

L'art de la mesure en électronique

« Alors, là, on nous propose une « vieille nouveauté » ! Comment nous apprendre à faire des mesures ! Mais n'importe qui sait le faire, d'ailleurs cela ne sert pas tellement en électronique. »

L'auteur s'attend à des protestations de ce type (et probablement à d'autres, beaucoup plus virulentes) de la part d'un grand nombre de lecteurs, électroniciens confirmés ou débutants. Or si nous revenons sur le sujet, c'est parce que les deux affirmations contenues dans cette « protestation type » sont aussi fausses l'une que l'autre. La mesure est une chose difficile et fondamentale. Pourquoi les débutants (et bien des électroniciens confirmés) considèrent-ils que les mesures ne leur apportent pas grand-chose ? Parce qu'ils ne font pas celles qui leur seraient utiles, et que, là où ils les font, ils s'y prennent souvent mal, de telle sorte que les résultats ne leur sont guère utiles. L'auteur a vu trop souvent des étudiants qui réalisent un ensemble électronique en soudant immédiatement tous les composants sur le circuit imprimé, alors qu'il faudrait toujours faire un câblage partiel, permettant de faire

quelques mesures avant d'aller plus loin, car ces mesures deviendront difficiles (sinon impossibles) à réaliser une fois le câblage terminé.

Comment voulez-vous tester une alimentation stabilisée si elle est connectée au reste du montage ? On ne sait pas, en général, l'intensité que ce montage va consommer, on ne peut affirmer qu'aucun court-circuit ne s'y trouve, et l'on ne pourra pas connaître la tension à vide.

Les tensions continues

« Là, rien de plus évident : on connecte où il faut les deux cordons du voltmètre, et c'est fait ! » Encore une affirmation hardie. Il se peut que la mesure soit bonne, mais il y a de grands risques de ne récolter qu'une valeur inexacte, et, au pire, de perturber gravement le fonctionnement du montage étudié.

Commençons par notre ennemie à tous, l'horrible résistance interne. Toute source en est plus ou moins affectée. Dans les montages électroniques, il arrive souvent que la tension que l'on veut mesurer, entre deux points, soit l'équivalent d'une source « ayant la résistance interne » à un point catastrophique.

Rappelons, à ce propos, que l'auteur ne dit jamais qu'une source a une résistance interne, mais qu'elle a la résistance interne, car c'est une maladie très grave des sources (dirait-on de quelqu'un qu'il a une peste ou un choléra ?).

Quel en est l'effet ? La figure 1 vous répond. Nous voudrions connaître la force électromotrice u de la source enfermée dans le cadre pointillé. Pour cela, nous connectons, à ses bornes (A) et (B), le voltmètre V , de résistance R .

La valeur que nous allons lire est alors, comme on peut le calculer facilement :

$$v = u r / (R + r)$$

Si, par exemple, R ne vaut que deux fois r (la résistance interne de la source), la lecture vaudra $2u/3$, autrement dit, elle est fautive de 33 %.

Bien sûr, on a tout fait, dans la réalisation des voltmètres, pour augmenter R , mais on est tout de même limité dans cette voie. Un appareil passif à aiguille (non, ne changez pas de trottoir, c'est souvent la seule solution pour le débutant) peut, sur son échelle 3 V, par exemple, n'avoir que 30 ou 60 k Ω de résistance.

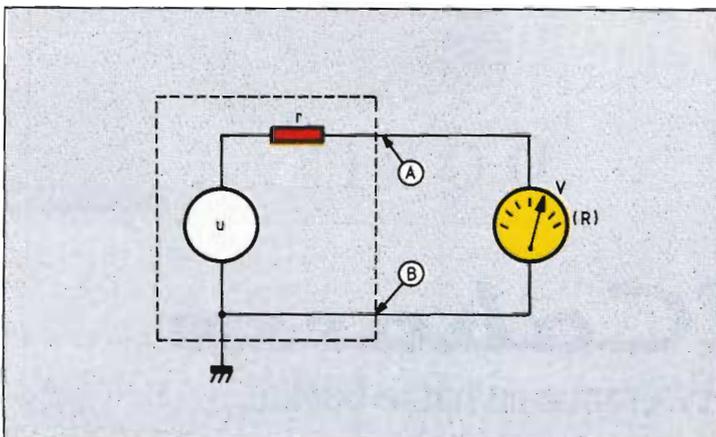
L'auteur entend d'ici les protestations indignées : « Mais, moi, je ne suis pas un « son et lumière », j'ai un numérique ! »

Il est incontestable que les contrôleurs actifs (ayant une amplification électronique incorporée, donc les numériques entre autres) sont meilleurs à ce point de vue. On trouve généralement une résistance d'entrée de 10 à 20 M Ω pour ces instruments, ce qui est très supérieur aux appareils de mesure passifs.

Ces derniers ont généralement une résistance de 10 à 20 k Ω /V, soit 60 à 120 k Ω pour une échelle de 6 V.

Mais ces appareils ne constituent tout de même pas la solution universelle. Il y a des cas où la résistance interne de la source atteint et dépasse le mégohm.

Fig. 1. Une source « ayant la résistance interne » r donne, sur un voltmètre V , une lecture fautive de la force électromotrice u (le voltmètre consomme du courant).



Une anecdote... peu glorieuse

Pour illustrer cette perturbation, l'auteur préfère avouer (sa faute lui sera à demi pardonnée) une aventure qui lui est arrivée, et qui n'est pas à l'honneur de son esprit déductif.

Il avait réalisé, voilà bien longtemps (le circuit imprimé porte la date du 14 février... 1958) un petit « gammaphone ». Il s'agit d'un instrument permettant de transformer en tops sonores, dans un haut-parleur, chaque passage d'un rayon gamma (ou cosmique, ou bêta très dur) dans un tube compteur de Geiger-Müller. Ce tube nécessite une tension de 400 à 500 V, fournie par un oscillateur à transistor (au germanium ! un « 2 N 43 » ça nous rajeunit), avec redressement en doubleur de tension.

Le montage ayant été soupçonné (à tort) de vieillissement, il était important de connaître la tension d'alimentation du tube GM. Un bon contrôleur numérique, de 22 M Ω de résistance, indiqua 248 V, tout à fait insuffisant pour le tube GM, à tel point que l'on pouvait se demander comment le gammaphone arrivait quand même à fonctionner.

L'auteur finit (enfin) par constater que, dès que le contrôleur était branché, le gammaphone devenait totalement muet. Le méfait venait donc (encore) de cette vieille ennemie de tous les électroniciens : cette « censurée » de résistance interne.

Un brève estimation aurait dû prévenir l'auteur de l'absurdité de cette tentative de mesure : la tension espérée étant de l'ordre de 400 V, un résistor d'une résistance de 22 M Ω consomme, sur une telle source, une intensité de 18 μ A. Or l'alimentation du tube est à peine prévue pour donner 1 à 2 μ A moyens, en lui en prélevant 18, on la « mettait sur les genoux ».

Avec un autre système de mesure, sur lequel nous reviendrons, et qui présentait une résistance d'entrée de 10 000 M Ω (oui, 10¹⁰ Ω), la tension du tube GM s'avéra égale à 452 V, ce qui était très bon.

Cela « entre dedans » !

L'auteur est d'autant plus honteux de ne pas avoir pensé plus vite à l'effet no-

cif du contrôleur que, donnant des cours dans le Nord, il a l'habitude, chaque fois qu'un élève tente une mesure de ce type, donnant un résultat sans valeur, de lui tendre un boudin de caoutchouc mousse et un pied à coulisse, en demandant qu'on mesure le diamètre du boudin.

Surprise de l'élève : « Cela doit être une lubie du prof. Enfin, si ça peut lui faire plaisir... » Alors, essayant de faire la mesure de diamètre demandée, il s'exclame : « Ah, mais c'est que ça entre dedans. » En effet, les mors du pied à coulisse « entrent » sans aucun effort dans le caoutchouc, et il est difficile d'apprécier le moment où ils le touchent, sans commencer à l'écraser.

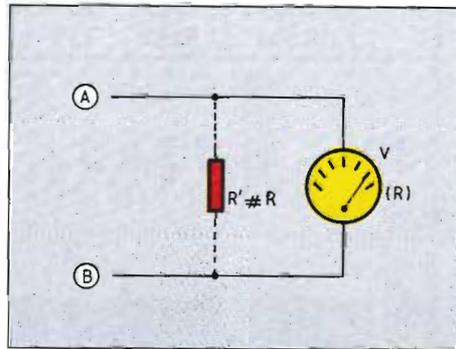


Fig. 2. – En mettant en parallèle avec le voltmètre V, de résistance R, un résistor R', de résistance proche de R, on voit, par l'effet sur la lecture, à quel point le voltmètre avait perturbé la tension qu'il devait mesurer.

Le but de la manœuvre est de faire comprendre que le contrôleur, lui aussi « entre dedans », autrement dit qu'il perturbe la grandeur que l'on veut mesurer. Dans le cas du contrôleur, c'est pire qu'avec le pied à coulisse : lors de l'utilisation de ce dernier, on voit nettement les mors déformer le boudin, mais la réduction de tension que provoque le branchement du contrôleur ne se voit pas : on ne peut que lire le résultat, après perturbation.

L'appareil nous ment... jusqu'à quel point ?

L'art du physicien est, dit-on, « de faire des mesures exactes avec des instruments faux ». C'est un peu utopique, mais le physicien est déjà fort compétent si, ayant fait une mesure, il

précise quel est son degré d'incertitude. Les termes « préciser » et « incertitude » semblant antinomiques, indiquons qu'il s'agit de préciser la plage de valeurs à l'intérieur de laquelle doit se trouver la valeur mesurée. Autrement dit, l'expression de la mesure d'une tension e doit être de la forme :

$$4,32 \text{ V} < e < 4,34 \text{ V}$$

$$\text{(ou } e = 4,33 \pm 0,1 \text{ V)}$$

Il est très rare que l'on connaisse, en valeur et en signe, l'erreur introduite par un instrument de mesure. Cela se produit, par exemple, quand le possesseur d'une bonne montre (dont il a vérifié qu'elle garde, par rapport à l'heure exacte, un écart qui varie de moins d'une seconde par jour) a entendu, à 10 heures, l'horloge parlante et a vu que sa montre indiquait alors 9 h 59 mn 20 s. S'il regarde de nouveau sa montre un peu plus tard, et lit 10 h 47 mn 5 s, il peut dire qu'il est presque exactement 10 h 47 mn 45 s, car le retard de 40 s a certainement très peu varié.

Mais dans la mesure électrique, le recours à l'étalon n'est que rarement possible. En plus, dans ce cas, il s'agit surtout d'une erreur un peu spéciale : celle que provoque l'utilisation de l'appareil de mesure, alors que le fait de regarder sa montre ne fait ni accélérer ni ralentir l'écoulement du temps.

Donc, notre appareil va modifier la grandeur que l'on voulait mesurer, et ne nous en donner la valeur qu'après modification. Il serait bien intéressant de savoir, au moins approximativement, à quel point il va modifier cette valeur.

Dis-moi jusqu'à quel point tu perturbes !

Evidemment, plus la résistance d'un contrôleur est grande, moins il perturbe. Donc, pour les échelles de basse tension, les numériques (qui ont ou 10 ou 20 M Ω d'entrée) sont bien préférables, à ce point de vue, aux appareils passifs.

Cette idée de la perturbation par l'appareil était clairement comprise quand certains appareils électroniques étaient fournis avec une notice détaillée et claire (incroyable, mais vrai, tout en précisant, hélas, qu'il s'agit d'un passé

révolu), comprenant le schéma, les points de mesure, et les tensions que l'on devait y trouver.

On ajoutait toujours, en bas du schéma, une note indiquant avec quel appareil ces tensions avaient été faites. Ainsi, lors d'un dépannage, en procédant aux mesures avec le même appareil, on devait trouver des valeurs voisines, perturbées peut-être par l'appareil, mais la notice en avait tenu compte, les valeurs indiquées étant elles-mêmes perturbées d'autant.

Si bizarre que cela paraisse, il est absolument exceptionnel de voir quelqu'un qui cherche à savoir l'importance de la perturbation apportée par son contrôleur. Or il s'agit, on va le voir, d'une vérification très facile.

La figure 2 indique la façon de procéder. Le voltmètre V est branché entre les points (A) et (B), et l'on souhaite connaître la différence de potentiel entre ces points (plus exactement, celle qui existait entre ces points avant que l'on ne connecte V).

On connaît la résistance de V : la notice l'indique pour un numérique (elle est alors indépendante de l'échelle choisie sur le commutateur), ou on la calcule en multipliant, pour un voltmètre passif, la tension de déviation **totale** par la « résistance spécifique » en ohms par volt de l'appareil.

Nous disons bien **totale** car il nous est souvent arrivé, ayant demandé quelle était la résistance d'un voltmètre de $10 \text{ k}\Omega/\text{V}$ sur lequel on lit 8 V , d'entendre la réponse ahurissante : « Ce sera $80\,000 \Omega$, bien sûr. » Alors, en suivant ce puissant raisonnement, si l'aiguille arrive maintenant devant la division 7 V (sans que l'on ait changé quoi que ce soit), il faut en conclure que la résistance de l'appareil est tombée à $70 \text{ k}\Omega$! Non, pour avoir la valeur de la résistance, il faut multiplier la valeur définissant l'échelle de mesure (c'est-à-dire la valeur de tension donnant la déviation maximale) par le nombre d'ohms par volt. Commuté sur la position « 10 V », soit sur son échelle 10 V , un voltmètre de $10 \text{ k}\Omega/\text{V}$ a une résistance de $100 \text{ k}\Omega$, quelle que soit la position de son aiguille.

Maintenant que nous connaissons la résistance R de l'appareil, cherchons dans

notre stock de résisteurs un type dont la résistance soit R' , assez proche de R (à 10% près, ce serait déjà très bien).

Tout en regardant l'aiguille, connectons ce résistor entre les points (A) et (B), en parallèle avec V . Il faut alors distinguer trois cas :

1° Le meilleur cas : l'aiguille **ne bouge pas**. Vous pouvez en conclure que la perturbation apportée par V est **négligeable**. En effet, on lit sur V une tension u avant d'avoir connecté le résistor extérieur entre (A) et (B). Le voltmètre consomme donc une intensité $i = u/R$.

Quand nous connectons le résistor R' , au courant i consommé par V vient s'ajouter le courant i' consommé par R' . Or étant donné que R' est voisin de R , et que la tension n'a pas varié, le courant i' est proche de i . En connectant le résistor R' , nous avons donc pratiquement **doublé** le courant consommé entre les points (A) et (B).

Or l'aiguille n'a pas bougé lors de la connexion de R' , donc la tension n'a pas varié quand on a fait passer la consommation de courant (qui est à l'origine de la perturbation possible) de i à $2i$.

La conclusion est facile à tirer : cette tension ne changerait pas non plus si nous faisons passer la consommation de i à zéro. Autrement dit, la résistance interne de la source est négligeable par rapport à R , notre appareil ne perturbe pas la source. Tout est pour le mieux.

2° Déjà moins bon : la valeur lue diminue un peu (de moins de 20%) quand on connecte R' . Nous savons que l'appareil perturbe. En effet, en connectant R' en parallèle avec V , nous n'avons pas tout à fait doublé le courant consommé (puisque la tension a baissé, réduisant le courant dans V à une valeur inférieure à i , et faisant passer dans R' un peu moins que i).

Si la diminution de lecture est de 5 à 10% , on peut dire, en première approximation, que la perturbation apportée par V est de l'ordre de 5 à 10% .

Autrement dit, supposons qu'on ait lu $6,8 \text{ V}$ avant que R' soit connecté, puis $6,4$ une fois que les fils de R' touchent les entrées du voltmètre, on peut dire que, en l'absence de perturbation, il y aurait une tension voisine de :

$$6,8 + (6,8 - 6,4) = 7,2 \text{ V}$$

Précisons bien que cette correction « simplifiée » est approximative, d'autant moins exacte que le pourcentage de réduction de la valeur lue sur V de la connexion de R' est grand. Mais il ne s'agit que d'une correction, qui permet d'améliorer un peu la mesure.

3° Le pire des cas : lors de la connexion de R' , la valeur lue diminue de plus de 30% (on peut démontrer qu'elle ne diminuera jamais de plus de 50%). On en conclut alors que la résistance de V est totalement insuffisante, et qu'il faut renoncer à l'utiliser tel quel pour la mesure envisagée.

Autrement dit, lorsque l'on a connecté V pour mesurer la tension, on connecte momentanément R' en regardant l'aiguille (ou l'indication numérique).

– Si la valeur lue ne varie pratiquement pas, parfait : la tension n'est pas perturbée par le voltmètre.

– Si la valeur lue diminue, sans que cette diminution dépasse 10% (à la rigueur 15%), on sait qu'il y a perturbation, et on a un ordre de grandeur de cette perturbation par la différence entre les deux lectures.

– Si la valeur lue s'effondre de 20% ou plus, il faut trouver un autre moyen pour mesurer la tension.

Que faire dans le pire des cas ?

Quand on se trouve dans ce cas, quand l'effondrement de la lecture nous indique que l'appareil, perturbant totalement ce qu'il doit mesurer, est inutilisable pour la mesure envisagée, doit-on aller acheter un autre voltmètre plus perfectionné ?

Non. D'abord, il n'est pas certain que vous le trouverez. Heureusement, il y a plus simple.

Dans le cas où l'on doit mesurer une tension relativement élevée, on peut ajouter au contrôleur une sorte de « sonde au dixième ».

Par exemple, supposons que l'on dispose (c'est le cas de l'auteur) d'un contrôleur numérique d'une résistance d'entrée de $22 \text{ M}\Omega$, dont la première échelle soit de $0,2 \text{ V}$ max, en mettant en série avec lui un résistor d'une résistance totale égale à $200 \text{ M}\Omega$. On voit, comme le montre la figure 3, que le

voltmètre vous permettra de lire le dixième de la tension U .

On a donc divisé la sensibilité du voltmètre par 10, ce qui est triste (la première échelle est maintenant 2,0 V et non 0,2 V), mais on a multiplié la résistance de l'appareil par 10, et cela, ce n'est pas du tout triste, bien au contraire. Car, si les 22 M Ω « chargeaient » trop la source, la perturbant fortement, il est à prévoir que les 220 M Ω vont la perturber bien moins.

Donc, celui qui possède un voltmètre du type évoqué ci-dessus a tout intérêt à réaliser pour lui un petit « accessoire », qui est un ensemble de résisteurs, totalisant la valeur voulue pour diviser par 10 (ou éventuellement par 100) la sensibilité de l'appareil, en multipliant donc sa résistance par 10 (ou par 100).

On peut aller plus loin. Dans le cas du gammaphone cité plus haut, l'auteur s'est dit que, même avec une résistance de 220 M Ω , on perturberait peut-être la source. Dès lors, en utilisant un autre contrôleur, également numérique, ayant 10 M Ω d'entrée, un résistor de 10 000 M Ω en série avec lui permettrait de faire une mesure avec la quasi-certitude de ne pas perturber.

En procédant ainsi, on divise la sensibilité par 1 000, mais ce n'est pas grave : la tension à mesurer était de l'ordre de 450 V, donc, en la divisant par 1 000, on arrive à 0,425 V, ce qui est déjà trop fort pour la première échelle (0,2 V).

L'utilisation de ce voltmètre de 10 000 M Ω nous a permis de constater que même le voltmètre de 220 M Ω (le contrôleur de 22 M Ω avec son additif de 200 M Ω) perturbait encore trop la tension : de 450 V, elle passait à 402 V.

Un horrible problème de composant

Donc, un « simple » diviseur extérieur va, en réduisant la sensibilité du contrôleur, réduire notablement son effet perturbateur dans les cas les plus graves. On en conclut tout de suite (enfin, on devrait conclure ainsi) qu'il faut réaliser ce diviseur tout de suite.

On se heurte alors à un regrettable problème. Les résisteurs de très grande résistance sont des objets rarissimes, pres-

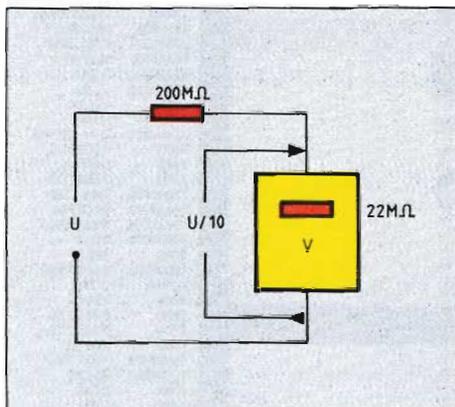


Fig. 3. – Avec un polymètre numérique d'une résistance de 22 M Ω , en ajoutant, en série avec lui, un ensemble de résisteurs totalisant 200 M Ω , on divise la tension lue par dix, mais on décuple la résistance interne du voltmètre, réduisant donc son effet perturbateur.

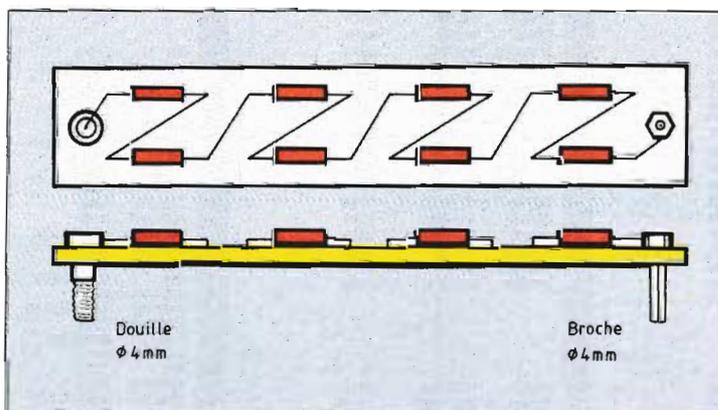


Fig. 4. – Réalisation d'une chaîne de résisteurs sur une petite plaque isolante, pour augmenter la résistance interne d'un contrôleur numérique.

que introuvables. Les fournisseurs ont l'air de penser que pas un seul amateur ne peut s'y intéresser et que, probablement, un professionnel sur dix mille peut avoir à utiliser de tels résisteurs.

Il s'agit là d'une sorte de « cercle vicieux » : on ne fait rien pour mettre à la disposition des électroniciens des résisteurs de haute résistance, donc ils ne savent pas ce que l'on peut faire avec, donc ils n'en commandent pas...

On trouve, chez certains fournisseurs (Verospeed), des modèles allant jusqu'à 33 M Ω à 5 %, que l'on ne peut acheter que par cinquante à la fois, mais ce n'est pas trop grave, vu le faible prix du composant. Avec un peu de chance, on trouve quelquefois des types de 68 M Ω , mais, au-delà...

Il existe une firme américaine célèbre, spécialisée dans ce type de matériel. Nous n'en citons pas le nom : elle est pratiquement inexistante pour les ama-

teurs. Il faut commander les résisteurs, le prix est très élevé (augmenté encore par un minimum de facturation démentiel), et les délais de livraison peuvent arriver à six mois. Dommage, les produits sont excellents, mais l'auteur tient ferme sur son propos que « tout résistor que la main n'atteint pas est un songe ».

Si jamais vous voyez, dans une vente de surplus, ces résisteurs, enrobés dans des ampoules de verre de 5 cm de long, à l'intérieur desquelles on voit un bâtonnet, ne les ratez pas. Il y a des valeurs jusqu'à 10^{14} Ω , des précisions de 0,5 %, la possibilité de supporter des tensions aux bornes de 1 000 V ou plus. Bref, c'est le rêve. Vous n'aurez peut-être pas les valeurs que vous voulez sur le mo-

ment, mais, si vous pouvez acheter quelques-uns de ces résisteurs, faites-le, vous en aurez toujours l'usage. Si l'on ne trouve pas ces valeurs, il y a la solution... idiote (mais inévitable) qui consiste à mettre des résisteurs en série. Le petit accessoire dont nous avons parlé, qui totalise 200 M Ω , est fait avec six résisteurs de 33 M Ω , un de 1 M Ω et un de 470 k Ω (en ayant trié les types jusqu'à obtenir la valeur précise souhaitée). Ce petit additif tient sur une plaque de verre époxy de 20 \times 130 mm, monté comme l'indique la figure 4. Plusieurs électroniciens amis de l'auteur, étant venus dans son laboratoire, ont considéré l'objet avec un sourire amusé, disant que c'était « un drôle de bidule n'ayant pas beaucoup d'intérêt », puis ont changé d'avis en voyant ce que l'on pouvait faire avec.

(A suivre.)

J.-P. Œhmichen