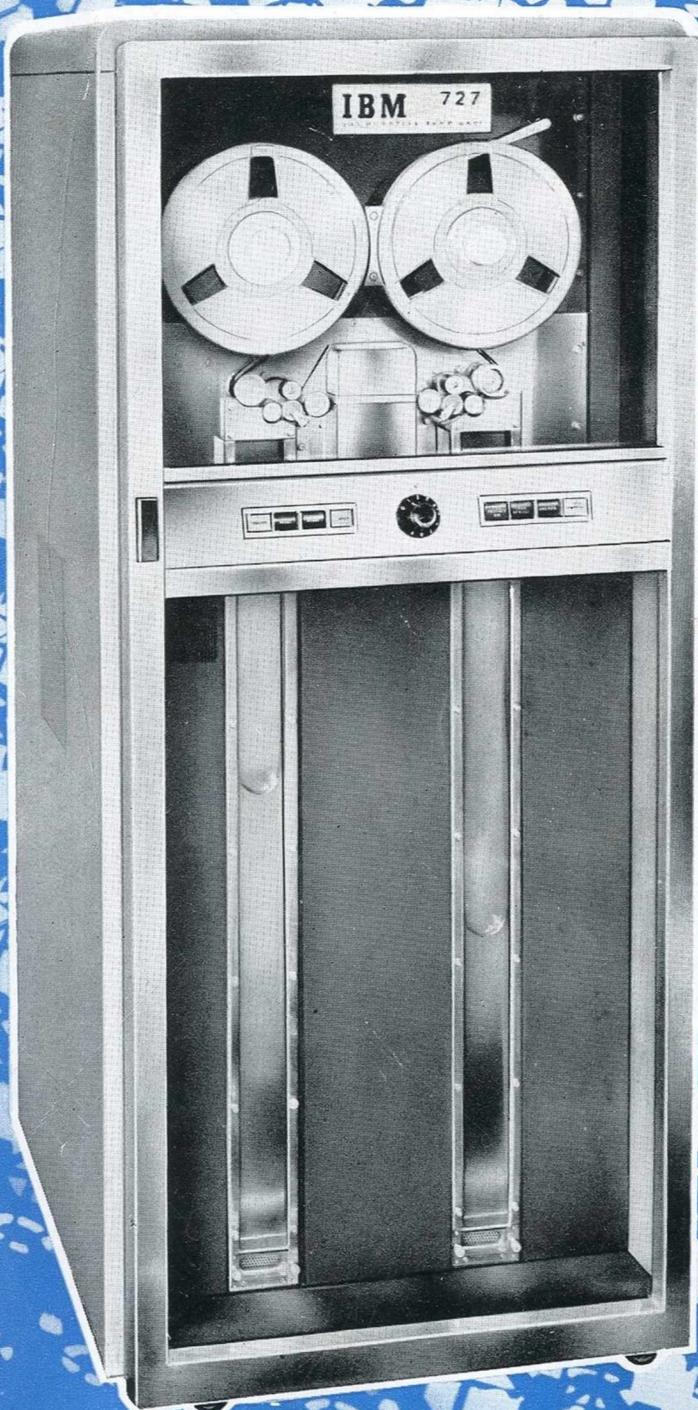


# électronique Industrielle

N° 10

SEPTEMBRE-OCTOBRE 1956

300 F.



## DANS CE NUMÉRO :

L'art de l'ingénieur.

Les cellules  
au sulfure de cadmium.

Un générateur  
pour chauffage H.F.

Stabilisation des tensions  
alternatives.

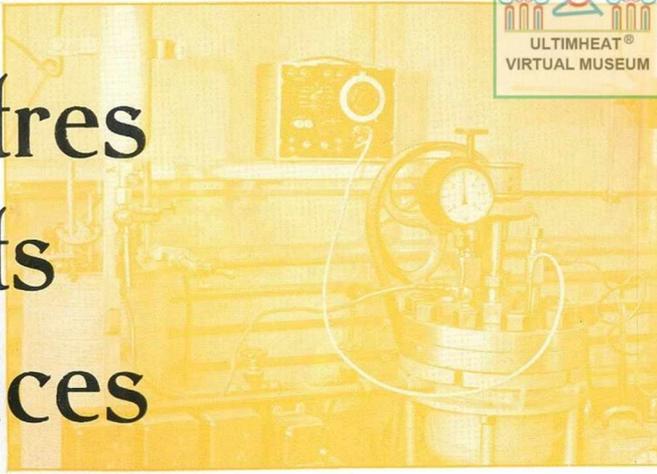
LES DIODES à germanium  
et silicium.

Thermomètres et thermostats  
à thermistances.

Le Couplatron.

A travers la Presse mondiale.

# Thermomètres et thermistats à thermistances



par M. LE CHEVALLIER et M. LELEU

## Introduction

L'utilisation des thermistances pour la mesure et la régulation des températures a déjà fait l'objet de nombreuses publications et de certaines réalisations commerciales.

Le succès grandissant des thermistances dans le domaine « température » vient en partie du fait qu'elles se prêtent aussi bien aux besoins courants, nécessitant une robustesse certaine alliée à une précision moyenne, qu'aux exigences scientifiques les plus dures pour des mesures à 10<sup>-4</sup> °C près et même moins, malgré ce que l'on a pu en dire.

Nous nous proposons de décrire dans ces pages quelques-uns des appareils nouveaux que nous avons conçus et réalisés pour les besoins de nos laboratoires. Ces appareils, dont certains sont déjà utilisés en plusieurs exemplaires dans notre Centre de Recherches d'Aubervilliers, ont donné entière satisfaction. Nous avons cherché à réaliser des appareils robustes, sensibles et suffisamment universels pour se prêter à différentes utilisations. En particulier, nous décrirons des thermomètres électroniques au dixième de degré, et un thermostat électronique aussi précis.

L'établissement des schémas de ces appareils est assez délicat. Les calculs nécessaires sont simples, mais demandent une certaine habitude. Aussi, avant de passer aux montages définitifs, donnerons-nous à titre d'exemple, tous les éléments de calcul permettant d'établir un projet.

## Généralités sur les thermistances commerciales

La résistance d'une thermistance est liée à la température par la relation :

$$R = a \cdot e^{b/T}, \quad (1)$$

avec

- R = résistance en ohms ;
- e = 2,718 (base des logarithmes naturels) ;

a et b = constantes pour chaque type d'élément ;

T = température en degrés K.

Cette formule est approchée, mais elle suffit pour les besoins courants, en particulier pour l'établissement des projets d'appareils. Elle peut encore prendre la forme :

$$\log R = \log a + \frac{1}{T} \cdot b \log e ;$$

$$\log R = A + k \tau, \quad (2)$$

avec A = log a, k = b log e et τ = 1/T.

Cette dernière égalité montre que le logarithme de la résistance est proportionnel à l'inverse τ de la température absolue. La pente de la droite est égale à b log e ; b est une caractéristique de la thermistance utilisée, mais n'est pas absolument constant : pour de grands écarts de température, b varie un peu.

En présence d'un type donné de thermistances, il est nécessaire de tracer log R en fonction de 1/T (on trouve dans le commerce des papiers à diagrammes possédant des coordonnées de ce type\*).

De ces droites, on déduit les valeurs des résistances à toutes températures ainsi que la valeur de b entre deux températures T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> :

$$b = \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot (\log R_1 - \log R_2)}{(T_2 - T_1) \log e} \quad (3)$$

Le fabricant fournit généralement la valeur de b au voisinage de la température ambiante avec une précision maximum de ± 1,5 % et souvent de ± 5 % seulement.

De la valeur de b, on déduit la « sensibilité » de la thermistance à toutes températures. La sensibilité, ou coefficient de température, est la variation, en centièmes, de résistance par degré à la température

considérée. Généralement désigné par α, ce coefficient est égal à :

$$\alpha \text{ (\%/}^\circ\text{C)} = \frac{100}{R} \frac{dR}{dT} \quad (4)$$

En tirant R de (1), on obtient :

$$\alpha = -100 \cdot \frac{b}{T^2} \quad (5)$$

avec T en degrés Kelvin.

La valeur de α aux environs de 25° varie pour les thermistances usuelles de -2 à -6 ‰. La sensibilité varie rapidement avec la température. Par exemple, si α 25 °C est de -5 ‰, on aura approximativement α = -2,8 ‰ à 200 °C et α = -11 ‰ à -100 °C. Une même thermistance sera donc environ 4 fois plus sensible à -100 °C qu'à + 200 °C.

Une autre caractéristique intéressante est la constante de dissipation, c'est-à-dire la puissance électrique à fournir pour élever la température du matériau de 1 °C dans des conditions bien définies. Nous verrons plus loin que cette constante est très utile pour la détermination des tensions à appliquer.

Enfin, pour terminer ces généralités, nous donnons quelques indications sur les tolérances des caractéristiques desquelles dépendront l'interchangeabilité des éléments, qui est, il faut le dire, une des principales difficultés de réalisation commerciale d'appareils relativement précis. La dispersion des caractéristiques vient du procédé de fabrication et, pour l'instant, nous ne pensons pas qu'il soit possible de l'améliorer beaucoup. Le plus souvent, les fabricants donnent la tolérance sur la résistance au voisinage de la température ambiante (de ± 15 à ± 30 ‰). A notre avis, cette indication est assez mal définie et il serait préférable d'avoir une tolérance sur la valeur de b qui caractérise beaucoup mieux l'élément. Comme nous l'avons indiqué précédemment, b est défini de ± 1,5 ‰ à ± 5 ‰ suivant les matériaux. L'importance d'une faible dispersion de valeurs de b est grande, car s'il

\* Il est assez curieux de signaler que ces diagrammes sont ceux qui servent aux chimistes pour le tracé des courbes : tension de vapeur - température, qui sont des droites avec ces coordonnées.



est facile d'imaginer des circuits de correction pour des thermistances ayant une valeur de  $b$  mais des valeurs très différentes de  $R_{20}$  ou de  $R_{25}$ , il devient presque impossible de faire correspondre deux thermistances ayant des  $b$  différents.

Cette remarque peut se déduire clairement de la formule (1). A une même température, on a pour deux éléments différents :

$$R_T/R'_T = \frac{a e b/T}{a' e b'/T}$$

Si  $b = b'$  et  $a \neq a'$ , on a :

$$R_T/R'_T = \frac{a}{a'}$$

C'est une relation simple, facile à satisfaire dans un circuit de correction.

Si  $a = a'$  et  $b \neq b'$ , on a :

$$R_T/R'_T = \frac{e b/T}{e b'/T}$$

Cette relation est impossible à matérialiser dans un circuit de correction puisqu'elle dépend de  $T$ .

Il faudra donc sélectionner les thermistances suivant la pente des droites :  $\log R = f(1/T)$  précédemment citées et, de plus, travailler dans des zones relativement pas trop larges en température (une centaine de degrés Celsius environ) pour concevoir et réaliser l'interchangeabilité des éléments pour des mesures de précision moyenne.

### Éléments de base des divers montages décrits :

Il est très séduisant, à première vue, d'appliquer aux circuits à thermistances des courants modulés, cela afin de pouvoir les amplifier facilement et par là d'augmenter la sensibilité des appareils. Nous avons déjà indiqué, au cours d'un de nos précédents articles (« Débitmètres électroniques à thermistances », *Electronique Industrielle*, n° 4), que des utilisations de ce type se heurtent parfois à un inconvénient qui tient à ce que l'élément semi-conducteur introduit une certaine non-linéarité.

Cette proportion varie d'un type de thermistance à l'autre et gêne considérablement l'emploi du courant alternatif. C'est ainsi qu'en courant alternatif, il est difficile de mesurer mieux que 0,001 °C et que certains éléments ne permettent pas d'atteindre 0,1 °C.

Malgré cela, nous nous sommes attachés à réaliser des indicateurs et des régulateurs de température fonctionnant en courant alternatif 50 Hz à cause des nombreux avantages que cela présente. Il est nécessaire alors de sélectionner les éléments de mesure de façon plus sévère.

Notre montage de base est naturellement un montage classique en pont tel que celui de la figure 1. La tension de déséquilibre est amplifiée et agit dans le cas d'un indicateur sur un œil magique et, dans le cas de régulateurs, sur des thyristrons.

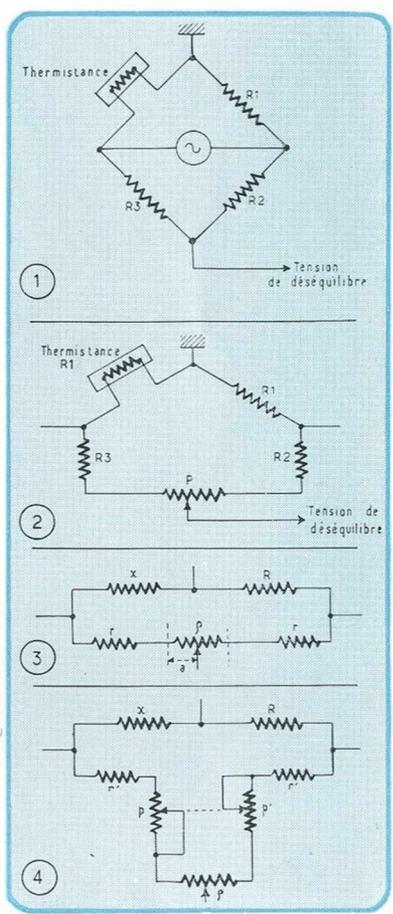


Fig. 1. — Le montage de base est le classique pont de Wheatstone.

Fig. 2. — Ainsi modifié, il assure une graduation de  $P$  à peu près proportionnelle à la température.

Fig. 3. — Éléments de base du calcul de linéarité.

Fig. 4. — Nouvelle modification permettant de procéder à l'ajustage des sondes.

L'équilibre du pont peut être réalisé par exemple en remplaçant  $R_1$  par un potentiomètre, mais cela ne permet pas d'obtenir des gammes linéaires. Il est plus intéressant de réaliser le montage de la figure 2 qui permet, par le réglage de  $R_2$ ,  $R_3$  et  $P$ , de définir la largeur d'une gamme de température, alors que  $R_1$  situe cette gamme. Pour obtenir une rotation du potentiomètre  $P$  sensiblement linéaire en fonction de la température, il faut que la gamme de températures soit assez étroite. Il est possible de la calculer d'une manière assez exacte de la façon suivante :

Prenons la figure 3. L'équation du pont donne :

$$\frac{x}{r+a} = \frac{R}{r+(q-a)}$$

soit

$$x = \frac{R(r+a)}{r+q-a} \quad (6)$$

Nous avons vu que l'équation de la thermistance est :

$$\log x = k \cdot 1/T, \text{ avec } k = b \log e \quad (7)$$

et  $T = 273 + t$ .

De (6) et (7), on tire la fonction  $a(t)$  qui représente la rotation du potentiomètre  $q$  (fig. 3) en fonction de la température :

$$a(t) = \frac{(r+q) 10k/T - Rr}{10k/T + R} \quad (8)$$

Cette fonction est développée jusqu'au second ordre selon la formule de Mac Laurin. On trouve que le terme du second degré est inférieur ou égal à une fraction donnée  $m$  du terme du premier degré si :

$$t - t_0 \leq 0,869 m \frac{T_0^2 (x_0 + R)}{(k - 0,869 T_0) (x_0 - R)} \quad (9)$$

avec :

$t_0$  = température de bas de gamme en degrés Celsius ;

$t$  = température de haut de gamme en degrés Celsius ;

$T_0 = 273 + t_0$  ;

$x_0$  = résistance de la thermistance à  $t_0$  ;

$k = b \log e$  ;

$m$  = définition de la linéarité (si  $m = 0,05$  par exemple, la gamme sera linéaire à 5 % près).

Comme exemple, prenons le cas d'une sonde type 32 A 1 de la Victory Engineering Corporation :

1)  $t_0 = 0$  °C ;  $T_0 = 273$  °K ;  $x_0 = 5000$  Ω.  
 $k = 3600 \log e = 3600 \times 0,4342$ .

Prenons  $R = 3400$  Ω ; on trouve :

$$t - t_0 = 346 m,$$

soit pour  $m = 0,06$  :

$$t - t_0 \approx 20$$
 °C

La gamme 0 à 20 °C sera donc « linéaire » à 6 % près.

2)  $t_0 = 60$  °C ;  $T_0 = 333$  °K ;  $x_0 = 500$  Ω.  
 $k = 3600 \times 0,5342$  ;  
 $R = 365$  Ω.

On trouve  $t - t_0 = 490 m$ ,

soit pour  $m = 0,04$  :

$$t - t_0 \approx 20$$
 °C.

La gamme 60 à 80 °C sera linéaire à 4 % près.

Des linéarités de cet ordre sont généralement suffisantes pour les usages courants, et en tous les cas assez voisines pour que l'on puisse superposer plusieurs gammes sur une même graduation.

Si l'on veut réaliser un appareil multigammes, il suffira de connaître la résistance  $R$  ; mais, comme nous allons le voir, il faudra commuter aussi les deux résistances  $r$ . En effet, de la relation (1) on tire :

$$\frac{R_{T_1}}{R_{T_2}} = eb (1/T_1 - 1/T_2) = eb \left( \frac{T_2 T_1}{T_2 - T_1} \right)$$

Cette relation montre que  $\frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}$  dépend entre autres de  $T_1, T_2$ , c'est-à-dire de la température de travail. Par exemple, pour une sonde du même type que celle de l'exemple précédent (n° 32 A 1), on a pour un même écart de 20° à 0 et 60° :

$$\frac{R_0}{R_{20\text{ }^\circ\text{C}}} = 2,5 \text{ et } \frac{R_{60\text{ }^\circ\text{C}}}{R_{20\text{ }^\circ\text{C}}} = 1,85.$$

Les résistances  $r$  à commuter seront calculées de telle façon que la rotation totale du potentiomètre  $Q$  corresponde toujours à un écart  $T_2 - T_1$  constant, par exemple 20 °C quel que soit  $T_1$ .

Il est facile de vérifier que si :

$$\frac{R_{T_1}}{R_{T_2}} = k \text{ avec } T_2 - T_1 \text{ constant, on a :}$$

$$r = \frac{Q}{\sqrt{k-1}} \quad (11)$$

Pour réaliser le circuit d'ajustage des sondes, il suffit d'introduire dans  $r$  un potentiomètre comme indiqué dans la figure 4. C'est en réalité un potentiomètre double branché de façon que la somme des résistances en série soit constante. Ce

montage permet de déplacer le point de fonctionnement de  $Q$  sans entraîner de changement important dans  $k$  (voir ci-dessus).

L'erreur maximum pour des éléments éloignés de  $\pm 20\%$  atteint dans les plus mauvaises conditions  $\pm 1\%$  dans une gamme de 20 °C, par exemple.

On a naturellement :

$$r' = r - \frac{p}{2}$$

Cet ajustage des sondes ne peut plus se faire aussi simplement avec un montage multigamme.

*Exemple d'application numérique des calculs précédents par la réalisation de montages complets.*

Cet exemple d'application permettra au lecteur d'utiliser pratiquement les indications que nous venons de donner.

Nous voulons réaliser un thermomètre électronique au dixième de degré, allant de 0 à 200 °C, avec une échelle linéaire.

Comme thermistances, nous prendrons par exemple celles de la *Victory Engine-*

*ring Corporation*, qui sont d'un diamètre de 2 mm avec enrobage de verre. Les deux types courants sont les 32 A 1 et 51 A 1 ayant respectivement des  $R_{20\text{ }^\circ\text{C}}$  de 2000 et 100 000  $\Omega$  à  $\pm 20\%$ . On commence par tracer, pour quelques éléments, les courbes log R en fonction de  $1/T$  et on déduit les valeurs de R de 10 en 10 °C.

Nous avons démontré précédemment que les gammes ne devront pas avoir plus de 20 °C pour que la linéarité soit acceptable avec ce type de sonde. Nous obtenons ainsi 10 gammes entre 0 et 200 °C.

Le tableau des résistances est donné par la figure 5 pour une sonde de chaque type. L'examen de ce tableau indique que pour couvrir toute la zone 0-200°, nous devons prendre les deux sondes successivement, car dans un cas,  $R_{200}$  serait beaucoup trop faible et les résistances de ligne prendraient une importance prohibitive ; dans l'autre cas,  $R_0$  serait beaucoup trop élevé, ce qui demanderait des résistances d'équilibre très grandes, difficiles à réaliser.

Nous choisissons 0-80 °C pour la première sonde et 80-200 °C pour la seconde, pour concilier ces deux exigences.

$t$ (°C)	$T$ (°K)	$R_t$		$k'$
		Sonde 32 A 1	Sonde 51 A 1	
0	273	5133		
10	283	3246		2,42
20	293	2118		
30	303	1421,5		2,17
40	313	977,4		
50	323	689,6		1,96
60	333	496,2	24 810	
70	343	363,9	16 755	1,83
80	353	271,7	11 570	
-----				
90	363	206,1	8 159	1,98
100	373	158,7	5 860	
110	383	123,9	4 283	1,84
120	393	97,9	3 181	
130	403		2 397	1,74
140	413		1 831	
150	423		1 416	1,65
160	433		1 109	
170	443		878	1,58
180	453		702	
190	463		567	1,52
200	473		462	

Gammes	Sonde	Températures	R	r
1	32 A 1	0 à 20	3246	343
2	"	20 à 40	1421,5	402
3	"	40 à 60	689,6	475
4	"	60 à 80	363,9	540
5	51 A 1	80 à 100	8159	467
6	"	100 à 120	4283	535
7	"	120 à 140	2397	596
8	"	140 à 160	1416	670
9	"	160 à 180	878	740
10	"	180 à 200	567	817

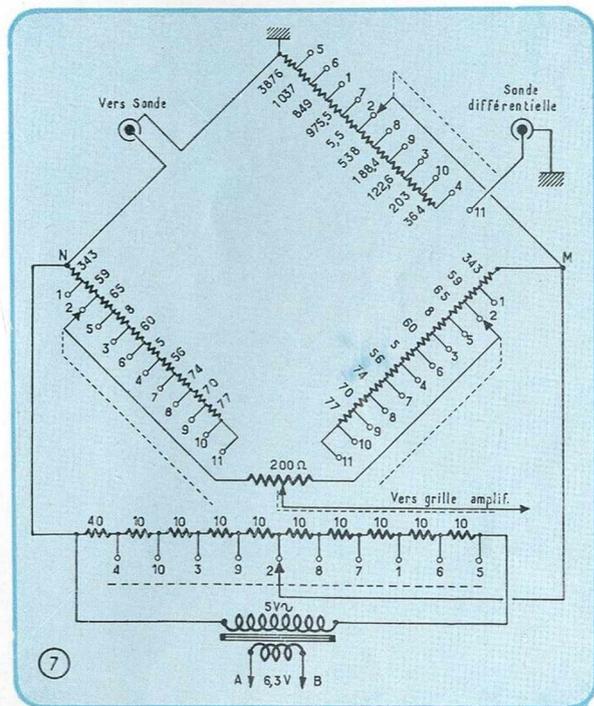


Fig. 5. — (Tableau du haut). — Correspondance entre résistances et températures pour deux thermistances du commerce.

Fig. 6. — (Au dessous). — Découpage des différentes gammes

Fig. 7. — Schéma définitif du thermomètre à thermistance. Il couvre l'intervalle 0-200° C en 10 gammes linéaires, jusqu'à 80° C avec la sonde 32 A 1 et au-delà avec la sonde 51 A 1.

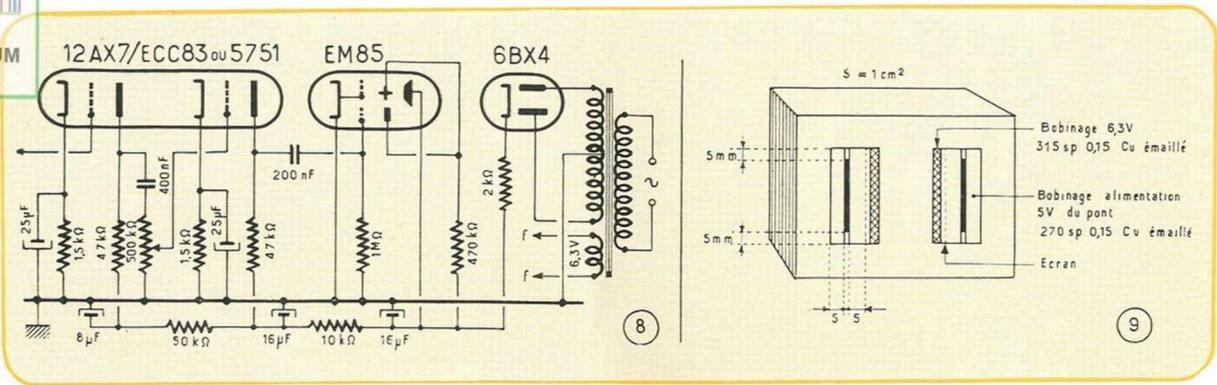


Fig. 8. — L'indicateur de zéro fait appel à un trèfle cathodique.

Fig. 9. — Détails de construction du transformateur d'alimentation du pont.

Les rapports  $\frac{R_i}{R_{i+20}}$ , calculés avec les valeurs du tableau, sont désignés par  $k'$  (colonne 4 de la figure 5).  
Revenons au schéma 3; les diverses valeurs de R seront successivement les points milieu des gammes, soit:

$R_{10}, R_{20}, R_{30}, \dots$

Les valeurs de  $r$  seront données, pour chaque gamme, par la formule (11) en remplaçant  $k$  par sa valeur.

On choisira  $Q$  de telle façon que  $r$  pour  $k$  le plus faible n'atteigne pas de valeurs trop élevées. Nous choisissons ici  $Q = 190 \Omega$  et nous prendrons en pratique un potentiomètre de  $200 \Omega$  pour permettre un certain recouvrement des gammes. On obtient ainsi un tableau tel que celui de la figure 6 qui permet d'établir le schéma définitif de la figure 7.

Les résistances sont bobinées sur de petites plaquettes en toile bakélisée. Comme fil, nous utilisons de préférence le manganin émaillé de 0,1 mm de diamètre qui est très facile à bobiner. Ces résistances seront exécutées à  $\pm 0,5 \%$  près.

Comme commutateur, on utilise un contacteur à 4 galettes, 1 circuit, 12 positions. Trois de ces galettes sont réunies aux diverses résistances en suivant le numéro de position de la figure 7 de façon à assurer le recouvrement des 2 gammes. La quatrième galette permet la commutation de la tension d'alimentation sur un diviseur de tension. En effet, les thermistances sont très sensibles à la puissance qu'elles dissipent et, comme cette dernière est liée à la résistance, on est obligé, pour conserver une bonne sensibilité et pour éviter un échauffement de l'élément, d'injecter une tension bien adaptée à chaque gamme. On calcule, pour chaque gamme, la tension par la formule simple:

$$u = 2 \sqrt{p \cdot R \cdot 10^{-3}}$$

avec:

$u$  en volts;

$p$  = puissance dissipée dans l'élément (en milliwatts);

$R$  = résistance d'équilibre (des figures 3 ou 4, par exemple).

On obtient pour notre exemple, avec  $p = 1$ :

En disposant les tensions pour la commutation générale et en arrondissant les

$$\frac{1,6 \times 490,9}{490 + 610 + 0,9} \approx 0,0007 \text{ V.}$$

Le tube EM 85 est nettement sensible à 0,2 ou 0,3 V; il suffira donc d'un gain en tension de 500 environ entre le pont et l'indicateur cathodique.

Gammes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tension	3,7 V	2,3 V	1,7 V	1,3 V	5,8 V	4,3 V	3,3 V	2,5 V	2 V	1,6 V

valeurs, il est facile d'établir le diviseur de la figure 7, alimenté sous 5 V par un transformateur dont le secondaire est branché par exemple sur la tension « filament » du châssis. On a ainsi un commutateur à 10 positions pour les 10 gammes prévues. La onzième position permet le montage en différentiel en branchant, à la place des résistances R (voir figure 3 et 4), une deuxième sonde à thermistances.

Le schéma du pont étant maintenant bien établi, il reste à réaliser un indicateur de déséquilibre convenable. Nous choisissons, pour des raisons de robustesse, l'indicateur à « œil magique », un EM 85 par exemple, associé à un amplificateur.

La sensibilité la plus faible de toutes les gammes sera celle de la gamme 10 (180-200°), puisque nous avons vu:

$$\alpha = -100 b/T^2$$

Dans notre cas, pour la sonde 51 A 1, on a:  $b = 4100$ , soit:

$$\alpha = -1,8 \%$$

par degré à 200 °C.

On trouve ainsi que pour 1 dixième de degré à 200 °C, avec une tension d'alimentation de 1,6 V, la tension de déséquilibre avec les valeurs du schéma 7 sera:

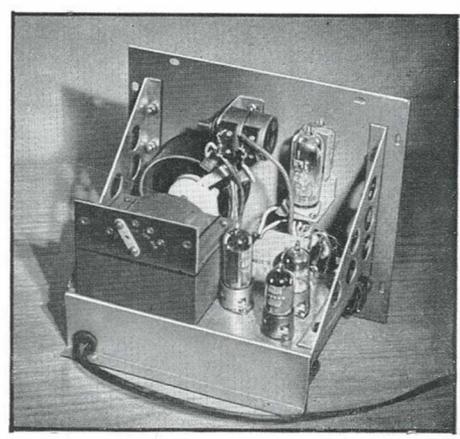
$$\Delta r = 4,90 \times 0,18 \approx 0,9 \Omega$$

soit:

$$\Delta e = \frac{1,6 \times 490}{490 + 610} -$$

Le montage complet de l'indicateur est donné en figure 8. Un tube 12 AX 7/ECC 83 (ou mieux 5751 en série 5 étoiles), dont les deux triodes sont montées en cascade, donne facilement le gain escompté avec 50 k $\Omega$  en série avec les anodes. Le potentiomètre de 500 k $\Omega$  contrôle le gain de la deuxième triode. Il permet le repérage

Disposition des principaux éléments dans le prototype de thermomètre.



plus facile de l'équilibre pour des grands écarts de température. Il sert en même temps d'interrupteur secteur.

Le transformateur d'alimentation du pont de la figure 7 doit être bobiné de telle façon que, du côté pont, le bobinage ait par rapport à la masse des capacités aussi faibles que possible et en tout cas symétriques. Les caractéristiques d'un transformateur que nous utilisons sont données par la figure 9.

Le maniement de l'appareil est très simple. On dégrossit la lecture par le bouton « Gammes » en diminuant la sensibilité, puis on ajuste par le bouton du potentiomètre principal en poussant la sensibilité au maximum.

L'étalonnage des gammes est facile si toutes les résistances sont exactes. Il suffit

de la sonde est la plus faible, la puissance dissipée par la thermistance ne dépasse pas 1 mW. La sensibilité est encore largement suffisante dans la gamme 0-30 pour que la précision soit constante.

L'amplificateur de la figure 10 est remarquablement stable avec un gain en tension voisin de 2500. La sensibilité est de l'ordre de 100  $\mu$ V, alternatif 50 Hz.

Toutes les valeurs ont été calculées selon le processus précédemment exposé. La disposition d'ensemble est visible sur la photo de la page 150.

Un cas un peu particulier est celui des très basses températures ( $-150^{\circ}\text{C}$  par exemple). D'après (5), on constate que la sensibilité devient très élevée. Elle passe par exemple de  $-4,2\%$  à  $25^{\circ}\text{C}$ , à  $-10,4\%$  à  $-100^{\circ}\text{C}$  ( $b$  varie dans cet

figure 7 associé à un amplificateur différentiel (fig. 11).

La phase de la tension amplifiée vient pour discriminer le sens de déséquilibre du pont.

L'amplificateur se compose de deux étages triodes (12 AX 7) montés en amplificateurs de tension; les résistances de charge très élevées (1 M $\Omega$ ) permettent d'atteindre un gain de tension voisin du coefficient d'amplification. Ce dernier est en moyenne de l'ordre de 90 pour les tubes courants, ce qui donne pour les deux étages un gain de 8000.

La tension amplifiée réglable par le potentiomètre  $P_2$  de 500 k $\Omega$ , qui sert également d'interrupteur secteur, est injectée dans le tube discriminateur 12 AU 7. Les grilles et les cathodes de ce tube sont

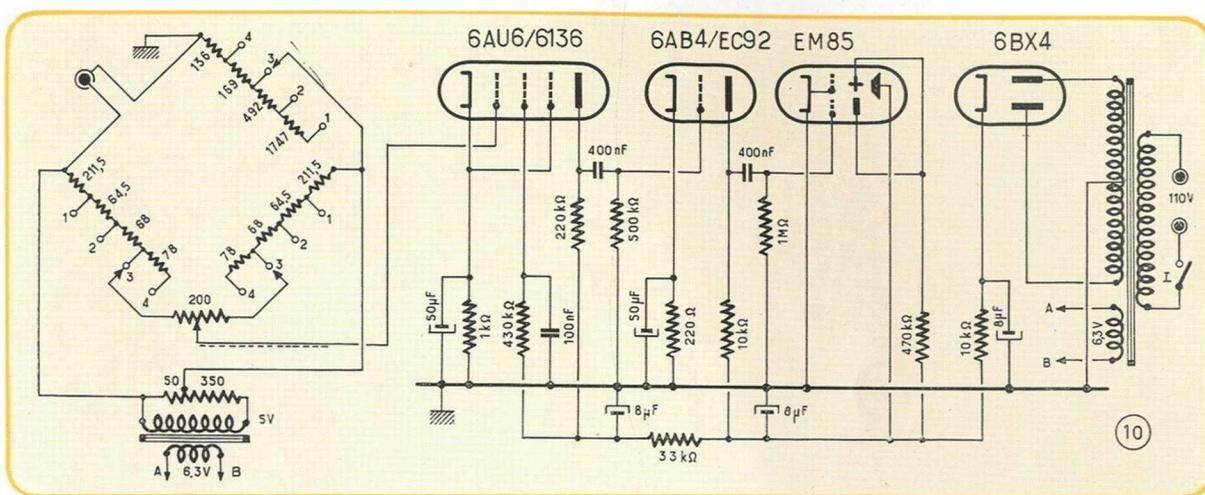


Fig. 10 — Montage simplifié n'utilisant qu'une seule sonde, pour l'intervalle 0-120° C en 4 gammes. Précision : 0,1° C.

d'étalonner une seule gamme, par exemple la gamme 60 à 80° C pour que l'ensemble soit correct. Cet étalonnage se fera de préférence à l'aide d'un bain dont la température sera stabilisée au dixième de degré, en attendant pour chaque point que l'équilibre soit bien atteint, l'inertie thermique des sondes à thermistances étant faible par rapport à celle des thermomètres à mercure au dixième de degré.

Cet ensemble, évidemment assez complexe, sert à illustrer certaines des possibilités de montages de thermomètres à thermistances. Dans bien des cas, les appareils sont plus simples. La figure 10 se rapporte à un de ces montages simplifiés. Il n'y a qu'une seule sonde de mesure et la zone de température est de 0 à 120° C en quatre gammes de 30° C. Il est facile d'apprécier le dixième de degré.

L'alimentation du pont se fait à tension constante calculée de telle façon que dans la gamme 90-120, où la résistance

exemple de 3600 à 3113° K). Cette sensibilité élevée a une conséquence fâcheuse, qui est la diminution de la linéarité telle que nous l'avons exprimée par (9). A la température de  $-100^{\circ}\text{C}$ , une gamme n'est linéaire à 2 % près que sur 2 à 3° C; il faut donc pour les basses températures renoncer aux échelles linéaires avec notre montage de base. Nous pensons pouvoir décrire, dans quelque temps, des montages pratiques de mesure et de régulation dans la région de  $-100^{\circ}\text{C}$ .

### Régulateurs de température

Pour passer aux systèmes de régulation, il suffit de faire actionner par la tension alternative de sortie des relais ou des moteurs d'asservissement.

Nous avons réalisé un thermorégulateur avec le montage de base de la fi-

montées en parallèle; les anodes sont alimentées en opposition de phase par les deux extrémités de l'enroulement H.T. du transformateur d'alimentation. Les anodes sont chargées par les enroulements de 6500  $\Omega$  du relais polarisé  $R_1$  (Siemens T. Bv. 4/737, chez Radio-Relais sous le n° RS6) avec 10 k $\Omega$  en série. Les enroulements sont branchés de façon qu'il y ait compensation, c'est-à-dire que, grille à la masse, le relais soit en équilibre dans la position médiane. La tension amplifiée que l'on injecte dans les grilles de la 12 AU 7 est, selon le sens du déséquilibre du pont, en phase avec l'une des anodes et en opposition de phase avec l'autre ou vice-versa. Le relais polarisé est ainsi monté en différentiel; les contacts sont franchement établis pour  $\pm 1$  V d'écart.

Avec la sensibilité maximum, le relais bascule pour  $\pm 100$   $\mu$ V à l'entrée de l'amplificateur. Comme nous l'avons vu précédemment, un dixième de degré pro-

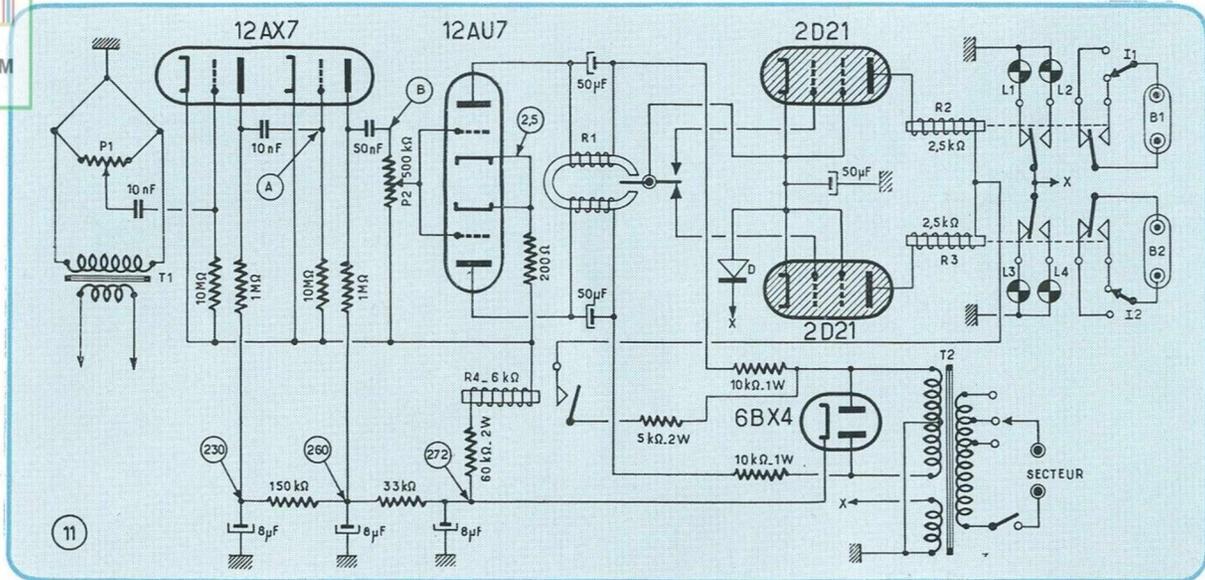


Fig. 11. — L'amplificateur différentiel qui est à la base du thermostat électronique. Le potentiomètre P 1 a même fonction que dans le montage précédent ; P 2, couplé à l'interrupteur secteur, règle la sensibilité ; R 1 est un relais polarisé Siemens T.Bv. 4/737, R 2 et R 3 des relais à bague de déphasage Langlade et Picard, R 4 un relais ACRM type RMX 1 T ; I 1 et I 2 sont les contacteurs pour la sélection des lamelles de travail et de repos sur les bornes de sortie B 1 et B 2 ; L 1 et L 3 sont des lampes témoins rouges de 6,3 V - 0,3 A ; L 2 et L 4 des lampes vertes identiques ; D est un redresseur au sélénium, 1 élément, 100 mA.

duit une tension de déséquilibre de 700  $\mu$ V.

La sensibilité est donc largement suffisante et permettrait presque un montage au centième de degré. Les courbes de la figure 12, qui traduisent les variations de tension en fonction du déséquilibre thermique, donnent une idée de la sensibilité.

Aux bornes des enroulements du relais polarisé, nous avons placé un condensateur électrochimique de 50  $\mu$ F (50/60 V) pour bloquer toute trace de courant alternatif. Cela entraîne un fonctionnement différé d'environ 1 seconde qui n'est généralement pas gênant.

La puissance de coupure de ce type de relais est très faible ; aussi avons-nous adopté des relais secondaires à thyratrons 2 D 21 dont le fonctionnement se passe de commentaires. Nous ferons simplement remarquer le système de retard utilisé pour l'application de la H.T. sur les thyratrons ; en effet, les tubes 2 D 21 doivent être chauffés au moins 10 secondes avant qu'on ne leur applique la haute tension. Nous avons obtenu simplement ce retard en injectant la haute tension par l'intermédiaire d'un relais à faible consommation (R<sub>4</sub>) monté en parallèle sur la haute tension. De cette façon, le retard au fonctionnement est égal au temps de chauffage de la 6 BX 4 (env. 15 s). Les relais secondaires sont assez puissants pour couper directement 5 A sous 220 V en régime continu. Ils sont du type à bague de dé-

phasage, spéciaux pour thyratrons (Ets Langlade et Picard). Ils sont équipés de deux contacts inverseurs, les uns pour les lampes-témoins rouges et verts et les autres pour la commande des circuits extérieurs ; deux contacteurs inverseurs permettent de sélectionner les lamelles de repos ou de travail.

Les photographies donnent une idée de la disposition d'ensemble.

Les sondes à thermistances utilisées sont généralement de petites baguettes de verre de 2 à 4 mm de diamètre et de 4 à 6 cm de longueur comportant à une des extrémités, et enrobé dans le verre, un petit grain de semi-conducteur connecté à deux fils de platine, eux-mêmes raccordés à deux fils de cuivre. Pour l'usage pratique, nous plaçons ces éléments dans des gaines de verre ou d'acier inoxydable avec sortie par câble coaxial (fig. 15). On place dans la gaine une goutte d'huile silicone pour réaliser un bon contact thermique. La capacité du câble coaxial n'est pas sans influence. Pour le montage précédemment décrit, deux mètres de câble télévision sont utilisables sans inconvénient. Au-delà, il devient nécessaire de compenser la capacité en plaçant entre M et masse (fig. 7) une capacité de  $(80 \times l)$  pF,  $l$  étant la longueur en mètres du câble coaxial type télévision.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la position 11 des commutateurs (fig. 7) permet le montage en différentiel.

Le montage régulateur que nous venons de décrire peut ainsi être utilisé pour la commande de circuits par de faibles différences de température entre deux points. Il peut, par exemple, être utilisé pour la régulation des débits telle que nous l'avons décrite dans *Electronique Industrielle*, n° 4. Cet ensemble de régulation présente de très nombreux avantages et

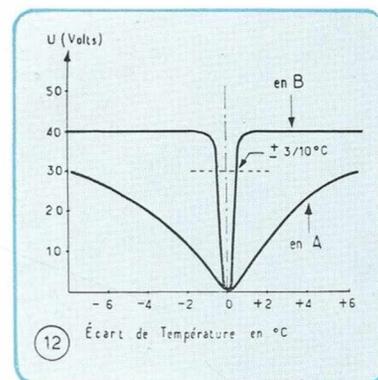
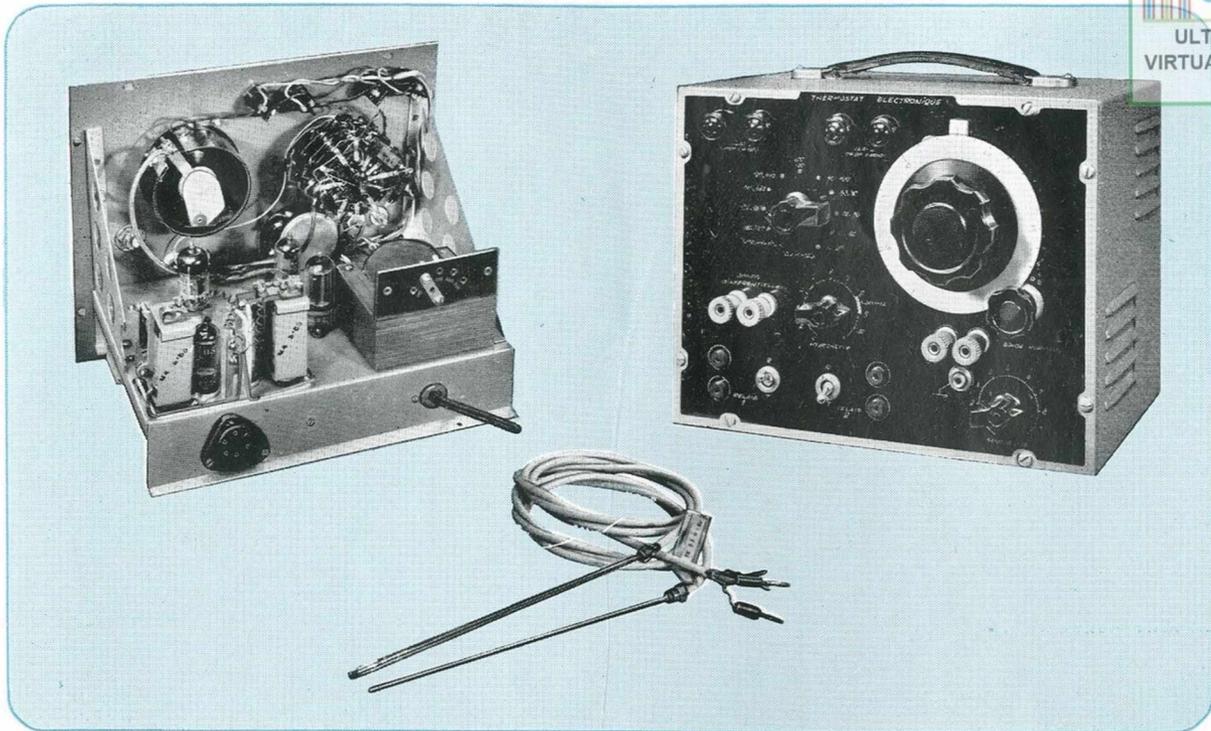


Fig. 12. — Tensions, en fonction de la température, aux points A et B de la figure 11. La sensibilité est excellente.



Ces trois photographies sont relatives au thermostat électronique, que l'on voit par ailleurs à l'œuvre dans le titre de cet article. Les sondes à thermistances sont en verre ou en acier inoxydable, d'un encombrement très réduit : diamètre extérieur 3 à 5 mm.

peut trouver des applications extrêmement intéressantes. Nous pensons pouvoir décrire prochainement quelques-unes des applications particulières relatives à la chimie.

### Conclusions

Le lecteur trouvera peut-être que les descriptions que nous venons de faire sont

assez complexes, que les réalisations sont assez difficiles à exécuter : l'emploi des thermistances conduit en effet à des calculs un peu différents de ceux auxquels on est habitué et à des circuits plus complexes. C'est la rançon de la grande sensibilité de ces semi-conducteurs ; mais à bien peser l'ensemble, leur emploi est jus-

tifié et mérite largement un effort supplémentaire.

M. LE CHEVALLIER  
et M. LELEU

Ingénieurs au CENTRE DE  
RECHERCHES PECHINEY.

## L'ÉLECTRONIQUE AU SERVICE DE L'AUTOMOBILE

S'il faut en croire notre confrère « Elektronik », la grande nouveauté dans certains modèles 1957 de voitures U.S.A. sera constituée par un radar explorant l'espace en avant de l'automobile et qui, en décelant un obstacle, agira sur les freins pour ralentir ou même arrêter complètement le véhicule.

La même revue signale qu'au dernier Salon de l'Auto de

Bruxelles, Buick a exposé un modèle de luxe (type « Centurion ») dans lequel le rétroviseur est remplacé par un écran de télévision reproduisant l'image captée par une caméra montée à l'arrière.

Il y a longtemps déjà, notre ami Hugo Gernsback avait prédit ces deux perfectionnements. Une fois de plus, ses prophéties se réalisent...

## TRANSISTORS AUX U.S.A.

★ Presque tous les constructeurs de récepteurs radio aux U.S.A. produisent des modèles portatifs équipés de transistors. A elle seule, General Electric en a fabriqué déjà plus de 100 000 exemplaires.

Le nombre des transistors varie de 6 à 8 par récepteur. La détection se fait, bien entendu, par semi-conducteur. L'étage de sortie est, le plus souvent, un push-

pull. Les prix s'étagent de 40 à 90 dollars (15 000 à 35 000 F).

★ Le prix de gros des transistors ordinaires est actuellement de l'ordre de 1 dollar. Parmi le grand nombre des types catalogués, seuls 30 modèles sont couramment employés.

★ Une horloge électrique sans fil vient

d'être lancée sur le marché américain. Elle emprunte son énergie par induction aux canalisations de courant alternatif. Ses circuits comportent 7 transistors.

★ Un convertisseur à transistors permet d'obtenir une tension continue de 16 000 V à partir d'une pile sèche de 1,5 V. De quoi faciliter la réalisation des téléviseurs portatifs.