

Initiation à la pratique de l'électronique

Les capteurs

Les capteurs sont des éléments très importants de nombreux ensembles électroniques, éléments souvent négligés, mais essentiels, puisqu'ils jouent le rôle d'« organe des sens » pour de nombreux équipements.

En effet, un capteur est destiné à traduire en valeur électrique (tension, intensité, fréquence, etc.) une grandeur physique que l'on veut connaître ou commander. Beaucoup de gens pensent que ces capteurs n'intéressent que les réalisateurs d'équipements d'électronique industrielle, alors que leurs applications dans les réalisations d'amateurs sont de plus en plus importantes.

La simple liste des grandeurs physiques que l'on peut avoir à vérifier, ou à commander, donne une idée de la variété des capteurs que nous pourrions rencontrer. On peut, en effet, pour un mobile qui se déplace sur une droite ou qui tourne autour d'un axe, chercher à connaître sa position, sa vitesse et son accélération (angulaires ou linéaires).

On peut étudier, dans un fluide, sa vitesse, son débit, sa pression, ses vibrations ou sa température. On a souvent besoin de savoir quel est le degré d'humidité d'un gaz. Il est fréquent que l'acidité ou le pouvoir oxydant d'une solution soient déterminants dans une opération donnée.

Dans d'autres domaines, les capteurs de lumière sont extrêmement importants, en raison de la place que tient la vue dans nos sens. Il y a aussi des radiations que l'on ne voit pas mais dont la connaissance est essentielle (les radiations nucléaires, les rayons X, les rayons ultraviolets, les infrarouges).

En bref, on voit que le sujet est presque inépuisable, et d'ailleurs les réalisations se perfectionnent chaque jour. Cela dit, il est souvent nécessaire, pour bien comprendre le rôle et le fonctionnement d'un capteur, de revenir un peu sur quelques notions simples de physique, quand ce ne serait que pour bien définir la grandeur à laquelle le capteur doit réagir. C'est, en partie, ce qui fait l'intérêt de ces instruments, car il est toujours utile de faire un peu « le point » sur ses connaissances dans tel ou tel domaine de la physique.

Et puis, il sera toujours nécessaire de

bien choisir le type de capteur, si l'on a le choix, pour en utiliser un « bon ». Mais, au fait, comment pourrait-on caractériser un « bon capteur » ?

Quelles qualités doit avoir un capteur ?

Chose bizarre, si vous posez cette question à quelqu'un, il y a de fortes chances qu'il vous réponde : « Il doit avoir une réponse linéaire. » Nous ne dirons pas que cette qualité est totalement sans intérêt, mais elle est nettement secondaire. La qualité fondamentale d'un capteur est la fidélité.

nomène, notre capteur nous donne une tension v_0 . Si la valeur de P croît, la tension v en fait autant (nous avons supposé que la réponse du capteur n'était pas linéaire, autrement dit, que la courbe représentant la valeur de v en fonction de P n'était pas une droite).

Maintenant, voici que P redescend et revient à la valeur P_0 . Si le capteur est fidèle, le point de coordonnées P, v va suivre, de droite à gauche, exactement la même courbe qu'il a suivie de gauche à droite quand P augmentait. Mais, hélas ! il arrive trop souvent que, quand P diminue, la variation de v se fasse suivant la courbe en pointillé : quand P reprend la valeur P_0 , v

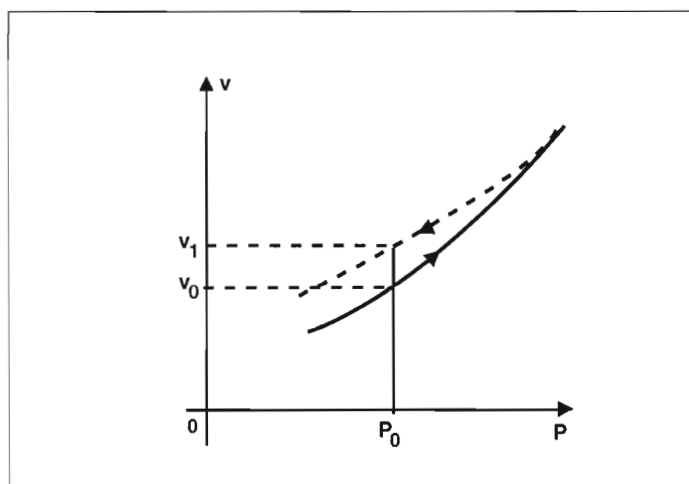


Fig. 1. – Pour qu'un capteur soit fidèle, il faut que, quand la grandeur physique à laquelle il est sensible part de P_0 , croît et revient à P_0 , l'indication v du capteur revienne à la valeur initiale (courbe en trait plein) et non selon une courbe différente (trait pointillé).

Définissons plus précisément ce que nous entendons par le terme « fidélité ». Soit (fig. 1) un phénomène physique désigné par P , qui, agissant sur un capteur, produit une tension de sortie v . Pour une valeur P_0 du phé-

nomène, notre capteur nous donne une tension v_0 . Si la valeur de P croît, la tension v en fait autant (nous avons supposé que la réponse du capteur n'était pas linéaire, autrement dit, que la courbe représentant la valeur de v en fonction de P n'était pas une droite).

Maintenant, voici que P redescend et revient à la valeur P_0 . Si le capteur est fidèle, le point de coordonnées P, v va suivre, de droite à gauche, exactement la même courbe qu'il a suivie de gauche à droite quand P augmentait. Mais, hélas ! il arrive trop souvent que, quand P diminue, la variation de v se fasse suivant la courbe en pointillé : quand P reprend la valeur P_0 , v

de pression, par exemple, est sensible à la lumière, il faudra faire très attention, lors de son emploi, que la valeur qu'il indique ne soit pas perturbée par un éclairage intempestif. Dans certains cas, il faudra se préoccuper de la vitesse de réponse du capteur. Les temps de réponse des différents capteurs utilisés peuvent aller d'un centième de nanoseconde à plusieurs minutes.

Evidemment, l'utilisateur vous dira aussi qu'il souhaite que le capteur soit robuste (surtout dans le cas d'une utilisation industrielle) et... qu'il ne soit pas trop cher !

Les capteurs de température

Il s'agit là d'un sujet que bien des amateurs estiment « connaître à fond », ce qui est un peu optimiste. Nous nous trouvons, en effet, devant un cas assez curieux.

Alors que, pour les autres grandeurs physiques à « capter », on doit souvent chercher des phénomènes qui sont sensibles à ces grandeurs, la situation s'inverse pour les capteurs de température. En effet, à part la radioactivité spontanée (désintégration des noyaux atomiques de certains éléments), qui est insensible à la température, on peut dire que cette dernière influence pratiquement tous les phénomènes physiques. Donc, pour réaliser un capteur de température, on n'a, en quelque sorte, que l'embaras du choix.

Il faudra donc, dans ce choix, privilégier les capteurs aussi bien adaptés que possible au type de mesure que l'on souhaite réaliser.

Mais, avant de nous lancer dans l'étude des différents capteurs de température, il nous semble utile de voir d'un peu plus près la grandeur que nous voulons transformer en signal électrique exploitable.

Qu'est-ce que la température ?

D'abord, une question « bête » : la température est-elle mesurable ? Ne répondez pas trop vite : « Oui, évi-

demment, il y a des quantités de moyens de mesurer la température, pour commencer le thermomètre. » En effet, l'emploi du verbe « mesurer » dans la réponse est incorrect : la température n'est pas une grandeur mesurable.

Qu'est-ce qu'une grandeur mesurable ? Il s'agit d'une grandeur telle que l'on puisse définir l'égalité de deux valeurs de cette grandeur, mais aussi la somme (ou le rapport) de deux valeurs. Or, si l'on peut facilement définir l'égalité de deux températures, il est hors de question de parler de leur somme ou de leur rapport. Une température de 18 °C n'est pas « le double » d'une température de 9 °C.

D'ailleurs, pour un Anglais, 9 °C se dit 48,2° Fahrenheit, et 18 °C se « prononce » 60,8 °F : le « rapport » n'est plus du tout égal à 2. Pour être correct, on doit dire que la température est une grandeur « repérable ». Pour qu'une grandeur soit qualifiée de « repérable », il suffit que l'on puisse définir l'égalité de deux valeurs de cette grandeur.

Donc, on « repère » une température, on ne la « mesure » pas. Il y a un autre exemple bien classique de grandeur repérable et non mesurable : la date. On ferait rire tout le monde en disant que le 26 janvier 1994 est « le double » du 13 janvier 997.

Puisque nous avons parlé de l'échelle anglaise, précisons que les conversions entre degrés Celsius (°C) et degrés Fahrenheit (°F) se font ainsi :

$$°F = (°C) \times 1,8 + 32$$

$$°C = (°F - 32) \times 5/9$$

(il est à noter que - 40 °C correspond à - 40 °F).

Nous trouverons une troisième échelle de température : la température absolue. On la trouve en ajoutant 273,2 à la température exprimée en degrés Celsius. Elle correspond au fait que les physiciens ont montré que l'on ne pouvait pas abaisser la température d'un corps en dessous de - 273,2 °C. On peut se rapprocher (même très près) de cette valeur, que l'on nomme le « zéro absolu », mais on ne l'atteint jamais.

On note la température absolue en « degrés Kelvin », ou °K, et, de plus en plus souvent, en K tout court. La température ambiante de 20 °C correspond donc à 293,2 K.

Les capteurs de température à variation de résistance

Les capteurs de température les plus simples sont ceux qui utilisent une variation de résistance en fonction de la température. On peut utiliser :

1° Un résistor métallique, alors sa variation est souvent proche, à la température ambiante, de 0,3 % par degré Celsius.

2° Un semiconducteur dont le Coefficient de Température est Négatif (CTN). Il a souvent une variation de résistance, à la température ambiante, de - 4 % par degré.

3° Un semiconducteur ayant un Coefficient de Température Positif (CTP), qui peut avoir, pour une plage réduite de température, un coefficient de variation de résistance atteignant (ou dépassant) 15 % par degré.

courbes s'éloignent de la droite passant par l'origine, pour arriver à une valeur minimale, faible mais non nulle, au zéro absolu.

Vous avez dit « bizarre ! ». C'est bizarre !

Le plomb, lui, ne fait rien comme les autres. Vers quelques degrés K, à une température T_C bien définie, on voit sa résistance tomber brusquement à zéro. C'est le fameux phénomène de la « supraconductivité », découvert en 1913 par Kamerling Ohnes, et dont on commence à s'occuper beaucoup de nos jours.

Précisons que, quand on dit « résistance nulle », cela ne veut pas dire « très faible », mais « parfaitement nulle ». On le met en évidence par une expérience très spectaculaire.

On prend un anneau de plomb et l'on

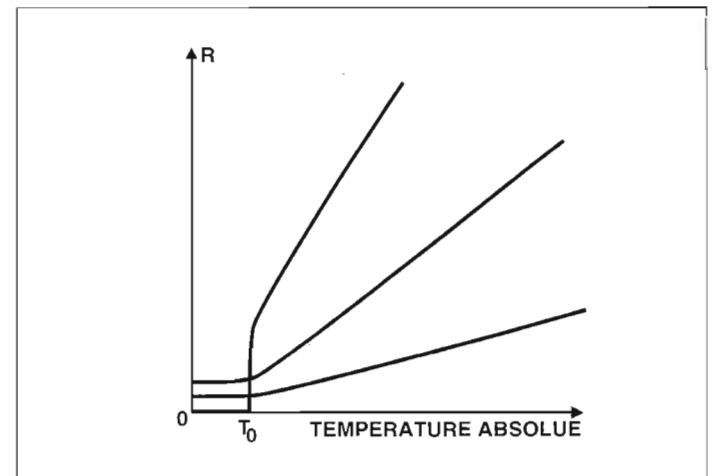


Fig. 2. - En fonction de la température absolue, les résistances de différents résistors métalliques suivent des lois qui semblent plonger vers une valeur nulle au zéro absolu, mais s'écartent de zéro vers 0 K. Le plomb fait exception : au-dessous d'une température donnée, il devient « supraconducteur ».

Revenons un peu sur les résistors métalliques. En général, de tels résistors ont une résistance qui varie, en fonction de la température absolue, comme l'indique la figure 2. Sur cette courbe, l'axe des températures ne se prolonge pas à gauche, puisqu'il n'y a pas de température inférieure au zéro absolu.

On voit que les résistors métalliques, en général, ont une résistance qui semble proportionnelle à la température absolue, mais que, quand cette dernière est proche du zéro absolu, les

enfoncé dedans un pôle d'un aimant droit. L'induction provoque la circulation d'un courant dans le plomb, courant qui diminue extrêmement vite, du fait de la résistance du plomb, et tombe à zéro. On plonge alors l'anneau et l'aimant dans l'hélium liquide (4 K) et le plomb devient supraconducteur. En retirant l'aimant, on induit un courant dans l'anneau, mais, cette fois, il va « tourner » indéfiniment dans le plomb, tant que ce dernier sera maintenu à la température de 4 °K.

Comment sait-on qu'il y a du courant qui circule ? Parce que l'anneau produit un champ magnétique, ce champ restant exactement le même un an après, si l'on a toujours maintenu l'anneau à température ultra-basse.

Au moment de la découverte de ce phénomène, on a pensé que l'on pourrait faire passer toute l'intensité d'une centrale électrique dans un fil de plomb fin comme un cheveu, refroidi à 4 K. Hélas ! on a dû déchanter : quand le plomb est soumis à un champ magnétique (et le passage du courant en produit), la température critique T_C à laquelle il devient supraconducteur s'abaisse, autrement dit, il faut le refroidir encore plus près du zéro absolu. Et si le champ magnétique dépasse une certaine limite, on ne peut plus obtenir la supraconductivité, même au zéro absolu.

D'autres supraconducteurs ont été trouvés, plus « résistants » au champ magnétique, mais également limités dans cette voie. Par ailleurs, les recherches actuelles montrent qu'il existe des supraconducteurs qui fonctionnent à des températures de plus en plus élevées. On pense que l'on arrivera à réaliser des produits supraconducteurs à la température ambiante.

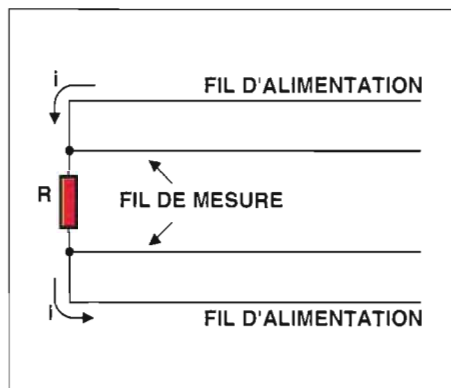
Un dernier mot à propos de la supraconductivité, pour montrer que c'est un phénomène vraiment bizarre. On peut réaliser, en enroulant un fil de plomb que l'on portera à 4 K, un « aimant supraconducteur », car un courant, lancé dans ce bobinage que l'on court-circuite, continue à passer indéfiniment. Mais il faut isoler le fil de plomb, pour forcer le courant à passer uniquement dans les spires. Les isolants habituels résistent mal aux très grands froids. Le meilleur isolant à utiliser, dans ce cas, est... le cuivre. Non, n'appellez pas le SAMU pour faire hospitaliser l'auteur à Sainte-Anne. Réfléchissez : vers le zéro absolu, le cuivre, déjà bon conducteur à la température ambiante, devient un excellent conducteur. Mais le plomb, lui, devient un conducteur « parfait », et, par rapport au plomb supraconducteur, tout conducteur, fut-il excellent, a une résistivité non nulle, donc infinie par rapport à celle du plomb à 4 K.

Un résisteur à quatre fils

Revenons à des températures plus clémentes pour voir comment on utilise un résisteur métallique comme capteur de température.

Puisque sa résistance varie à peu près proportionnellement à la température absolue, au voisinage de 20 °C, soit 293 K, on voit qu'une augmentation de 1° fait varier la température absolue d'environ 1/300, donc la résistance va varier de 1 % tous les trois degrés. Ce capteur a donc une réponse linéaire, et, si le métal est bien choisi, il est fidèle.

Fig. 3. - Un résisteur métallique servant de capteur de température à quatre fils : deux pour l'alimenter, deux pour mesurer la tension à ses bornes ; on élimine ainsi l'effet de la résistance des fils.



Dans quelle plage de température pouvons-nous l'utiliser ? Du côté froid, on peut très bien descendre à une centaine de degrés absolus (-170 °C), et, pour le maximum, on est essentiellement limité par le support sur lequel le fil métallique est placé.

On utilise beaucoup, pour ces capteurs, des résisteurs en fil de platine. Les lecteurs se diront qu'un tel instrument doit être hors de prix, ce qui est exagéré : il vaut moins que le plein d'essence d'une petite auto de 5 CV. On donne, en effet, à ce résisteur une résistance de l'ordre de 100 Ω, ce qui suppose un fil extrêmement fin.

Avec le résisteur en fil de platine, en utilisant un support céramique, on peut facilement l'employer jusqu'à 600 °C ou plus. Ce type de capteur est souvent employé pour des fours, il y aura donc des fils assez longs entre le résisteur et la partie électronique qui utilise les variations de sa résistance.

Ces fils pourraient fausser la mesure, aussi a-t-on utilisé une méthode ingénieuse pour supprimer cette cause

d'erreur. Le résisteur est monté comme l'indique la figure 3. Il comporte quatre fils, deux pour l'alimentation (on envoie dans le résisteur un courant constant i) et deux pour la mesure de la tension R_i . Comme il ne circule dans ces derniers qu'une intensité négligeable, leur résistance n'intervient pas dans la mesure, pas plus que celle des fils d'alimentation.

Une évaluation troublée

« Je ne peux jamais profiter du silence, car je le trouble par mes cris », disait

Imaginait-on un sonomètre « bruyant », un luxmètre « répandant une forte lumière » ? Non, évidemment, car on se trouverait dans le cas paradoxal du musicien évoqué ci-dessus. Dans de nombreux cas, les capteurs ont le bon goût de ne pas perturber la grandeur qu'ils doivent capter, mais, pour la température, ils la perturbent presque toujours.

Comment lutter contre une telle erreur « systématiquement » ? Les physiciens utilisent toujours deux moyens :

- réduire autant qu'on le peut ladite erreur ;
- essayer d'avoir une estimation de son ordre de grandeur, pour corriger la lecture.

Donc, nous essaierons de mesurer la résistance du capteur en employant une intensité aussi faible que possible, et nous tenterons d'avoir une idée de la différence de température entre le capteur et le milieu où il est plongé. Pour ce dernier point, il faut connaître, au moins approximativement, la « résistance thermique » capteur-ambiance.

Rappelons que l'on admet que, quand un objet dans lequel se dissipe une puissance P est dans une ambiance à température t , il prend une température t' telle que :

$$t' = t + R_{th} \times P$$

en désignant par R_{th} la résistance thermique (en degrés par watt) entre l'objet et l'ambiance.

Admettons que notre résisteur de platine de 100 Ω (à 20 °C) présente, par rapport à l'ambiance, une résistance thermique de 700 °C/W (ce qui serait beaucoup), et que nous utilisions, pour mesurer sa résistance, une intensité de 2 mA (soit une dissipation de 0,4 mW), la différence $t' - t$ sera : $700 \times 0,0004 = 0,28$ °C.

Nous aurons donc intérêt à ramener, si nous le pouvons, l'intensité dans le résisteur à 1 mA, ce qui divisera par 4 la puissance dissipée, donc la différence $t' - t$, qui ne sera plus que 0,07 °C.

Comme on le voit, on peut souvent réduire la dissipation dans le capteur, de telle sorte que la perturbation par échauffement soit presque négligeable. Le capteur à résisteur de platine est donc un très bon moyen pour connaître une température.

Les résisteurs à coefficient de température négatif

Tous les réalisateurs de montages connaissent au moins un exemple de l'emploi de ces fameux « CTN » (thermostat, stabilisateur de transistors de puissance, etc.). Par rapport aux résisteurs métalliques, ils présentent l'avantage d'un coefficient de température qui peut être dix à douze fois supérieur (4 %/°C en valeur absolue contre 0,33 %/°C pour les résisteurs métalliques).

Mais ils ont deux inconvénients, dont le plus grave est, souvent, un manque de fidélité. Plusieurs constructeurs fournissent des CTN « vieilliss », ayant subi de nombreux cycles thermiques, qui ont alors une fidélité un peu meilleure. Malgré cela, l'auteur pense que tout système thermométrique utilisant un CTN comme capteur doit être ré-étalonné de temps en temps. Le second inconvénient des CTN est leur manque de linéarité, mais, comme nous l'avons dit, c'est secondaire. En effet, on utilise souvent ces capteurs pour détecter le passage de la température par une valeur donnée ou pour estimer la valeur de température dans une petite plage, pour laquelle l'écart avec la loi linéaire n'est pas gênant.

La loi de variation de la résistance d'un CTN en fonction de la température est assez compliquée. Disons que, en général, entre la résistance R à la température (absolue) T et la résistance R' à la température absolue T' , on a la relation suivante :

$$\log(R'/R) = k(1/T - 1/T')$$

où \log désigne le logarithme à base 10 du rapport des résistances (0 pour 1, 0,3 pour 2, 0,7 pour 5, 1,0 pour 10, etc.) et k est un coefficient caractéristique du matériau constituant le résistor. Pour ceux qui jonglent avec les formules, on voit que cette variation est rapide aux basses températures, bien plus lente aux températures élevées.

Les résisteurs CTN prévus pour l'utilisation en capteurs se présentent souvent comme l'indique la figure 4. L'engin est un petit tube de verre

scellé, une minuscule perle de matériau CTN (moins de 0,5 mm de diamètre) est à l'un des bouts, enrobé par le verre. Précisons que les modèles disponibles se raréfient, beaucoup d'entre eux devenant des « sasfépu » (ça ne se fait plus), et qu'il faut parfois chercher dans plusieurs magasins pour trouver ce que l'on souhaite.

Il y a des types ayant une résistance de 1 k Ω , 10 k Ω et 100 k Ω à 20 °C. Il faut donner la préférence aux modèles de forte résistance, car ils ont souvent un coefficient de température plus grand que les autres, et, surtout, en les utilisant avec une tension donnée aux bornes, on dissipera moins de puissance dans le résistor qu'avec un modèle de résistance plus faible. En effet, là aussi, il faut tenir compte de l'échauffement du résistor par rapport à l'ambiance.

Exemple de thermomètre à CTN

Pour ne pas rester dans l'abstrait, nous donnerons tout de suite un exemple de réalisation. Il s'agit d'un thermomètre pour usage photographique, prenant la température du révélateur « couleur », laquelle doit être très soigneusement maintenue à la bonne valeur, un écart de 0,3 °C étant déjà nuisible.

Nous utilisons un capteur CTN de 100 k Ω à 25 °C et nous prévoyons une gamme de 22 à 28 °C (en admettant que la température normale du révélateur doit être maintenue à 25 °C).

Comme on ne peut être tout à fait sûr des valeurs de résistance en fonction de la température, le mieux est d'étalonner le capteur. Cela peut paraître un peu long, mais on gagnera du temps par la suite.

La méthode est la suivante. On attache le capteur (par des bracelets de caoutchouc ou par de la gaine thermorétractable) contre un bon thermomètre, du genre de ceux que les photographes un peu soigneux utilisent pour leurs bains. On relie les fils du résistor CTN (qui ne devront jamais tremper dans l'eau) à un bon ohmmètre (de préférence numérique) dont on aura vérifié que, sur la gamme utilisée, il envoie une puissance suffisamment faible au résistor. C'est assez facile : les ohmmètres numériques fonctionnent généralement sous une tension maximale de 0,2 V aux bornes du résistor à mesurer. Donc, si ce dernier a une résistance de 100 k Ω , la puissance dissipée est, au maximum :

$$P_M = (0,2)^2 / 100\,000 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ W ou } 0,4 \mu\text{W}$$

ce qui est parfait.

Il est prudent de prévoir un condensateur de 0,1 μF aux bornes de l'ohmmètre, pour éliminer les composantes parasites de tension que peuvent récolter les fils de connexion, forcément assez longs, et qui fausseraient la mesure.

On procède comme l'indique la figure 5, en immergeant le bout du thermomètre et l'extrémité sensible du CTN (et pas les fils !) dans de l'eau contenue dans un récipient adéquat (casserole, saladier, etc.).

On commence avec l'eau à 30 °C ou un peu plus et l'on fait les mesures en laissant l'eau se refroidir spontanément, aussi lentement que possible (poser le récipient sur une surface relativement isolante, comme de la mousse de plastique, et le préserver des courants d'air). Il ne faut jamais faire les mesures pendant que l'eau chauffe, car, alors, il y a dans l'eau des courants thermiques qui peuvent tout fausser.

Avec un peu de patience (il n'est pas nécessaire d'observer le tout pendant des heures, on vient lire de temps en temps le thermomètre et l'ohmmètre), on finit par avoir un relevé des valeurs de la résistance du capteur pour les températures allant de 30 à 20 °C. On devrait trouver environ 80 k Ω à 25 °C, à peu près 70 k Ω à 28 °C et de l'ordre de 90 k Ω à 22 °C.

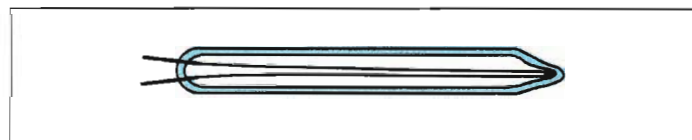


Fig. 4. - Quand on en trouve encore, les capteurs à Coefficient de Température Négatif (CTN) se présentent comme un petit tube de verre, la partie sensible étant la minuscule bille enrobée dans le verre à l'endroit effilé.

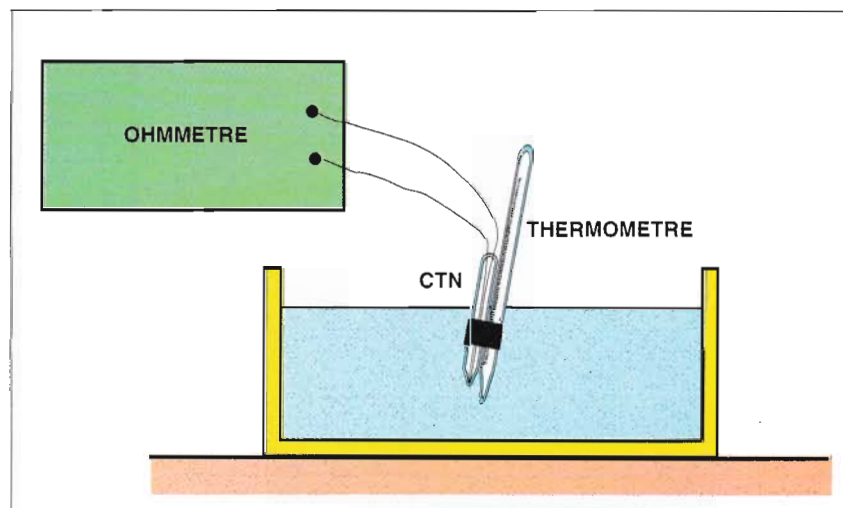


Fig. 5. - Avant d'utiliser un capteur à CTN, le mieux est de tracer la courbe donnant sa résistance en fonction de la température. On le fixe contre un thermomètre et l'on plonge le tout dans de l'eau qui se refroidit lentement, puis on lit, à intervalles réguliers, la résistance et la température.

Quelques petits calculs

Quelle tension pourrions-nous appliquer au capteur ? La notice nous dit que, pour ce type de CTN, la résis-

tance thermique (dans le cas où le capteur est dans un liquide, cas très favorable, car la résistance thermique est bien moindre que dans un gaz), on trouve environ $300\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Or, si l'on applique, par exemple, $2,5\text{ V}$ à un résistor ayant une résistance de $80\text{ k}\Omega$, cela correspond à une dissipation de l'ordre de $0,08\text{ mW}$, soit une élévation de température de l'ordre de $0,024\text{ }^{\circ}\text{C}$, que nous pouvons négliger. Avec une tension trois fois plus forte, l'élévation de température aurait atteint $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui aurait été gênant.

Nous allons constituer un diviseur de tension avec le CTN et un résistor R , insensible à la température. Pour R , on utilise un résistor fixe R_1 de $47\text{ k}\Omega$, en série avec un ajustable P_1 de $47\text{ k}\Omega$. En effet, pour adapter l'ensemble à un CTN donné (il y a une certaine dispersion dans les modèles), nous avons prévu que l'on pouvait ainsi mettre en série avec le CTN un

résistor dont la résistance R soit égale à celle du CTN au milieu de la plage de température.

En rendant R égal à la valeur de résistor du CTN à mi-échelle, nous aurons alors, pour une variation de température donnée, la plus grande variation de tension au point commun (A) du CTP et du résistor fixe. Le premier réglage se fera, comme nous le verrons plus loin, avec le CTN à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, en amenant le potentiel du point (A) à la même valeur que celui de (B) (très près de $2,5\text{ V}$).

Un petit calcul simple nous dit que, en alimentant le diviseur par une tension de 5 V , comme le montre la figure 6, le point (A) sera à $2,531\text{ V}$ pour $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, à $2,384\text{ V}$ pour $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à $2,697\text{ V}$ pour $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. La variation du potentiel de (A) pour toute la gamme de température sera donc de $0,31\text{ V}$.

Comme nous souhaitons une variation de tension d'environ 6 V pour

commander les circuits UAA 180, il nous faudra réaliser une amplification en tension d'environ 20 fois. On l'obtient, comme le montre la figure 6, en employant un amplificateur opérationnel du type CA 3130.

Pour que la sensibilité du montage reste constante, il faut que la tension alimentant le diviseur qui comporte le CTN soit bien constante, aussi la stabilise-t-on avec un LM 317 (le modèle miniature, en TO 92). Il faut un diviseur de tension pour commander ce régulateur, donc nous utiliserons ce diviseur, de faible résistance, pour obtenir le point (B) à environ $2,5\text{ V}$.

Quelques réglages

L'ensemble représenté sur la figure 6 comporte trois autres potentiomètres. Il y a P_2 , utilisé en résistor variable, qui, avec R_5 et R_6 permet de régler le gain de l'amplificateur.

Pour ce dernier, nous avons choisi un type CA 3130, qui fonctionne très bien avec une tension unique, son VS- étant à la masse. Il nécessite un condensateur de stabilisation de 100 pF , ou plus, entre les broches (1) et (8).

La résistance entre l'entrée « - » de l'amplificateur opérationnel et la masse étant pratiquement égale à la résistance de R_6 , soit $6,8\text{ k}\Omega$, il faudra donc que la somme des résistances de P_2 et R_5 fasse environ $19 \times 6,8 = 128\text{ k}\Omega$ pour que le gain soit de l'ordre de 20. Pour régler finement le milieu de l'échelle, nous utilisons un troisième potentiomètre, P_3 , qui permet d'appliquer à une extrémité de R_7 un potentiel variant de 0 à 5 V . L'action de P_3 provoque une variation d'environ $\pm 1\text{ V}$ du potentiel de la sortie de l'amplificateur opérationnel. Un dernier potentiomètre, P_4 , règle la luminosité des LED allumées par les deux circuits UAA 180. Rappelons

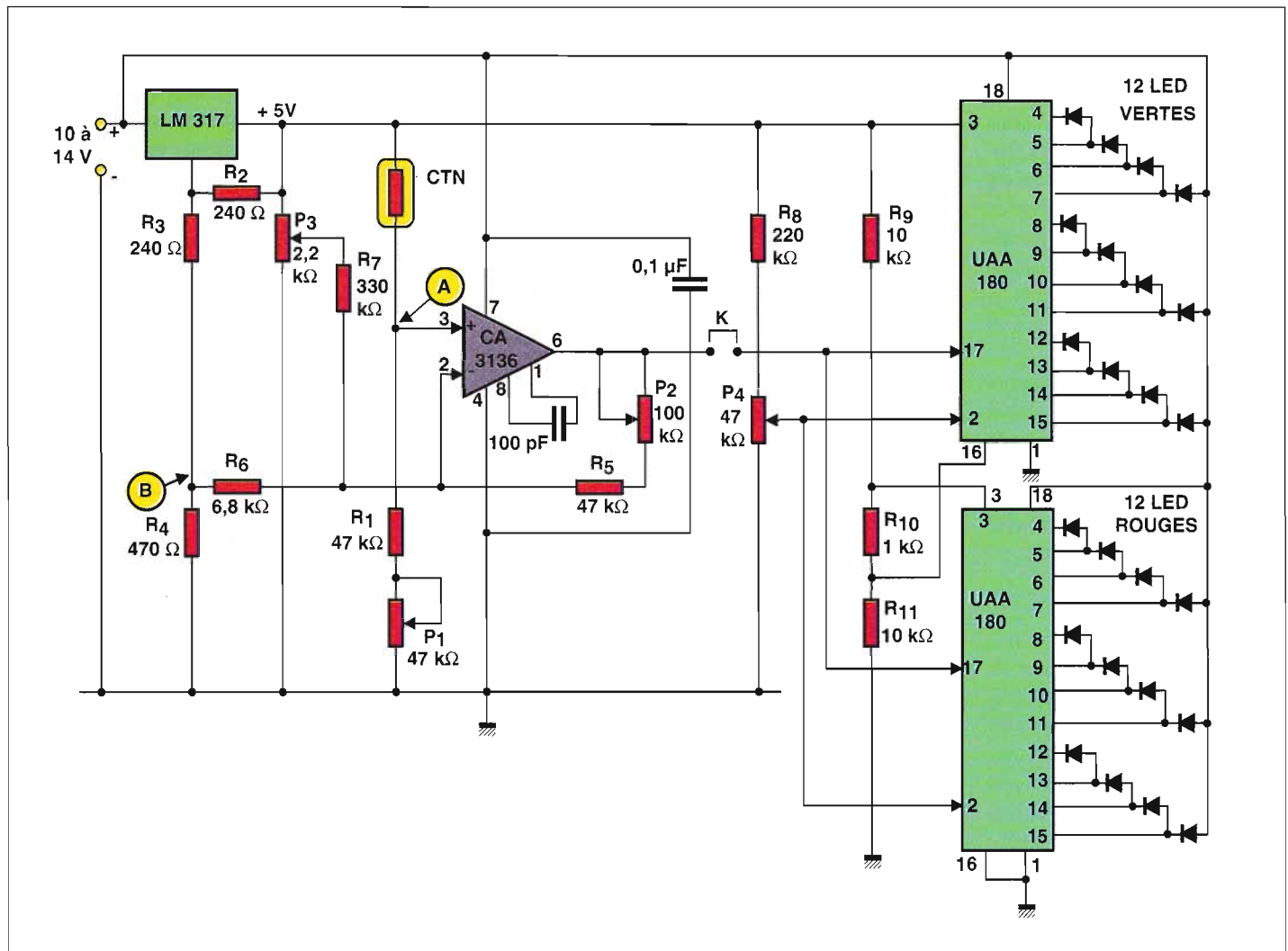


Fig. 6. - Ce thermomètre à LED est prévu pour surveiller la température d'un bain de révélateur couleur. Les potentiomètres servent à régler le zéro, la sensibilité et la luminosité des LED.

que ces derniers sont prévus pour allumer de 0 à 12 LED chacun, avec une disposition telle que, quand la LED n° n ($n \leq 12$) s'allume, toutes les LED de rang 1, 2... n-1 restent allumées. On obtient donc un trait lumineux, plus ou moins long, selon le potentiel de l'entrée de commande. Ce système est bon pour figurer un trait lumineux plus ou moins long, rappelant l'ascension d'un liquide coloré dans la colonne d'un thermomètre.

On peut utiliser des LED vertes pour le premier UAA 180, qui fonctionne pour les températures de 22 à 25 °C. Comme il commande 12 LED, nous admettrons que chacune correspond à une élévation de température de 0,25 °C. Le second UAA 180, entrant en fonction pour les températures de 25 à 28 °C, commande, par exemple, 12 LED rouges.

Le potentiomètre de réglage de la luminosité des LED est essentiel dans un tel instrument. N'oublions pas qu'il est prévu pour contrôler la température d'un révélateur couleur, et que, par conséquent, la lumière qu'il émet doit être confidentielle et, si possible, dirigée de façon telle qu'elle n'atteigne pas le papier dans le révélateur.

Précisons que le développement couleur est parfaitement contrôlable, à condition de disposer d'une lampe verte foncée (si l'on arrive à en trouver une, car cette lampe devient aussi du « sasfépu »), placée loin, donnant un éclairage discernable seulement par certains photographes un peu *nyctalopes* (c'est un cas assez fréquent chez les photographes qui font du laboratoire couleur). Autrement dit, il faut avoir des « yeux de chat ».

Les autres résistances, R₉ à R₁₁, accompagnant les UAA 180 sont destinés à faire en sorte que les actions des deux circuits se succèdent parfaitement. Normalement, l'échelle de sensibilité d'un UAA 180 est définie par deux broches, l'une (broche 3) correspondant au minimum de l'échelle, l'autre (broche 16) au maximum. On s'attendrait donc à voir la broche (16) du circuit « haut » connectée à la broche (3) du circuit « bas ». Or, l'expérience montre qu'il faut introduire un certain décalage de potentiel entre ces deux broches.

Mise au point

On commence par câbler le régulateur LM 317, le CTN, les résistances de R₁ à R₄₀ inclus. On amène le CTN aussi près que possible de 25 °C, et, en connectant un voltmètre numérique entre le point (A) et le point (B), on ajuste P₁₀ pour amener la tension lue au minimum. On ne touchera plus à P₁.

On câble alors l'amplificateur opérationnel, les résistances R₅ et R₆, le potentiomètre P₃ (mais pas R₇) ainsi que le potentiomètre P₂₀. On vérifie alors que, en amenant le CTN à 22 °C, la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel est proche de zéro et qu'elle atteint environ 6 V quand le CTN est porté à 28 °C.

En ayant câblé les deux UAA 180, les résistances qui vont avec et le potentiomètre P₄, ainsi que les 12 LED vertes et les 12 LED rouges, on commande les deux entrées (17) des UAA 180, non par la sortie de l'amplificateur opérationnel (on enlève le cavalier K de raccordement), mais par le curseur d'un potentiomètre permettant de donner une tension de 0 à 5 V par rapport à la masse, et l'on examine comment se comportent les LED. On fait cet essai en branchant un voltmètre entre le curseur de ce potentiomètre et la masse. On doit avoir une nouvelle LED qui s'allume chaque fois que le potentiel du curseur monte de 0,25 V.

Le point critique est le passage de la douzième LED verte à la première LED rouge. S'il ne correspond pas à un « pas » de 0,25 V du potentiel du curseur du potentiomètre, il faudra retoucher en conséquence le résistor R₁₀.

L'engin est à peu près terminé. On enlève alors le potentiomètre extérieur, qui a servi à tester les circuits UAA 180, et l'on remet le cavalier K. On met en place R₇.

On porte alors le CTN exactement à 25 °C et l'on règle P₃ jusqu'à ce que les 12 LED vertes soient allumées, sans qu'une seule LED rouge le soit. On porte la température du CTN à 22 °C et l'on retouche P₂ pour amener la première LED verte à la limite de l'extinction. Les réglages sont finis.

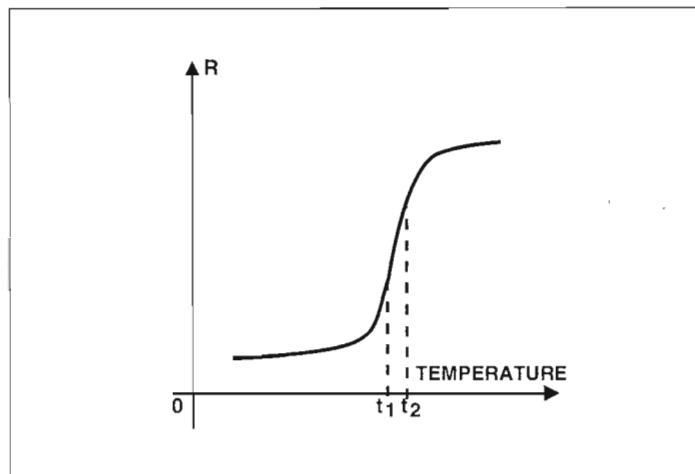


Fig. 7. - Un semiconducteur à Coefficient de Température Positif (CTP) présente, le plus souvent, une variation très rapide de résistance dans une plage réduite de température.

Notons que, en modifiant un peu certaines valeurs (il faut diminuer R₁), avec une température « centrale » de 37 °C et une plage qui s'étend de 33 à 41 °C, on transforme le thermomètre photographique en thermomètre médical. On préférera peut-être, pour cet usage, deux UAA 170, qui allument chacun une LED (une seule) parmi 16, car nous aurons ainsi 32 points de lecture pour la gamme de température.

L'intérêt d'un thermomètre médical à capteur en CTP de ce type réside dans la très faible inertie thermique du capteur : ce dernier prend en quelques secondes la température de ce qui l'entoure. En outre, comme il est petit, on peut l'utiliser (mais il faudrait une échelle de températures plus étendue) pour mesurer la température superficielle de la peau.

En effet, les médecins savent qu'une baisse de température des mains et des pieds est un des signes de l'hémorragie interne.

Étant donné que, dans notre exemple, nous utilisons une variation de température relativement très faible, nous ne serons pas gênés par la réponse non-linéaire du CTN.

Que vont donner les CTP ?

Les résistances du type semiconducteur à coefficient de température positif semblent, au premier abord, des capteurs intéressants, en raison de leur très grande sensibilité à la température. En fait, ils présentent presque

tous une variation de résistance en fonction de la température analogue à celle de la figure 7 : c'est dans une petite zone, entre les températures t₁ et t₂, très proches l'une de l'autre, que se manifeste la variation rapide de la résistance.

Cela peut être intéressant comme système de protection, par exemple pour couper le courant d'un appareil dès que l'on détecte une surchauffe.

Un autre emploi assez inattendu de ces CTP est la réalisation de thermostats rudimentaires. En effet, si l'on alimente un CTP par une tension constante, on dissipe de la puissance dans le dispositif, qui s'échauffe. Quand il arrive à la plage de température pour laquelle sa résistance augmente rapidement, la puissance qu'il dissipe diminue, et il finit par se stabiliser à une température comprise entre t₁ et t₂.

On utilise quelquefois un petit bloc de CTP, de quelques millimètres d'arête, alimenté sous tension constante, pour thermostatiser une « puce » de circuit intégré collée dessus. On arrive ainsi, avec une variation de température ambiante de 10 à 40 °C, à maintenir la température du morceau de silicium collé sur le CTP dans une plage de 1 °C (autour de 65 °C).

Il y a tout de même des CTP que l'on peut utiliser pour constituer des thermomètres. Ce sont les KTY 81 120 et KTY 81 110, de Philips, résistance 1 kΩ, coefficient de température de l'ordre de 0,75 %/°C.

J.-P. Cehmichen
(à suivre)