop long, la déviation du contrôleur de sortie doit être trop grande. Il faut donc réduire petit à petit la longueur du fil de cuivre jusqu'à amener l'aiguille exactement en fin d'échelle. A chaque retouche, attendre le refroidissement des soudures pour tirer une conclusion, car les jonctions peuvent créer des tensions parasites à température élevée.

Quand le calibre 10 A est réglé, passer au calibre suivant, 1 A, et procéder de la même manière. Terminer par le réglage du calibre 100 mA.

En principe, si le travail est bien fait, il n'y a pas de retouche à faire sur les calibres 10 et 1 mA. Bien sûr, on l'a compris, ce travail est assez long et un peu délicat. Il nécessite un bon générateur externe (mais

une batterie 12 V de bonne capacité peut faire l'affaire) et surtout un second ampèremètre de comparaison aussi précis et exact que possible. Mais, si vous menez à bien ces manipulations, simples par ailleurs et très pédagogiques, vous aurez la satisfaction de posséder un montage vous permettant de mesurer de 1 mA, pleine échelle, à 10 A avec une chute de tension maximale de 10 mV, ce qui n'est pas très courant et vous libère presque totalement des inquiétudes quant aux perturbations apportées par cette mesure dans le circuit sous test !

#### IV L'ampèremètre parfait !

Pour en terminer sur la mesure des intensités continues, nous ne pouvons passer sous silence, les montages permettant de mesurer une intensité avec un système quasi parfait puisque ne provoquant qu'une chute de tension de l'ordre du Microvolt ! Malheureusement, comme nous le verrons, ces montages ne conviennent qu'à la mesure des intensités faibles, voire très faibles.

Le montage utilisé est très simple et utilise encore un amplificateur opération-

nel. Cet ampli OP peut être un modèle quelconque, par exemple ce peut être le même LM 4 250, choisi pour réaliser l'adaptateur précédemment décrit.

Voir figure 4. Le courant à mesurer passe apparemment de l'entrée  $e^-$  à l'entrée  $e^+$  puisque ces deux entrées sont directement connectées aux bornes de mesure. On remarque donc la disparition de la résistance d'entrée  $R_1$  du schéma précédent.

Pour bien comprendre le fonctionnement du montage, il faut connaître les deux principes de base des amplis OP :

- La tension entre les entrées  $e^-$  et  $e^+$  d'un ampli OP peut être considérée comme nulle en fonctionnement normal.

- Le courant des entrées  $e^+$  et  $e^-$  peut aussi être considéré comme nul. L'ampli OP idéal doit appliquer strictement ces deux principes ! L'ampli OP réel s'en approche d'autant plus près qu'il est meilleur. De toute façon, même si l'ampli n'est pas parfait, il faut, dans une première approche, appliquer ces deux lois pour « décortiquer » la question, quitte à apporter plus tard quelques retouches de détail, en fonction des anomalies constatées.

Ainsi, si l'on applique ces principes au schéma de la figure 4 :

- $U_{e^-/e^+} \simeq 0$ , donc le passage du courant à mesurer entre les bornes d'entrée ne détermine aucune chute de tension parasite. Pratiquement, cette tension sera très faible, variant entre 1 mV et 1 μV selon le type et la qualité de l'ampli OP. L'ampèremètre ainsi constitué sera donc presque parfait, sans chute de tension interne décelable.

- $i_{e^-} \simeq 0$  donc  $i_{R_2} = i$ . L'intensité à mesurer passe

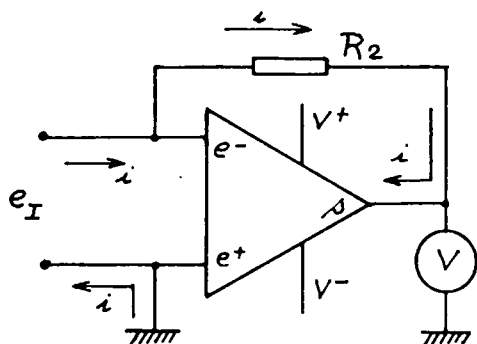


Fig. 4. - « L'amplificateur parfait ».

intégralement dans  $R_2$  et y développe une tension  $U = R_2 i$ , mais comme le potentiel de  $e^-$  est égal à celui de  $e^+$ , ce dernier étant le potentiel de masse, il en est de même de celui de  $e^-$ . La tension  $U$  peut donc se mesurer entre  $S$  et masse, ce que fait le voltmètre de sortie dont l'indication est proportionnelle à  $i$  et qui peut ainsi être étalonné en conséquence. Voir le schéma complet du système en figure 5.

En faisant  $R_2 = 3\,000\ \Omega$ , un courant  $i$  de  $100\ \mu\text{A}$  développe une tension  $U$  à mesurer en  $S$ , de  $3\,000 \times 100 \cdot 10^{-6} = 300\ \text{mV}$ . Pour changer de calibre, il suffit simplement de changer la valeur de  $R_2$ . Par exemple, en faisant  $R_2 = 300\,000\ \Omega$ , on disposera d'un calibre 100 fois plus sensible, donnant les 300 mV de sortie pour un courant d'entrée de  $1\ \mu\text{A}$  seulement.

Un tel montage permet

de mesurer des intensités très faibles de l'ordre du nanoampère (nA) : Avec  $R_2 = 3\ \text{M}\Omega$ , les 300 mV s'obtiennent avec  $i = 100\ \text{nA}$  ce qui permet de lire le nanoampère sur une échelle graduée de 0 à 100.

Mais le courant  $i$  doit bien repartir quelque part, après son passage dans  $R_2$ . Il ne le peut pas dans le voltmètre que nous supposons parfait ! Il faut donc, comme le montre la figure 4, que ce courant re-

tourne à la masse à travers le circuit interne de sortie de l'ampli OP. On devine alors pourquoi ce système n'est utilisable que pour la mesure des courants faibles. Il est évidemment impossible de faire passer 10 A dans un ampli OP ! On ne pourra donc pas dépasser le milliampère avec des amplis classiques.

Pour ceux que la chose intéresse, nous donnons ci-dessous, un tableau contenant les valeurs à monter

### Solution des exercices du mois dernier

**Calcul des shunts à placer sur un galvanomètre de  $50\ \mu\text{A}/1\,000\ \Omega$  pour avoir les calibres 100 mA, 1 A, 2 A, 5 A, 10 A**

Dans un tel problème, pour lequel le même type de calcul doit être répété plusieurs fois, il est avantageux de traiter la question généralement afin de tirer une formule dans laquelle il suffira de reporter les données particulières à chaque cas. Voir figure 1. L'intensité à mesurer est  $I$ , celle passant dans le galvanomètre est  $i$ , celle passant dans le shunt est  $j$ . La résistance du galva est  $g$ , celle du shunt, donc l'inconnue du problème est  $R$ .

● La loi des courants dérivés permet d'écrire :  
 $I = i + j$  ou  $j = I - i$

● La loi d'Ohm appliquée entre A et B donne  
 $g \times i = R \times j$  ou  $R = gi/j$

$$\text{donc } R = \frac{gi}{I-i}$$

Il reste à remplacer les données par leur valeur :

$$g = 1\,000\ \Omega$$

$$i = 50 \cdot 10^{-6}\ \text{A}$$

$I$  valant respectivement 0,1, 1, 2, 5 et 10 A

On obtient :

$$R_1 = \frac{1\,000 \times 50 \cdot 10^{-6}}{0,1 - 50 \cdot 10^{-6}} \approx 0,500\ \Omega \text{ pour le calibre } 100\ \text{mA}$$

$$R_2 = \frac{1\,000 \times 50 \cdot 10^{-6}}{1 - 50 \cdot 10^{-6}} \approx 0,050\ \Omega \text{ pour le calibre } 1\ \text{A}$$

$$R_3 = \frac{1\,000 \times 50 \cdot 10^{-6}}{2 - 50 \cdot 10^{-6}} \approx 0,025\ \Omega \text{ pour le calibre } 2\ \text{A}$$

$$R_4 = \frac{1\,000 \times 50 \cdot 10^{-6}}{5 - 50 \cdot 10^{-6}} \approx 0,010\ \Omega \text{ pour le calibre } 5\ \text{A}$$

$$R_5 = \frac{1\,000 \times 50 \cdot 10^{-6}}{10 - 50 \cdot 10^{-6}} \approx 0,005\ \Omega \text{ pour le calibre } 10\ \text{A}$$

N.B. : On constate que  $i$  est de plus en plus négligeable devant  $I$ , ce qui permet de simplifier par approximation, la formule de calcul de  $R$  :

$$R \approx \frac{gi}{I}$$

### Autre exercice

Il s'agissait de terminer le calcul des shunts fractionnés permettant de transformer un galvanomètre de  $40\ \mu\text{A}/1\,600\ \Omega$  en ampèremètre ayant les calibres 50  $\mu\text{A}$ , 500  $\mu\text{A}$ , 5 mA et 50 mA. Le texte du mois dernier nous avait donné le processus de calcul du shunt global  $S$  donnant la sensibilité de 50 A. Nous avons obtenu  $S = 6\,400\ \Omega$ . Nous avons aussi calculé la partie faible  $S_1$  et obtenu  $S_1 = 6,4\ \Omega$  donnant le calibre 50 mA. Restent à calculer les fractions  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$ . Voir figure 2.

### Calcul de $S_2$

Cette partie forme avec  $S_1$  le shunt des 5 mA ou 5 000  $\mu\text{A}$ . Ce shunt est traversé alors par  $5\,000 - 40 = 4\,960\ \mu\text{A}$  soit  $4\,960/40 = 124$  fois plus que dans le cadre. Cette partie est donc 124 fois moins résistante et mesure une valeur telle que :

$$r + S_3 + S_4 = 124 (S_1 + S_2)$$

$$r + S - (S_1 + S_2) = 124 (S_1 + S_2)$$

$$1\,600 + 6\,400 = 125 (S_1 + S_2)$$

$$S_1 + S_2 = 8\,000 / 125 = 64\ \Omega$$

$$\text{et } S_2 = 64 - 6,4 = 57,6\ \Omega$$

### Calcul de $S_3$

Un raisonnement identique permet d'écrire l'équation :

$$r + S_4 = 11,5 (S_1 + S_2 + S_3)$$

$$r + S - (S_1 + S_2 + S_3) = 11,5 (S_1 + S_2 + S_3)$$

$$= 11,5 (S_1 + S_2 + S_3)$$

$$\text{on tire } S_1 + S_2 + S_3$$

$$= 8\,000 / 12,5 = 640\ \Omega$$

$$\text{d'où } S_3 = 640 - 64 = 576\ \Omega$$

### Calcul de $S_4$

Cette dernière valeur s'obtient par différence :

$$S_4 = 6\,400 - (6,4 + 57,6 + 576) = 5\,760\ \Omega$$

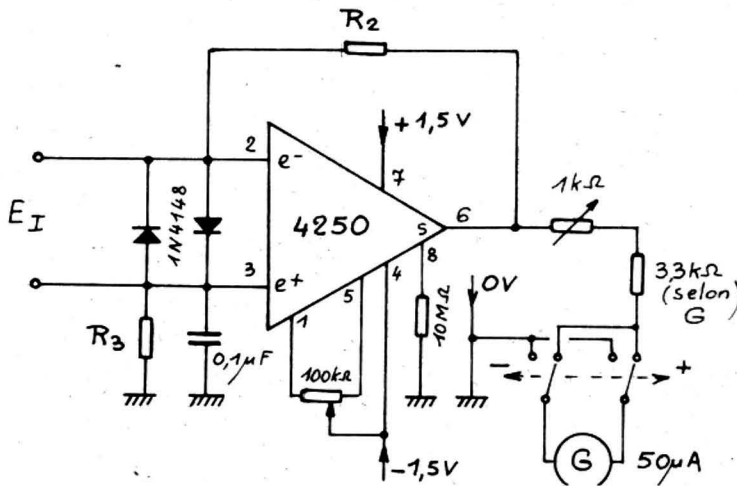


Fig. 5. — Schéma complet du mano-ampèremètre.

Calibre	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
100 nA	1,5 MΩ	1,5 MΩ
500 nA	300 kΩ	300 kΩ
1 µA	300 kΩ	0
5 µA	60 kΩ	0
10 µA	30 kΩ	0
50 µA	6 kΩ	0
100 µA	3 kΩ	0

Valeurs à monter en figure 5.

en R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> de la figure 5 pour fabriquer un « nano-ampèremètre » à 7 calibres, mesurant de 100 nA pleine échelle, à 100 µA.

Pour les courants les plus forts, l'entrée e+ est reliée directement à la masse avec R<sub>3</sub> = 0. Pour les calibres sensibles, on a R<sub>3</sub> = R<sub>2</sub> afin de réduire le

décalage du 0 par courant parasite d'entrée de l'ampli OP. (Eh oui ! c'est le moment d'y songer !)

Dans le schéma donné, l'ampli reste un LM 4 250, monté pratiquement comme dans l'adaptateur voltmètre. On notera simplement que la dernière gamme est de 100 µA alors que la première de l'adaptateur décrit plus avant dans cet article, est de 1 mA. Les deux montages se recoupent donc parfaitement. Est-ce une coïncidence ?

Attention à l'usage ! Si vous appliquez quelques volts « musclés » à l'entrée de ce dernier montage... les diodes de protection claqueront... l'ampli OP aussi, il vous restera les résistances et ce sera une consolation !

F. THOBOIS

## Bloc-notes

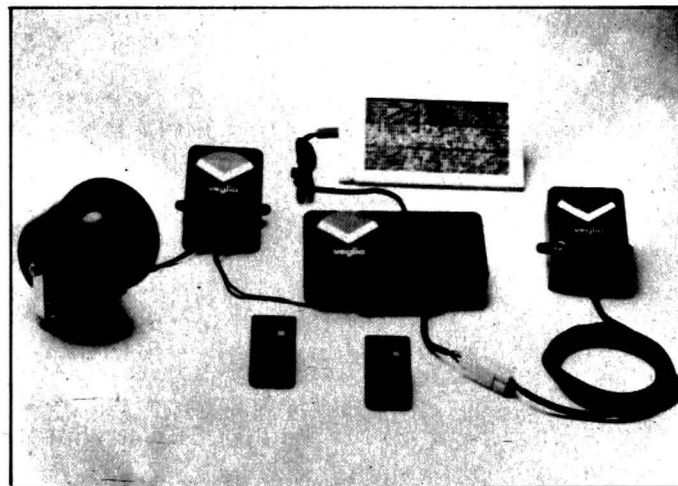
### UNE ALARME PARLANTE CHEZ VEGLIA

La société Veglia présente cette année au Salon Equip'Auto, en première mondiale, une alarme pour voiture supersophistiquée :

Grâce à un détecteur hyperfréquence radar, la surveillance de l'habitacle et de son contenu est assurée en permanence.

Le déclenchement et l'arrêt du système sont commandés à distance (jusqu'à 20 mètres) par un émetteur codé de la taille d'une boîte d'allumettes. La réception de l'ordre par le véhicule est indiquée par l'éclairage des feux de croisement.

Une fois branché, insensible aux courants d'air, le système peut surveiller un véhicule même s'il est décapoté, toit ou glaces ouverts.



De plus, son faisceau de détection n'étant intercepté que par des surfaces métalliques, il est facilement dissimulable.

En cas d'agression, il donne l'alerte, tout comme le ferait un passant, en hurlant : « Au voleur ».

Effet de surprise assuré, renforcé par un avertisseur auto-alimenté.

Le système Veglia allie la parole au soleil.

En effet, la consommation électrique du système en veille est compensée, sous éclairage normal, par l'énergie apportée par un capteur solaire.

Celui-ci, fixé sur l'un des pare-soleil, de la taille d'un livre de poche, délivre 12 V et 65 mA.

Pour un maximum d'efficacité, le système peut être complété par un module anti-soulèvement, la coupure de l'allumage ou de l'arrivée d'essence, la télécommande centralisée du verrouillage des portières et de la fermeture des glaces.