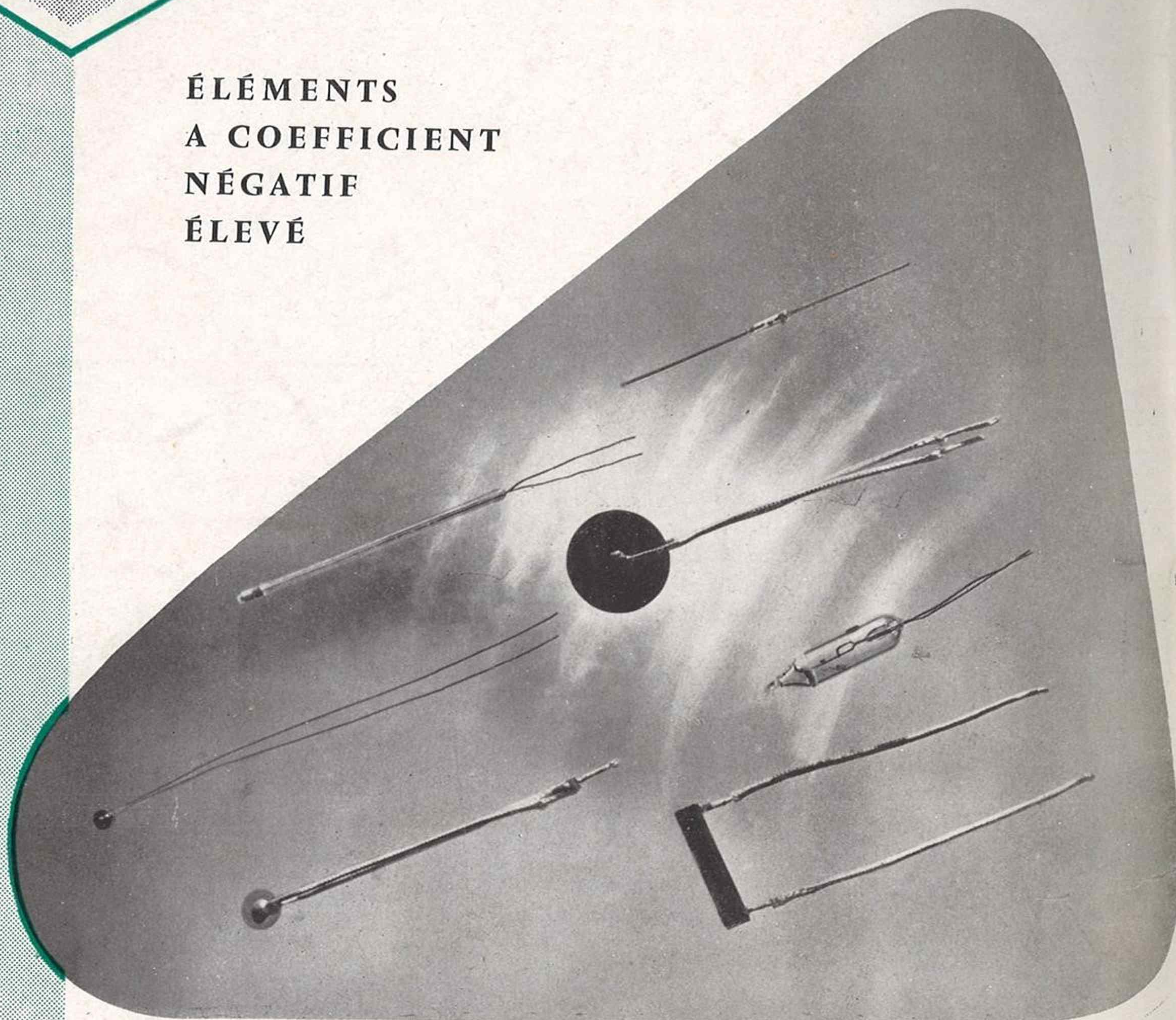




THERMISTANCES

ÉLÉMENTS
A COEFFICIENT
NÉGATIF
ÉLEVÉ



ET A GRANDE STABILITÉ

**COMPAGNIE INDUSTRIELLE
DES CÉRAMIQUES ÉLECTRONIQUES**
DÉPARTEMENT "CÉRAMIQUES NOIRES"



Usine et Bureaux : 128, rue de Paris
MONTREUIL (Seine) - Téléph. : AVRon 22-54

STABILITÉ
ROBUSTESSE
REPRODUCTIBILITÉ
COEFFICIENT ÉLEVÉ

LES PROPRIÉTÉS ET LES APPLICATIONS⁽¹⁾ DES THERMISTANCES

PAR

J. BLEUZE

*Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique
Ingénieur à la Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil*

Introduction

Parmi les nombreux matériaux utilisés en électrotechnique, les semi-conducteurs occupent une position particulière. On sait que cette appellation de « semi-conducteurs » tient au fait que leur résistivité, comprise en 10^{-1} et 10^{10} ohms cm à la température ambiante, les place entre les isolants et les conducteurs. En fait, ils s'en distinguent par un grand nombre de propriétés que les récents développements de la physique ont permis d'expliquer.

Les semi-conducteurs donnent lieu à d'importantes applications, parmi lesquelles on peut citer les redresseurs secs, les cellules photoélectriques, les cathodes à oxydes, les diodes et triodes au germanium, etc...

Les Thermistances sont constituées par des matériaux semi-conducteurs dont la conductibilité augmente avec la température. Ce sont donc des résistances thermo-sensibles. Leur apparition sur le marché date d'une trentaine d'années, mais ce n'est que depuis cinq ans environ, que l'amélioration des procédés de fabrication a permis d'obtenir des éléments reproductibles et stables dans le temps.

Il n'entre pas dans le cadre de cette conférence d'exposer le mécanisme de la conductibilité des Thermistances. De nombreux ouvrages ont été publiés sur ce sujet, en particulier, un article paru dans le numéro de décembre 1951 de l'« Ondes Electrique », sous la signature de Messieurs Nguyen THIEN-CHI et Jacques SUCHET, intitulé « Conductibilité des semi-conducteurs électroniques et thermistances ».

Dans la première partie de cette communication seront étudiées les propriétés des Thermistances.

La deuxième partie sera consacrée à l'étude des circuits électriques contenant des Thermistances.

La troisième partie sera consacrée aux applications des Thermistances.

I. — LES PROPRIÉTÉS DES THERMISTANCES

Présentation : les Thermistances sont présentées sous quatre formes fondamentales :

a) *Les Thermistances « plaques »*, en forme de disques circulaires, d'anneaux, de plaques ou de barrettes rectangulaires dont les dimensions transversales vont de quelques millimètres à une dizaine de centimètres et dont l'épaisseur est comprise entre une fraction de millimètre et un centimètre ;

b) *Les Thermistances cylindriques*, en forme de bâtonnets ou de tubes dont le diamètre est compris entre un millimètre et quelques centimètres et dont la longueur peut atteindre une dizaine de centimètres.

Pour ces deux modèles ; les connexions sont assurées le plus souvent en métallisant des portions de surface, et, le cas échéant, en soudant des fils de connexion sur les couches métalliques.

c) *Les Thermistances « perles »* : ce sont des sphères de diamètre inférieur à 1 mm, montées sur deux fils de platine. Ces divers types sont le plus souvent disposés à l'intérieur de tubes de verre.

d) *Les Thermistances « à couches »* : obtenues en déposant des couches minces de matériau semi-conducteur à la surface de lames de quartz.

Les matériaux semi-conducteurs entrant dans les Thermistances :

On sait qu'un certain nombre d'éléments tels que le bore, le silicium, le germanium, etc... présentent des propriétés de semi-conduction. Ils ne sont cependant pas utilisés dans la fabrication des Thermistances, en raison de leur rareté et de leur prix relativement élevé.

Les matériaux utilisés pour fabriquer les Thermistances sont très généralement des combinaisons d'oxydes métalliques judicieusement choisis, parmi lesquels on peut citer : les oxydes de fer, de nickel, de vanadium, de tungstène, de manganèse, de titane, etc..., ces matières premières étant utilisées à l'état pulvérulent. Il s'ensuit que la fabrication des Thermistances présente de grandes analogies avec celle des produits céramiques.

La fabrication des Thermistances : La fabrication des Thermistances comprend plusieurs stades :

(1) Conférence faite à la Société des Radioélectriciens le 21 février 1953.

1° *Préparation des matières premières* : les oxydes métalliques utilisés doivent répondre à certaines conditions de pureté et de granulométrie. Ils sont dosés en proportions convenables ;

2° *Mise en forme* : les poudres obtenues au premier stade sont agglomérées en forme de plaques, de cylindres, de perles.

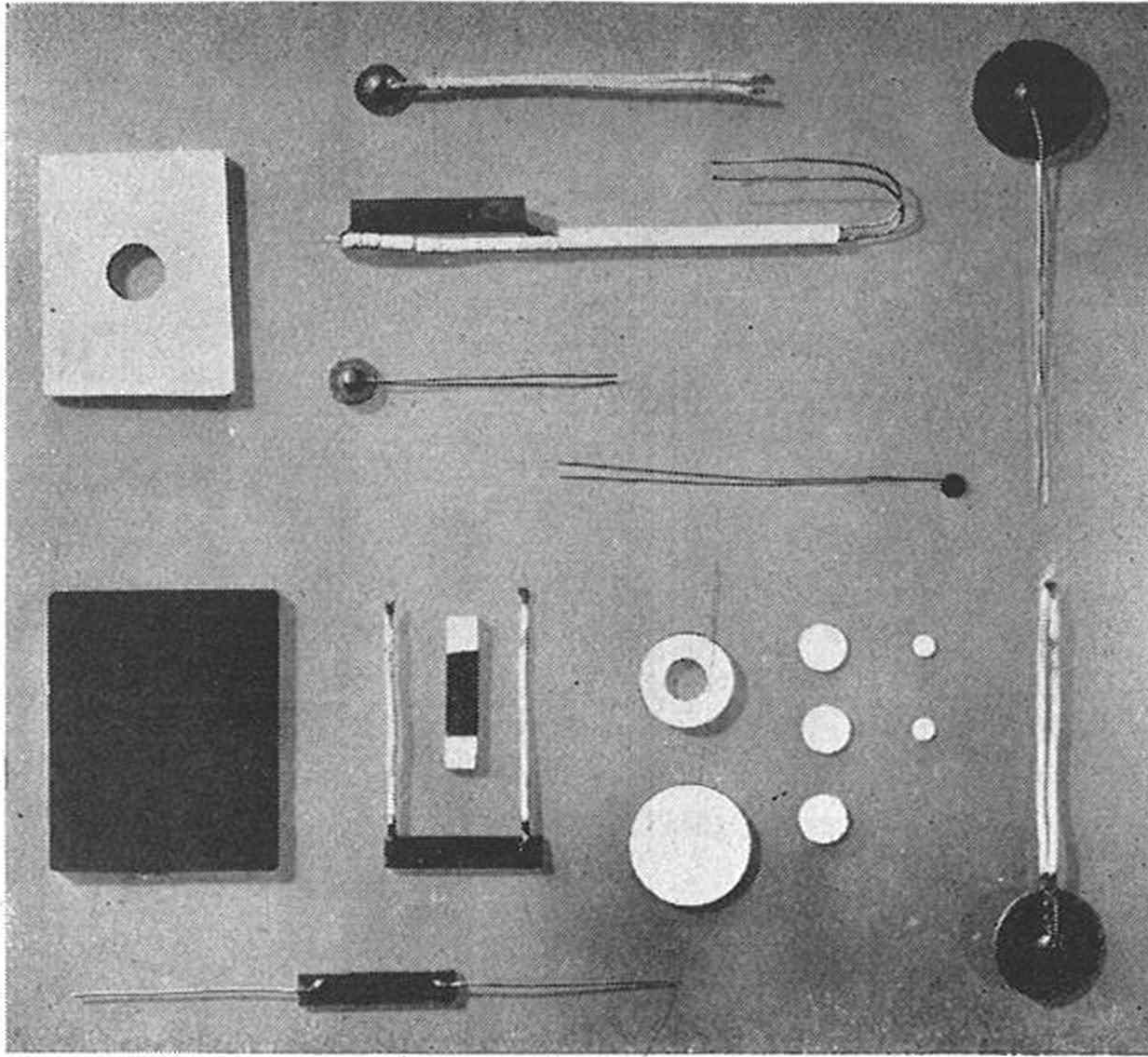


FIG. 1. — Principaux types de thermistances « plaques ».

Des liants spéciaux sont utilisés à cet effet ;

3° *Frittage* : Au cours de cette opération, effectuée à haute température, des réactions physico-chimiques s'effectuent entre les divers oxydes, qui aboutissent à l'obtention d'un solide compact, dur

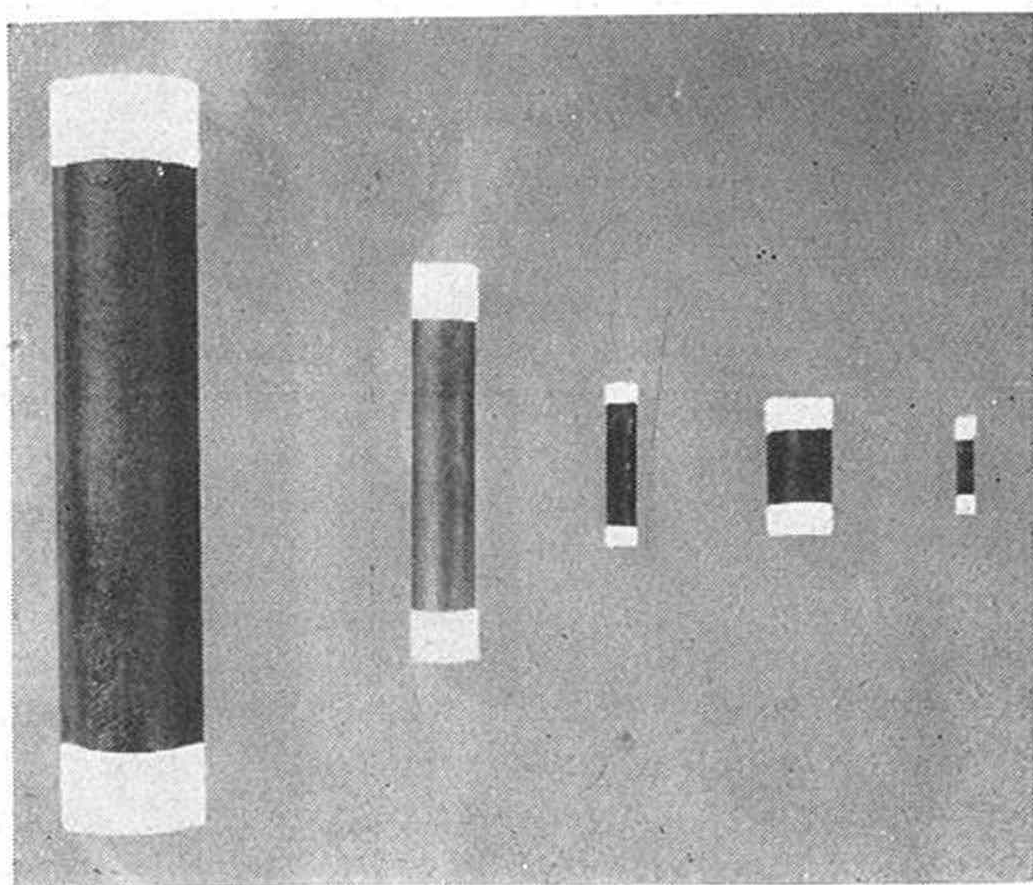


FIG. 2. — Principaux types de thermistances cylindriques.

et possédant les propriétés de semi-conduction recherchées. Il est à noter que la nature de l'atmosphère de cuisson a une grande importance ;

4° *Habillage* : les solides ainsi obtenus sont métallisés partiellement et subissent des traitements de finition ;

5° *Mesures et essais divers* : ces opérations ont pour objet de vérifier que les caractéristiques dimensionnelles, mécaniques, électriques, et thermiques des Thermistances sont conformes aux prescriptions.

La caractéristique « Résistance-Température » des Thermistances :

Le relevé expérimental des courbes « Résistance-Température » des Thermistances montre que la

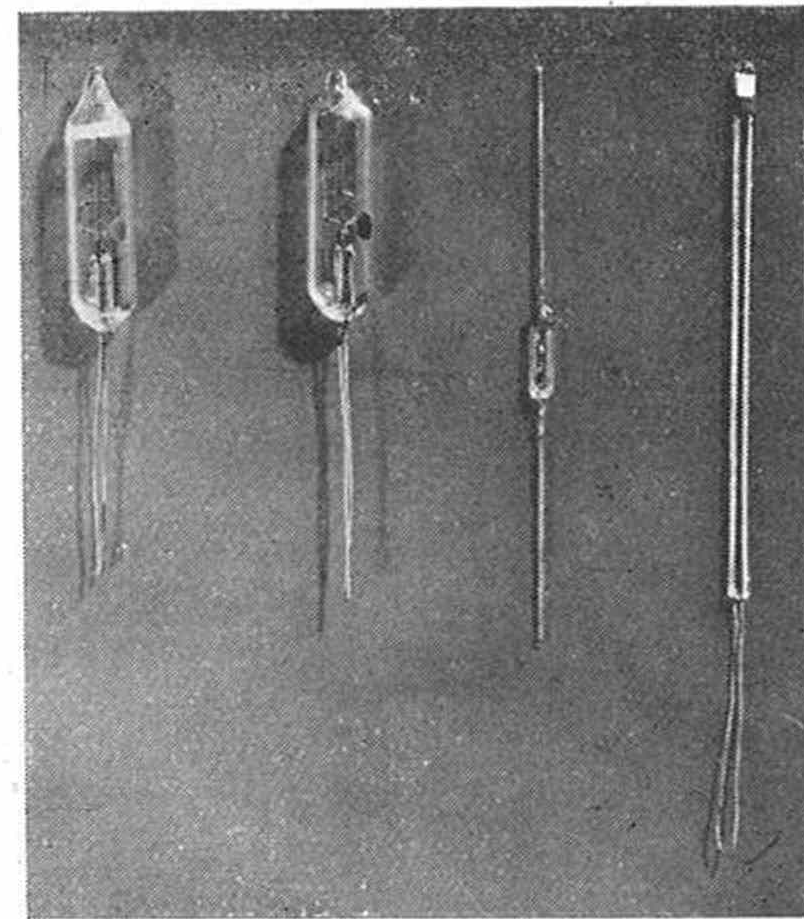


FIG. 3. — Principaux types de thermistances « perles ».

caractéristique de ces matériels est très sensiblement donnée par la formule :

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

où $R(T)$ est la résistance à la température absolue T ,

a , une constante caractéristique de la forme et des dimensions des Thermistances ;

b , une constante caractéristique du matériau utilisé, et e , la base des logarithmes népériens ($e = 2,718$). C'est une fonction décroissante de la température.

Le coefficient a a les dimensions d'une résistance et le coefficient b , celles d'une température.

Une transformation simple permet d'écrire :

$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1')$$

où $R(T_0)$ est la valeur de la résistance à la température T_0

Le coefficient de température est :

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2} \quad (2)$$

C'est une fonction décroissante de la température.

L'allure de la courbe « Résistance-Température » des Thermistances est représentée sur la figure 4.

L'ordre de grandeur de ces caractéristiques est précisé dans les tableaux suivants. Fig. 5a, 5b, 6a, 6b,

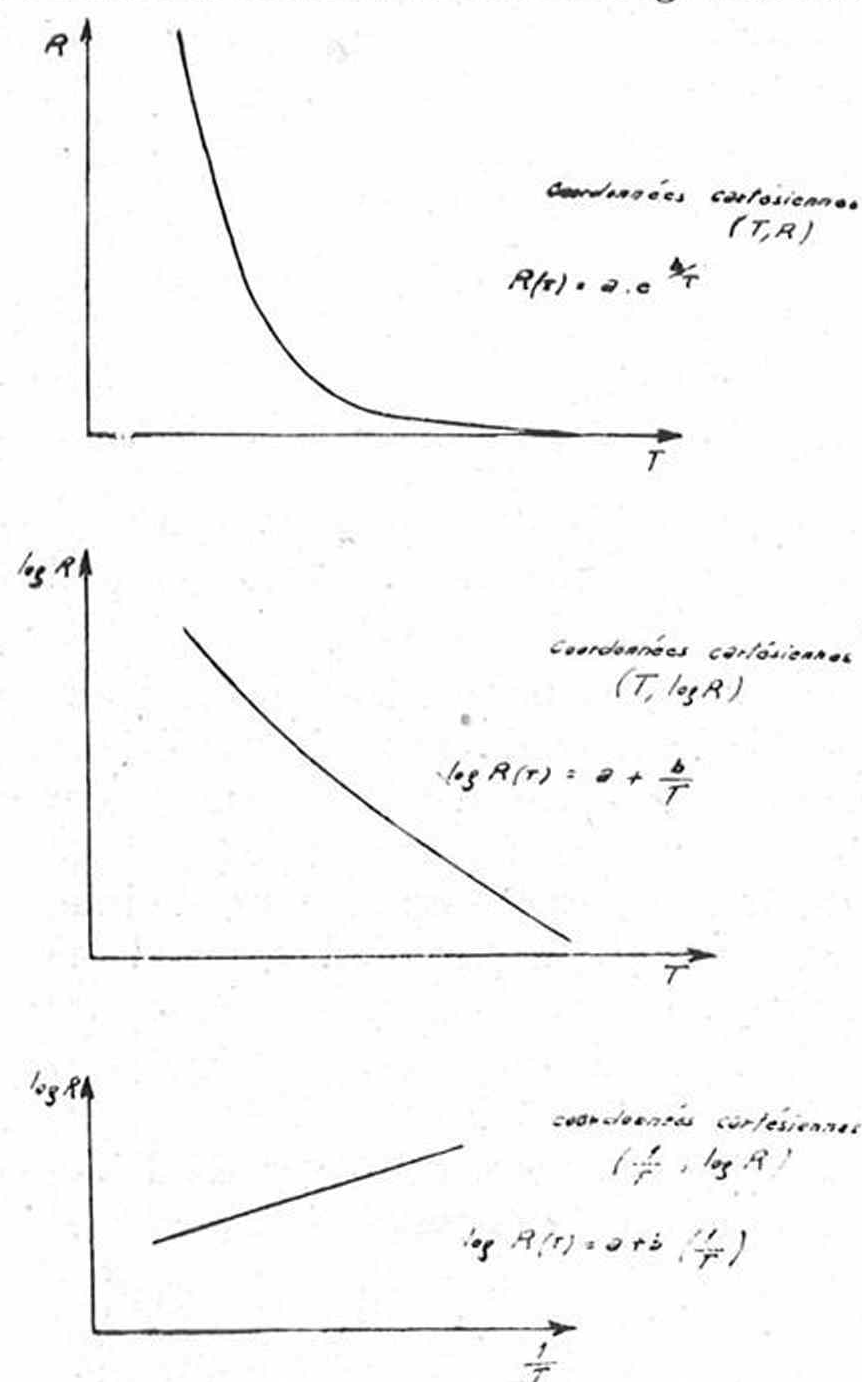


Fig. 4. — Variations de la résistance d'une thermistance en fonction de la température.

qui s'appliquent aux six matériaux exploités par la Compagnie Générale de Télégraphie sans fil. Ces six matériaux appartiennent à deux classes :

a) La classe « normale » : matériaux 1-2-3 pouvant être utilisés jusqu'à 150°C ou 250°C, suivant le type de présentation. Les tableaux 5a et 5b précisent les caractéristiques générales et les variations de la résistance, en fonction de la température, de trois Thermistances constituées par les matériaux 1, 2, et 3, et ayant toutes trois une résistance de 1 000 ohms à 25°C.

b) La classe « réfractaire » ; matériaux 4, 5, et 6, pouvant être utilisés respectivement jusqu'à 450, 850 et 1 150°C. Les tableaux 6a et 6b précisent les caractéristiques générales et les variations de la résistance des Thermistances correspondantes.

Remarque : Du fait de leur structure particulière, les matériaux semi-conducteurs à base d'oxydes métalliques présentent un pouvoir inducteur spécifique apparent considérable. Par ailleurs, la résistivité et le pouvoir inducteur spécifique apparent sont maximum pour les très basses fréquences, décroissent rapidement jusqu'à quelques dizaines de kilocycles et sont pratiquement constants pour les fréquences supérieures à 100. kc/s Le rapport entre la résistivité en courant continu et la résistivité en haute fréquence est de l'ordre de 2, le rapport correspondant des pouvoirs inducteurs spécifiques apparents peut atteindre plusieurs dizaines.

Les paramètres thermiques des thermistances : Le calcul des conditions d'équilibre et du régime transitoire thermique d'une thermistance requiert la connaissance de deux paramètres :

Type du matériau	b	Coefficient de température à 25 °c	Résistivité à 25 °c
1	4500	- 0,050 /°c	50.000 Ω.cm.
2	4000	- 0,045 /°c	3.000 Ω.cm.
3	3200	- 0,036 /°c	100 Ω.cm

Fig. 5a. — Caractéristiques générales des matériaux utilisés dans la fabrication des thermistances C.I.C.E. de la classe « normale ».

Type du Matériau	Temperature (°C)										
	-50 °c	-25 °c	0	10	25	40	60	100	150	200	250
1	160.000	20.100	3980	2220	1000	485	205	48	11,6	3,74	1,36
2	91.100	14.400	3410	2.030	1000	525	244	67	18,9	7,04	3.10
3	36800	8670	2670	1.760	1000	600	325	115	41,7	18,8	9,90

Fig. 5b. — Variations relatives de la résistance des thermistances C.I.C.E. de la classe « normale » en fonction de la température.

a) *La capacité calorifique* : elle dépend des dimensions de la thermistance et de la disposition des connexions qui participent à l'échauffement. Elle est comprise, suivant les types, entre *quelques millijoules par degré* et *quelques centaines de joules par degré*. Dans ce qui suit, nous la désignerons par la lettre C.

b) *La constante de dissipation thermique* : (constante lorsque la température est inférieure à 300°C et pour un régime de convection déterminé). On la définit habituellement pour une thermistance placée dans l'air calme. Elle dépend des dimensions de la thermistance et, également des connexions qui peuvent servir de radiateurs. Elle est comprise entre *quelques dizaines de microwatts par degré* et *une fraction de watt par degré*. On peut l'augmenter considérablement en munissant la thermistance de radiateurs ou en la disposant dans un liquide (huile). Dans ce qui suit, nous la désignerons par lettre K.

Un troisième paramètre, qui se déduit des deux premiers, est intéressant à connaître, c'est la *constante de temps de l'élément*. Supposons que la thermistance, étant à la température T_0 , soit placée brusquement dans un milieu à la température T_1 . Le régime transitoire s'obtient en résolvant l'équation différentielle

$$C dT + K (T - T_1) dt = 0 \quad (3)$$

où t est le temps. On obtient :

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) e^{-\frac{Kt}{C}} \quad (4)$$

Le rapport C/K définit la constante de temps de

l'élément, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la variation de température de la thermistance soit égale à 63 % $\left(\frac{e-1}{e}\right)$ de la différence $(T_0 - T_1)$.

La constante de temps est comprise entre *quelques secondes* et *plusieurs dizaines de minutes*, suivant les types.

En résumé, nous voyons qu'une thermistance est définie par quatre paramètres :

— Les paramètres électriques a et b , intervenant dans la relation :

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

— Les paramètres thermiques : capacité calorifique C et constante de dissipation K (dans l'air calme).

En pratique, les paramètres électriques sont définis par l'indication du type du matériau et la valeur de la résistance de la thermistance à 25°C (298°K).

Les paramètres thermiques sont définis, en première approximation, par l'indication du type de la thermistance.

Les conditions d'utilisation des thermistances :

Une thermistance peut échanger de l'énergie avec l'extérieur de plusieurs manières :

- a) Absorber de l'énergie par effet Joule ;
- b) Absorber de l'énergie thermique par conduction, convection, ou rayonnement ;
- c) Fournir de l'énergie thermique par conduction, convection, ou rayonnement.

Type du Matériau	b	Limite supérieure de température utilisable.	Température moyenne θ d'utilisation	coefficient de Température à la Température θ
4	6.100	450 °C	350 °C	- 0,016 / °C
5	8.300	850 °C	550 °C	- 0,012 / °C
6	12.500	1.150 °C	1000 °C	- 0,007 / °C

FIG. 6a. — Caractéristiques générales des matériaux utilisés dans la fabrication des Thermistances C.I.C.E. de la classe « réfractaire ».

Température (°C) / Type du Matériau	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900	1000	1150
1	15000	5000	2.200	1000	500	250										
2					8000	3.600	2000	1050	600	350	210	140	95	70		
3											10000	5700	3.200	1300	650	260

FIG. 6b. — Variations relatives de la résistance des thermistances C.I.C.E. de la classe « réfractaire » en fonction de la température.

Toutes les combinaisons d'échange sont possibles. Trois d'entre elles sont particulièrement intéressantes, car elles donnent lieu à des applications importantes :

1° La thermistance n'échange d'énergie avec le milieu ambiant que par conduction et convection ;

2° La thermistance absorbe de l'énergie par rayonnement et la restitue au milieu ambiant par conduction et convection ;

3° La thermistance reçoit de l'énergie par effet Joule et la restitue au milieu ambiant par conduction et convection.

Ces trois cas sont examinés ci-après :

A) *La thermistance n'échange de l'énergie avec l'extérieur que par conduction ou convection* : c'est en particulier le cas de la thermométrie par « immersion ». A l'équilibre, la température de la thermistance est égale à celle du milieu ambiant. En régime transitoire, les variations de la température T de la thermistance sont définies par l'équation différentielle :

$$c dT + K [T - \theta(t)] dt = 0 \quad (5)$$

où $\theta(t)$ est la loi de variation de la température ambiante en fonction du temps.

Si l'on désire que la température T de la thermistance soit, à tout moment, égale à celle $\theta(t)$ du milieu ambiant, il faudra utiliser une thermistance à faible constante de temps (rapport $\frac{C}{K}$ aussi petit que possible).

Si l'on désire, au contraire, que la thermistance donne la valeur moyenne de la température $\theta(t)$, il faudra utiliser une thermistance ayant une constante de temps plus élevée.

Si la température extérieure est constante, l'équation (5) devient identique à l'équation (3) dont nous avons précédemment donné la solution.

B) *La thermistance absorbe de l'énergie par rayonnement et la restitue au milieu ambiant par conduction et convection*. C'est en particulier le cas de la pyrométrie optique.

Si la température du milieu ambiant est T_0 et si la thermistance absorbe l'énergie W , sa température T est donnée par l'équation différentielle :

$$C dT + K (T - T_0) dt = W dt \quad (6)$$

$(T, T_0, < 300^\circ C)$

Si l'énergie W est constante, la solution est :

$$T = T_0 + \frac{W}{K} (1 - e^{-\frac{K}{C} t}) \quad (7)$$

La constante de temps de la thermistance a la même influence que précédemment.

C) *La thermistance absorbe de l'énergie par effet*

Joule et la restitue au milieu ambiant par conduction ou convection.

Soit $u(t)$, la tension appliquée aux bornes de la thermistance, et T_0 la température ambiante. La température T de la thermistance s'obtient en résolvant l'équation différentielle :

$$C dT + K (T - T_0) dt = \frac{[u(t)]^2}{R(T)} dt \quad (8)$$

$(T, T_0, < 300^\circ C)$

L'intégration de cette équation ne peut se faire que par des méthodes graphiques et, seul sera étudié le régime d'équilibre ($dT = 0$) correspondant à l'application d'une tension constante u .

Dans ces conditions, la tension u et l'intensité i sont fournies par le système d'équations paramétriques (9).

$$\begin{cases} i = \sqrt{\frac{K(T - T_0)}{R(T)}} \\ u = \sqrt{K(T - T_0) \cdot R(T)} \end{cases} \quad (9)$$

L'étude mathématique de cette fonction conduit au tableau de variations de la figure 7a.

La courbe correspondante est représentée sur la figure 7b.

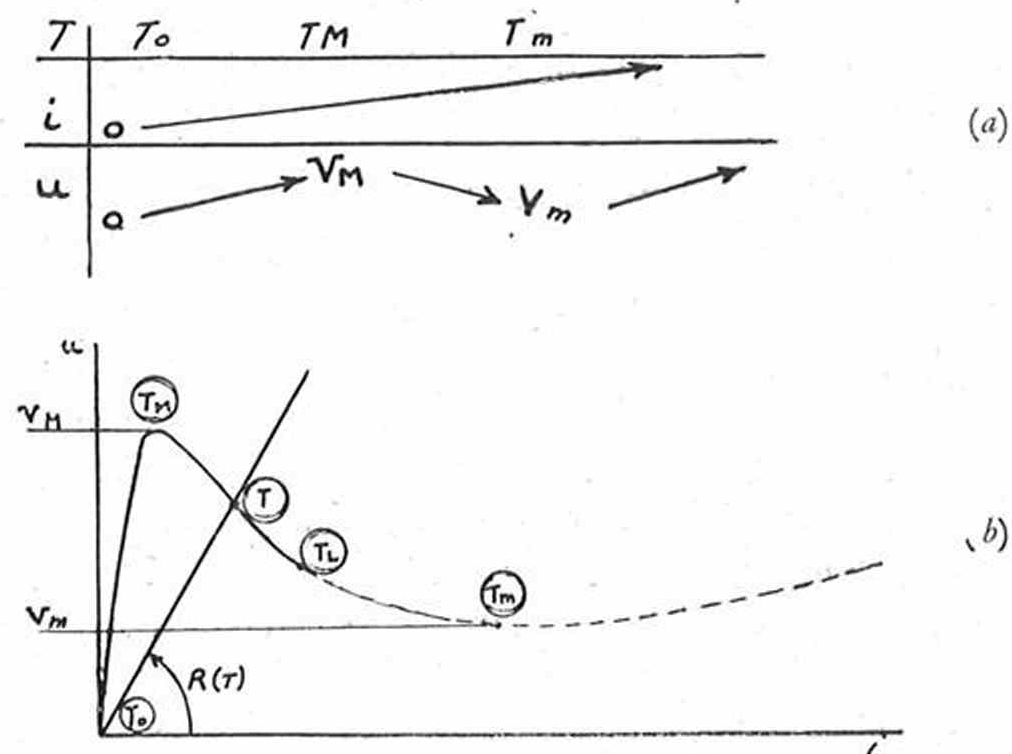


FIG. 7a — 7b. — Caractéristique d'équilibre intensité-tension des thermistances.

La température T intervient comme paramètre. La pente de la droite OM représente la valeur de la résistance $R(T)$ correspondant au point de fonctionnement M .

Seule une partie de cette courbe présente de l'intérêt pratique, c'est celle pour laquelle la température est inférieure à la température limite T_L que peut supporter la thermistance sans détérioration. La température T_L est nettement inférieure à T_m .

Sur cette courbe, on peut distinguer 2 zones :

a) La zone de faible échauffement ($T_0 < T < T_M$). Elle comporte une partie sensiblement rectiligne et est limitée à sa partie supérieure par le maximum ;

b) La zone de grand échauffement ($T_M < T < T_L$). La fonction $u(i)$ est décroissante. Donc la thermistance présente une résistance différentielle négative. Nous verrons ultérieurement que cette propriété entraîne des applications très importantes.

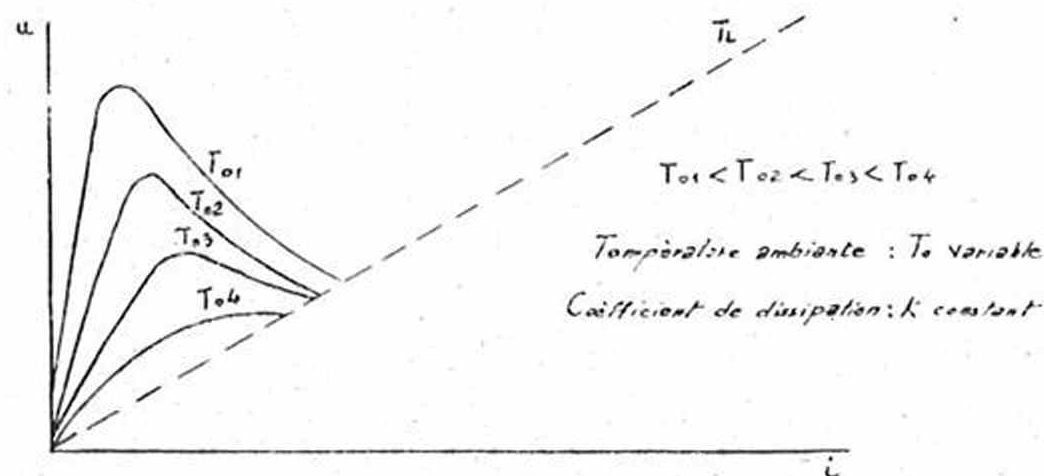


FIG. 8a. — Réseau des caractéristiques d'équilibre intensité-tension d'une thermistance soumise à une condition de dissipation déterminée dans un milieu à température variable.

Par ailleurs, cette fonction $u(i)$ dépend de deux paramètres : la température ambiante T_0 et le coefficient de dissipation thermique K . Deux faisceaux

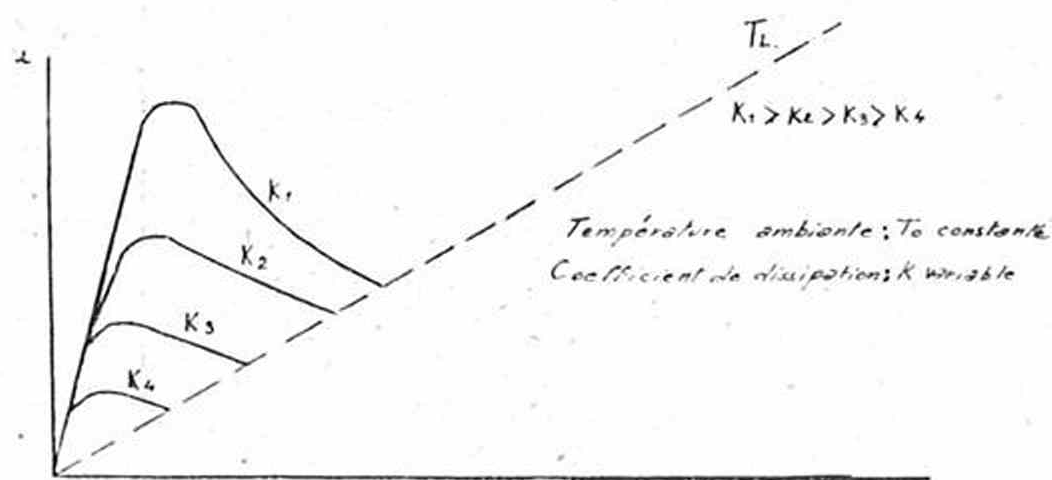


FIG. 8b. — Réseau des caractéristiques d'équilibre intensité-tension d'une thermistance soumise à des conditions de dissipation variables dans un milieu à température constante.

de courbes peuvent donc être tracés : Fig. 8 a et 8 b.

Remarque : La caractéristique tension-intensité est souvent tracée en coordonnées logarithmiques, afin de permettre de relever plus facilement les valeurs pour les faibles intensités (Fig. 9).

Dans ce réseau de coordonnées, les droites parallèles à la première bissectrice correspondent aux ré-

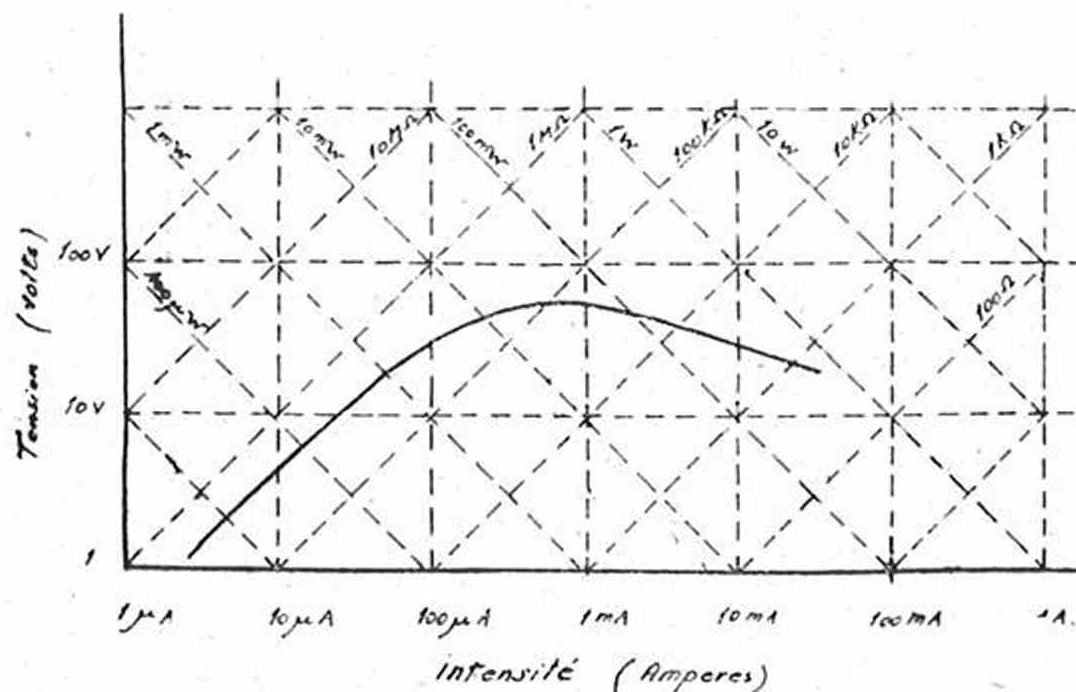


FIG. 9. — Caractéristique d'équilibre intensité-tension d'une thermistance (courbe tracée en coordonnées logarithmiques).

sistances constantes, et les droites parallèles à la deuxième bissectrice correspondent aux puissances constantes.

Remarque : En courant alternatif, il ne peut être défini de courbe statique tension efficace — courant efficace que si la période du courant est faible vis-à-vis de la constante de temps de la thermistance.

II. — ETUDE DES CIRCUITS ELECTRIQUE CONTENANT DES THERMISTANCES.

Introduction : La dernière partie de l'étude a montré que le comportement d'une thermistance est essentiellement différent suivant que la puissance électrique qu'elle absorbe est nulle ou, au contraire, est notable. Dans le premier cas, la thermistance obéit à la loi d'Ohm (à température constante) ; dans le deuxième cas, elle n'obéit plus à la loi d'Ohm.

Dans les deux cas, le calcul des circuits électriques contenant des thermistances sera essentiellement différent.

1^{er} Cas : La puissance électrique absorbée par la thermistance est nulle :

Le dipôle résistance-thermistance en série : Le schéma du dipôle est indiqué sur la figure 10a.

1^o La résistance $Z(T)$ du dipôle est :

$$Z(T) = \rho + R(T) \quad (10)$$

Les variations de $Z(T)$ en fonction de la température sont données par la courbe (Fig 10a).

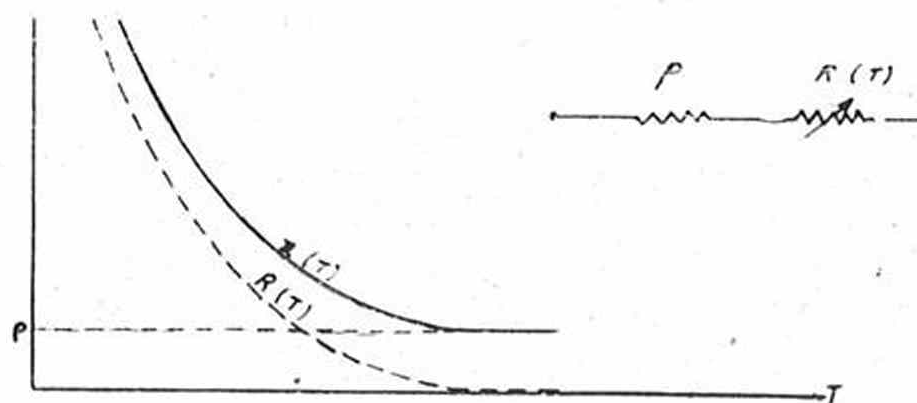


FIG. 10a. — Caractéristiques résistance-température du dipôle « résistance-thermistance en série ».

Aux basses températures, $Z(T)$ est sensiblement égal à $R(T)$. Aux températures élevées, au contraire, $Z(T)$ est sensiblement constant et égal à ρ ;

2^o Si on applique une tension U constante aux bornes du dipôle, les tensions u_p et u_R aux bornes de la résistance fixe ρ et de la thermistance $R(T)$ dépendent de la température ambiante comme l'indique la courbe 10b.

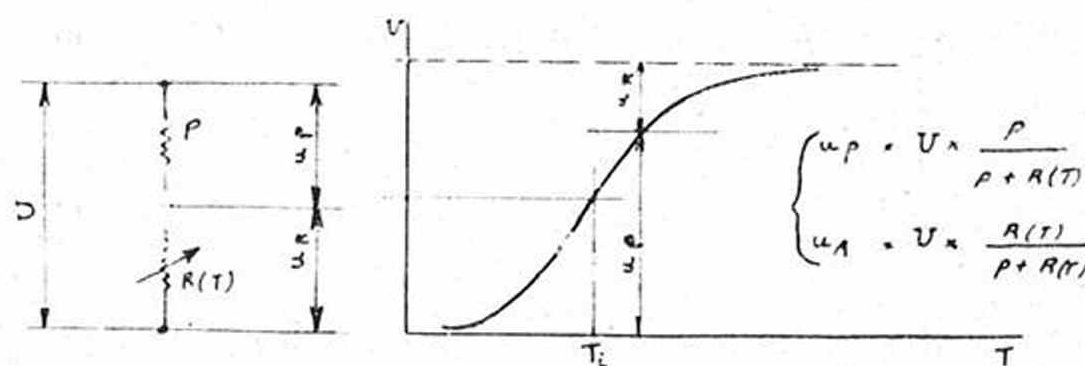


FIG. 10b. — Influence de la température sur la répartition des tensions aux bornes de la résistance et de la thermistance du diôle « résistance-thermistance en série ».

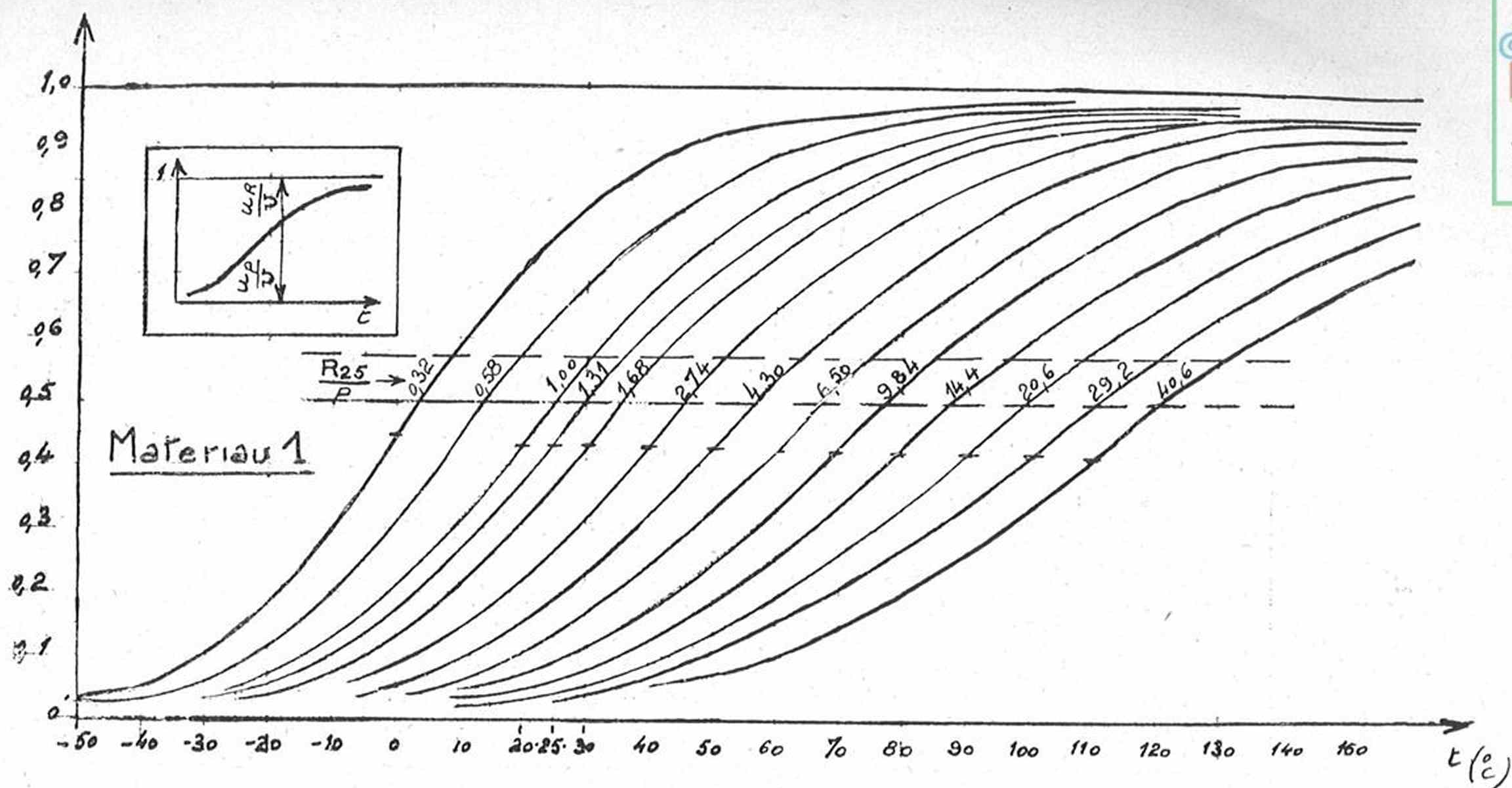


FIG. 11. — Abaque servant au calcul d'un diviseur de tension à thermistance (matériau 1).

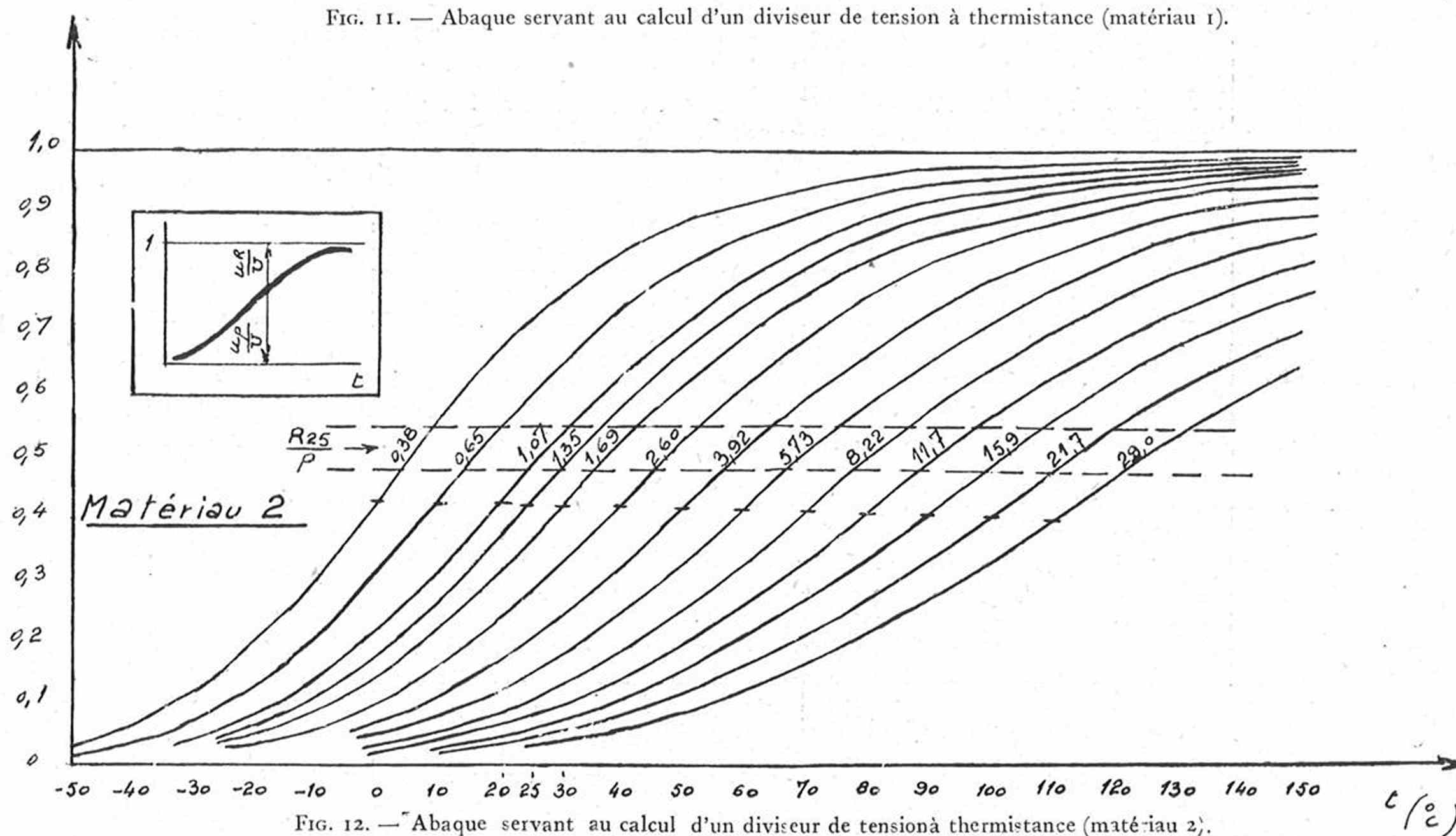


FIG. 12. — Abaque servant au calcul d'un diviseur de tension à thermistance (matériau 2).

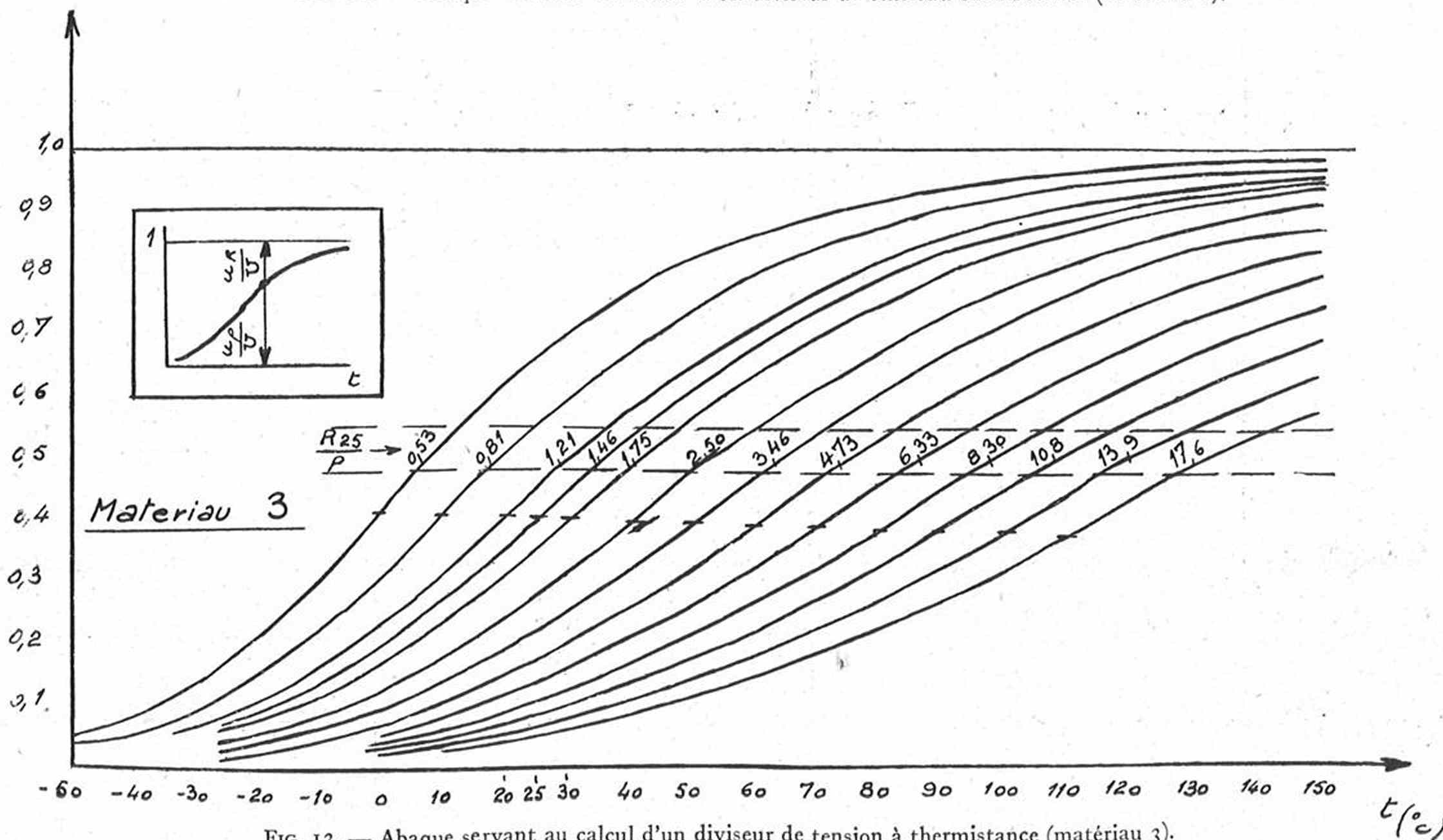


FIG. 13. — Abaque servant au calcul d'un diviseur de tension à thermistance (matériau 3).

Cette courbe présente un point d'inflexion pour la température T_i , solution de l'équation.

$$R(T_i) = a e^{bT_i} = \rho \frac{b + 2T_i}{b - 2T_i} \quad (11)$$

A la température T_i , les tensions u_p et u_R et la pente de la courbe sont données par les formules :

$$(u_p)_{T_i} = U - (u_R)_{T_i} = U \left(\frac{1}{2} - \frac{T_i}{b} \right) \quad (12)$$

$$\left(\frac{du_p}{dT} \right)_{T_i} = - \left(\frac{du_R}{dT} \right)_{T_i} = U \frac{b^2 - 4T_i^2}{4bT_i^2} \quad (13)$$

du rapport $\frac{a}{\rho}$ et du paramètre b , ou, ce qui revient au même, de la nature du matériau utilisé et du rapport $\frac{R_{25}}{\rho}$, R_{25} étant la résistance de la thermistance à 25°C (soit 298°K).

Sur les figures 11, 12 et 13, sont dessinés les faisceaux de courbes donnant les variations de $\frac{u_p}{U}$ et de $\frac{u_R}{U}$ pour les différentes valeurs du rapport $\frac{R_{25}}{\rho}$ et pour les matériaux n° 1, n° 2, n° 3, exploités par la C.I.C.E.

Par ailleurs, le tableau représenté sur la figure 14

Température T_i d'inflexion (°C)		0	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Matériau 1	$\frac{R_{25}}{\rho}$	0,32	0,58	1,00	1,31	1,68	2,74	4,30	6,56	9,84	14,4	20,6	29,2	40,6
	$\frac{(u_p)_{T_i}}{U}$	0,439	0,437	0,435	0,434	0,433	0,430	0,428	0,426	0,424	0,422	0,419	0,417	0,415
	$\frac{(u_R)_{T_i}}{U}$	0,567	0,563	0,565	0,566	0,567	0,570	0,572	0,574	0,576	0,578	0,581	0,583	0,585
	$\frac{1}{U} \left(\frac{du_p}{dT} \right)_{T_i} (^{\circ}\text{C})$	0,0149	0,0138	0,0129	0,0125	0,0121	0,0113	0,0106	0,0099	0,0094	0,0088	0,0083	0,0080	0,0072
Matériau 2	$\frac{R_{25}}{\rho}$	0,38	0,65	1,07	1,35	1,69	2,60	3,92	5,73	8,22	11,7	15,9	21,7	29,0
	$\frac{(u_p)_{T_i}}{U}$	0,432	0,429	0,427	0,426	0,424	0,422	0,419	0,417	0,414	0,412	0,409	0,407	0,404
	$\frac{(u_R)_{T_i}}{U}$	0,568	0,571	0,573	0,574	0,576	0,578	0,581	0,583	0,586	0,588	0,591	0,593	0,596
	$\frac{1}{U} \left(\frac{du_p}{dT} \right)_{T_i} (^{\circ}\text{C})$	0,0132	0,0123	0,0114	0,0111	0,0107	0,0100	0,0094	0,0088	0,0083	0,0078	0,0074	0,0070	0,0064
Matériau 3	$\frac{R_{25}}{\rho}$	0,53	0,81	1,21	1,46	1,75	2,50	3,46	4,73	6,33	8,30	10,8	13,9	17,6
	$\frac{(u_p)_{T_i}}{U}$	0,415	0,412	0,408	0,407	0,405	0,402	0,399	0,395	0,393	0,390	0,387	0,383	0,380
	$\frac{(u_R)_{T_i}}{U}$	0,585	0,588	0,592	0,593	0,595	0,598	0,601	0,604	0,607	0,610	0,613	0,617	0,620
	$\frac{1}{U} \left(\frac{du_p}{dT} \right)_{T_i} (^{\circ}\text{C})$	0,0105	0,0098	0,0091	0,0088	0,0085	0,0080	0,0075	0,0070	0,0065	0,0062	0,0058	0,0055	0,0051

FIG. 14. — Tableaux donnant la valeur numérique des caractéristiques des dipôles « résistance-thermistance en série » à la température d'inflexion.

L'examen de ces trois formules montre que la température T_i , les rapports $\frac{(u_p)_{T_i}}{U}$ et $\frac{(u_R)_{T_i}}{U}$, les rap-

ports $\frac{1}{U} \left(\frac{du_R}{dT} \right)_{T_i}$ et $\frac{1}{U} \left(\frac{du_p}{dT} \right)_{T_i}$ dépendent uniquement

des valeurs de ces différentes grandeurs aux températures d'inflexion pour les matériaux 1, 2 et 3.

3° L'intensité i traversant le dipôle est donnée par la relation :

$$i_T = \frac{U}{R(T) + \rho} = \frac{u_p}{\rho} \quad (14)$$

Elle se déduit de la tension u_p en divisant cette dernière par ρ . Toutes les considérations précédentes sont donc directement applicables.

Le dipôle résistance — thermistance en parallèle :

Le schéma du dipôle est représenté sur la figure 15a.

La résistance $Z(T)$ du dipôle est :

$$Z(T) = \frac{\rho \cdot R(T)}{\rho + R(T)} \quad (15)$$

Les variations de $Z(T)$ en fonction de la température sont données par la courbe de la figure 15b.

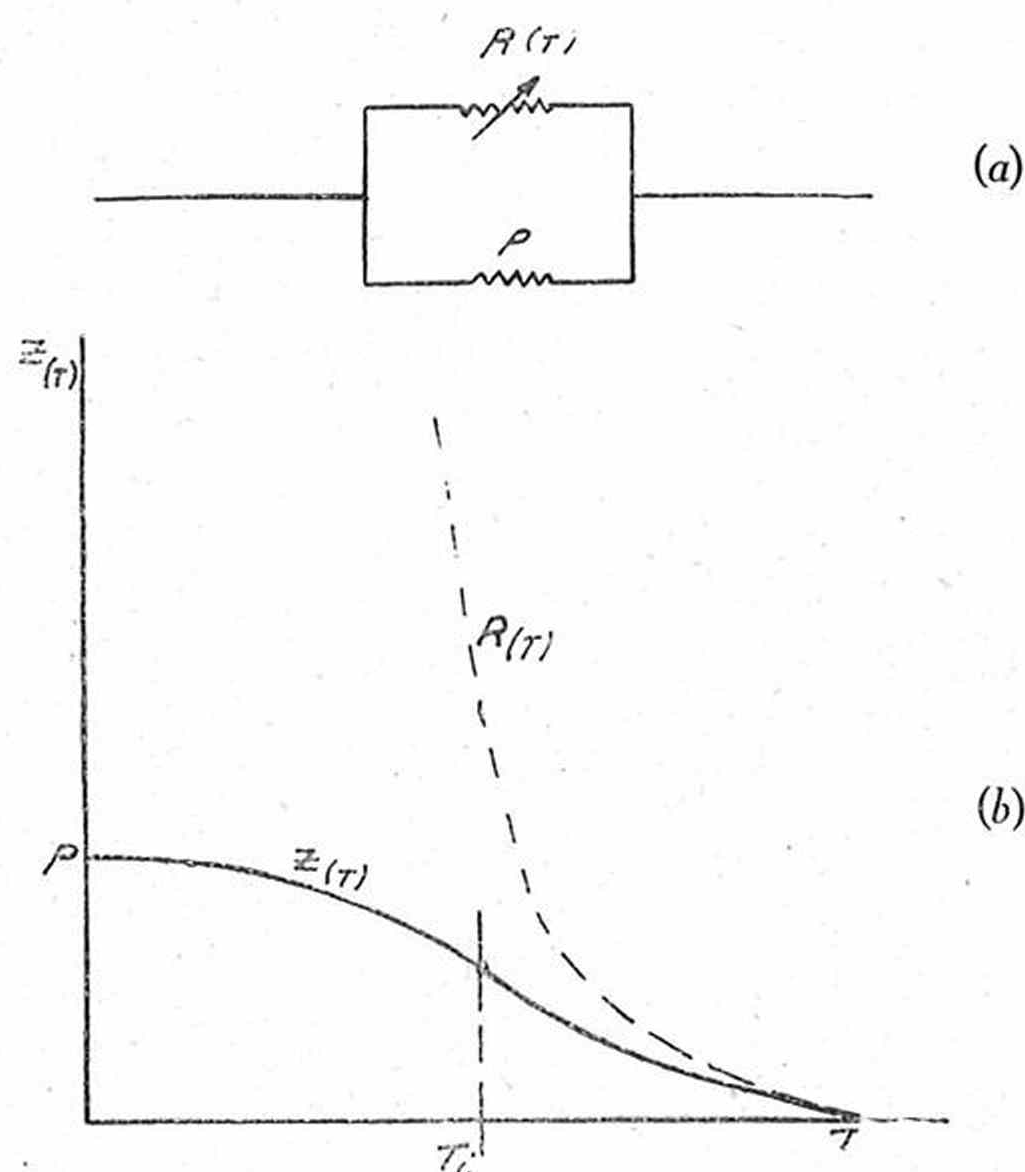


FIG. 15 a - b. — Schéma et caractéristique résistance-température du dipôle résistance thermistance en parallèle.

Aux basses températures, $Z(T)$ est sensiblement constant et égal à ρ ; au contraire, $Z(T)$ est sensiblement égal à $R(T)$ aux températures élevées.

La courbe présente un point d'inflexion pour la température T_i solution de l'équation :

$$R(T_i) = a \cdot e^{b/T_i} = \rho \frac{b + 2T_i}{b - 2T_i} \quad (16)$$

A la température d'inflexion, la résistance $Z(T)$ a pour valeur :

$$Z(T_i) = \rho \left(\frac{1}{2} + \frac{T_i}{b} \right) \quad (17)$$

La pente de la courbe au point d'inflexion est

$$\left(\frac{dZ}{dT} \right)_{T_i} = -\rho \frac{b^2 - 4T_i^2}{4bT_i} \quad (18)$$

Les équations (11) et (16) sont identiques et l'équation (18) se déduit de l'équation (12) en remplaçant u_p et U respectivement par $Z(T)$ et $-\rho$. Les considérations exposées précédemment sont donc applicables. Sur les figures 16, 17, 18, sont dessinés les faisceaux de courbes donnant les variations de $Z(T)$ pour différentes valeurs du rapport $\frac{R_{25}}{\rho}$ et pour les matériaux 1, 2, et 3 utilisés par la C.I.C.E.

Par ailleurs, le tableau représenté sur la figure (19) donne les valeurs de $Z(T)$ aux températures d'inflexion, pour les matériaux 1, 2, et 3.

Autres dipôles comprenant des résistances et des thermistances :

A titre d'exemple, quelques combinaisons de résistances et de thermistances sont représentées sur la figure (20)

Les quadripôles à résistances et thermistances : Les caractéristiques des quadripôles constitués par des résistances et des thermistances sont des fonctions de la température. Une importante étude reste à entreprendre pour classer les principaux types de quadripôles et en dégager leurs propriétés.

Les circuits fermés comportant des thermistances : Les considérations précédentes permettront dans la plupart des cas de calculer le courant traversant un circuit fermé comportant des thermistances, tant à l'équilibre qu'en régime transitoire.

2^e Cas : La puissance électrique absorbée par la thermistance est notable.

La caractéristique d'équilibre statique tension-intensité de la thermistance ne suit pas la loi d'Ohm. Les calculs de circuit se feront le plus souvent par méthode graphique, car les calculs littéraux conduisent à des expressions fort complexes, inexploitable en pratique.

Détermination de l'état d'équilibre d'un circuit électrique contenant une thermistance en série :

Le circuit est représenté par la figure (21)

Si u est la tension aux bornes de la thermistance et i l'intensité qui la traverse, on a :

$$\begin{cases} E = u + \rho i \\ u = u(i) \end{cases} \quad (19)$$

La résolution graphique de ce système s'effectue dans le système de coordonnées cartésiennes (i, u) (fig. 21).

Le point de fonctionnement s'obtient en coupant la caractéristique $u(i)$ de la thermistance par la droite de charge d'équation :

$$i + \frac{u}{\rho} - \frac{E}{\rho} = 0 \quad (19')$$

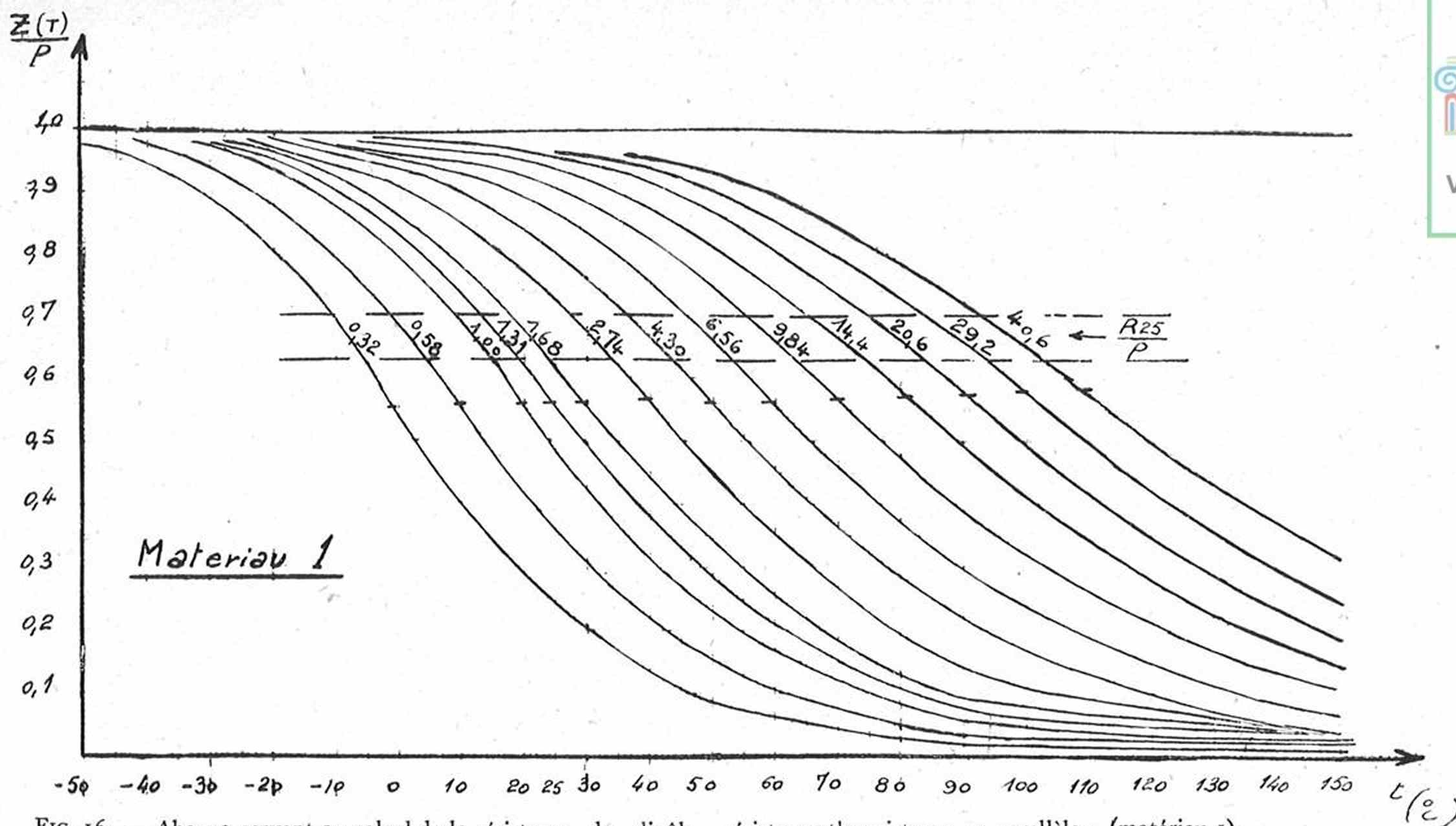


FIG. 16. — Abaque servant au calcul de la résistance du dipôle « résistance-thermistance en parallèle » (matériau 1).

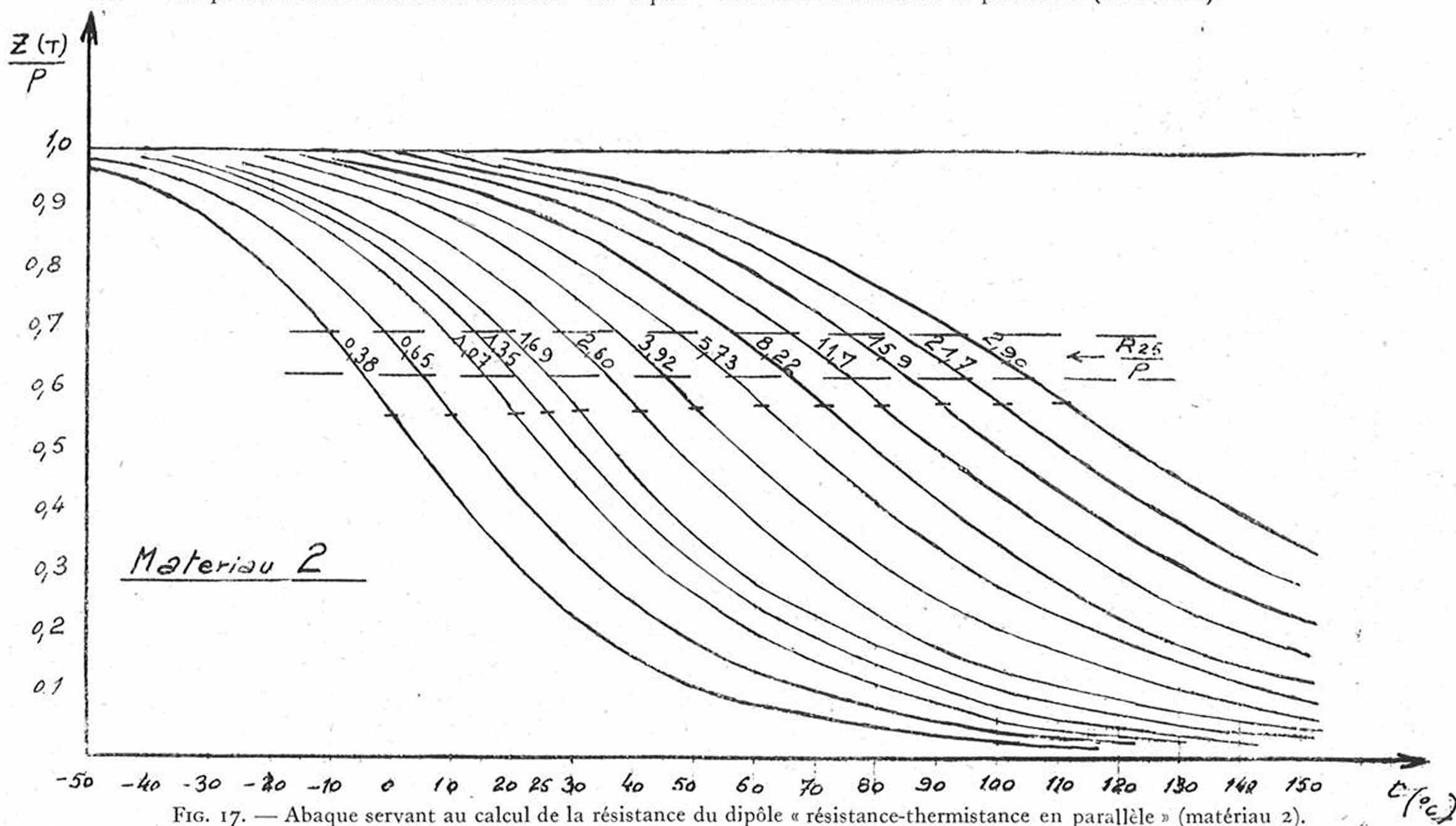


FIG. 17. — Abaque servant au calcul de la résistance du dipôle « résistance-thermistance en parallèle » (matériau 2).

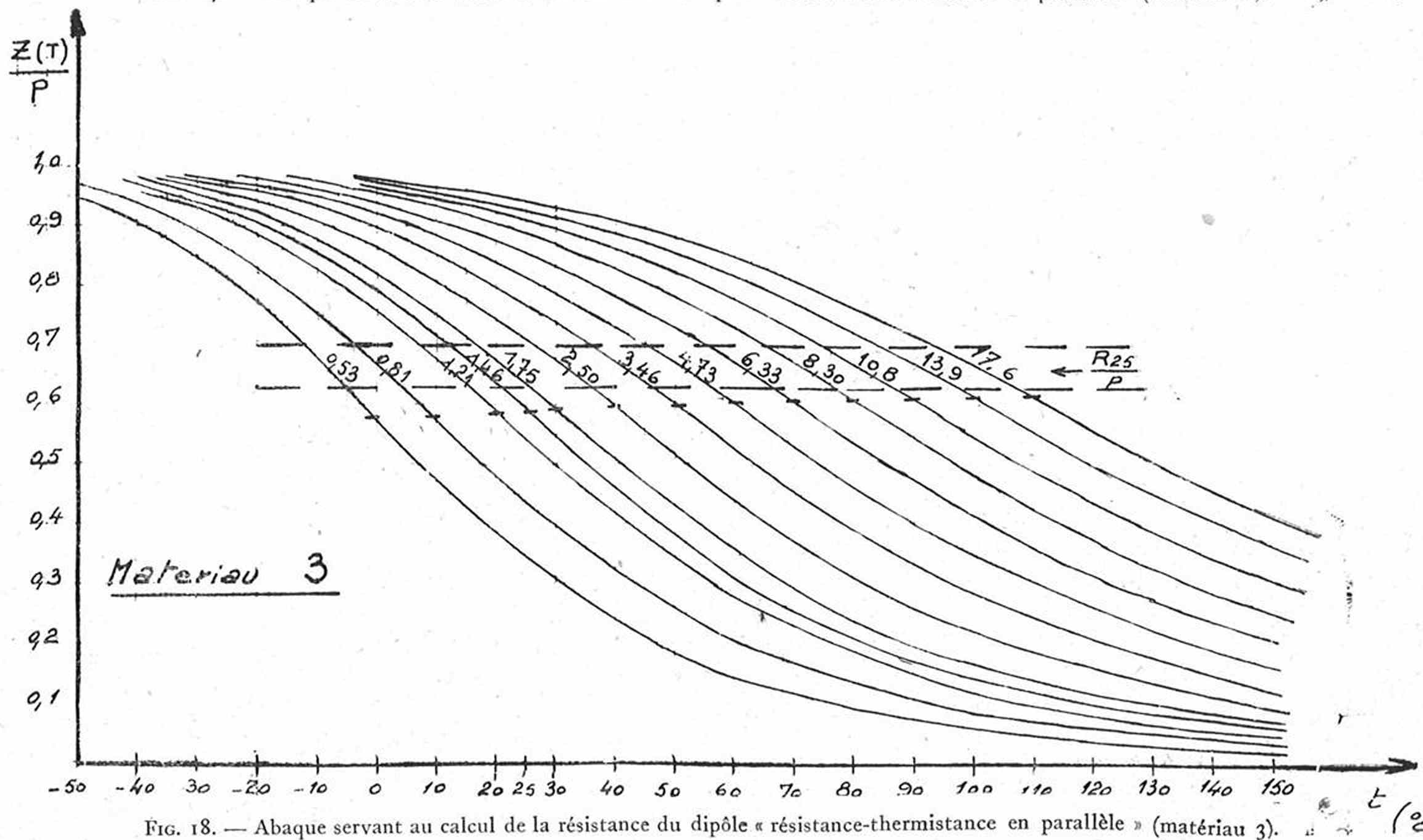


FIG. 18. — Abaque servant au calcul de la résistance du dipôle « résistance-thermistance en parallèle » (matériau 3).

Temperature T_i d'inflexion ($^{\circ}C$)		0	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Matériau 1	$\frac{R_{25}}{P}$	0,32	0,58	1,00	1,31	1,68	2,74	4,30	6,56	9,84	14,4	20,6	29,2	40,6
	$\frac{Z(T_i)}{P}$	0,561	0,563	0,565	0,566	0,567	0,570	0,572	0,574	0,576	0,578	0,581	0,583	0,585
	$-\frac{1}{P(\rho)} \left(\frac{dZ}{dT} \right)_{T_i}$	0,0149	0,0138	0,0129	0,0125	0,0121	0,0113	0,0106	0,0099	0,0094	0,0088	0,0083	0,0080	0,0072
Matériau 2	$\frac{R_{25}}{P}$	0,38	0,65	1,07	1,35	1,69	2,60	3,92	5,73	8,22	11,7	15,9	21,7	29,0
	$\frac{Z(T_i)}{P}$	0,568	0,571	0,573	0,574	0,576	0,578	0,581	0,583	0,586	0,588	0,591	0,593	0,596
	$-\frac{1}{P(\rho)} \left(\frac{dZ}{dT} \right)_{T_i}$	0,0132	0,0123	0,0114	0,0111	0,0107	0,0100	0,0094	0,0088	0,0083	0,0078	0,0074	0,0070	0,0064
Matériau 3	$\frac{R_{25}}{P}$	0,53	0,81	1,21	1,46	1,75	2,50	3,46	4,73	6,33	8,30	10,8	13,9	17,6
	$\frac{Z(T_i)}{P}$	0,585	0,588	0,592	0,593	0,595	0,598	0,601	0,604	0,607	0,610	0,613	0,617	0,620
	$-\frac{1}{P(\rho)} \left(\frac{dZ}{dT} \right)_{T_i}$	0,0105	0,0098	0,0091	0,0088	0,0085	0,0080	0,0075	0,0070	0,0066	0,0062	0,0058	0,0055	0,0051

FIG. 19. — Tableaux donnant la valeur numérique des caractéristiques des dipôles « résistance-thermistance en parallèle » à la température d'inflexion

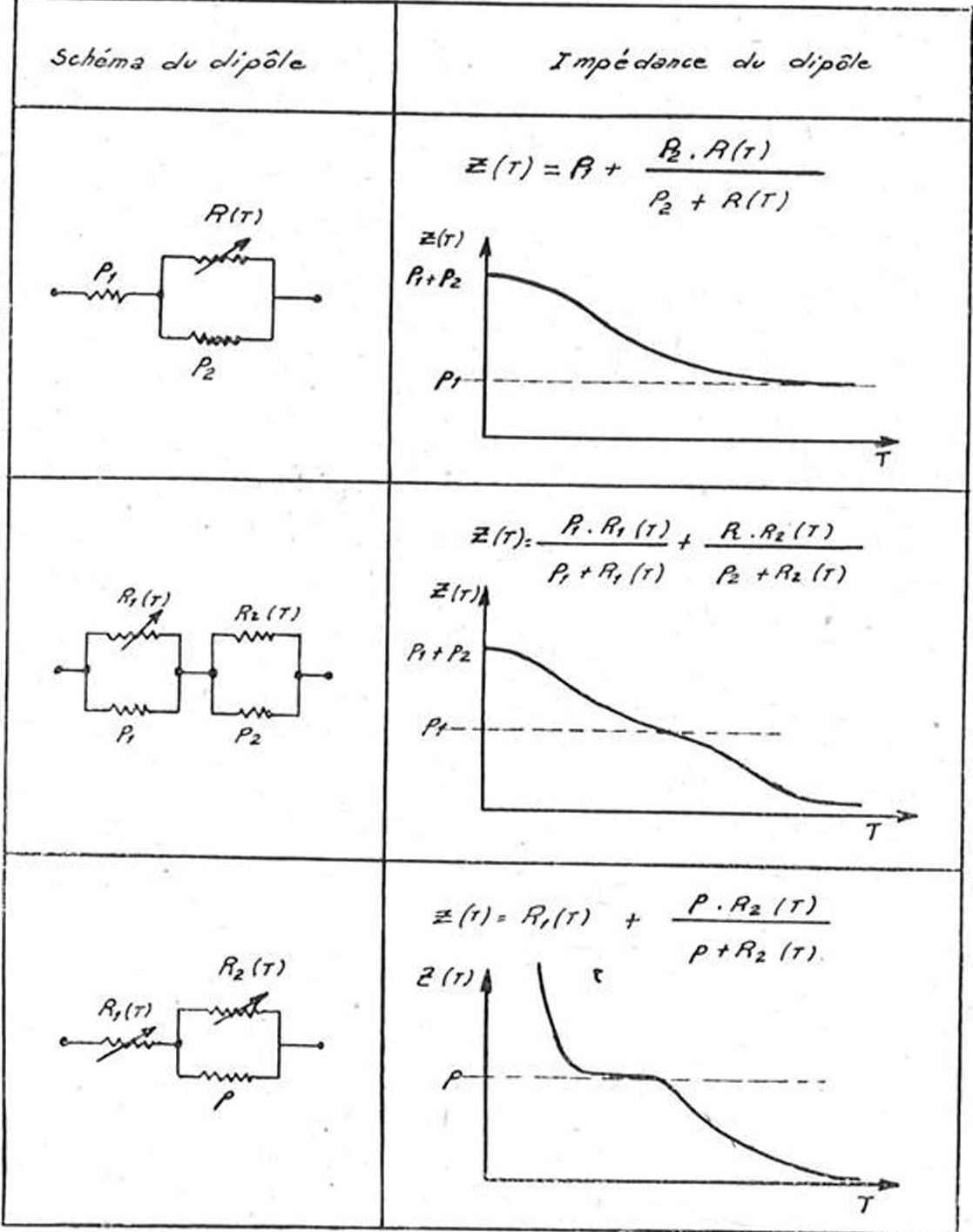


FIG. 20. — Caractéristiques de quelques dipôles comprenant des résistances et des thermistances.

Les coordonnées à l'origine de la droite de charge sont respectivement $\frac{E}{\rho}$ et E , sa pente est $-\rho$.

Etude de la stabilité : La courbe caractéristique et la droite de charge peuvent occuper des positions respectives diverses suivant la valeur des différents paramètres (fig. 22).

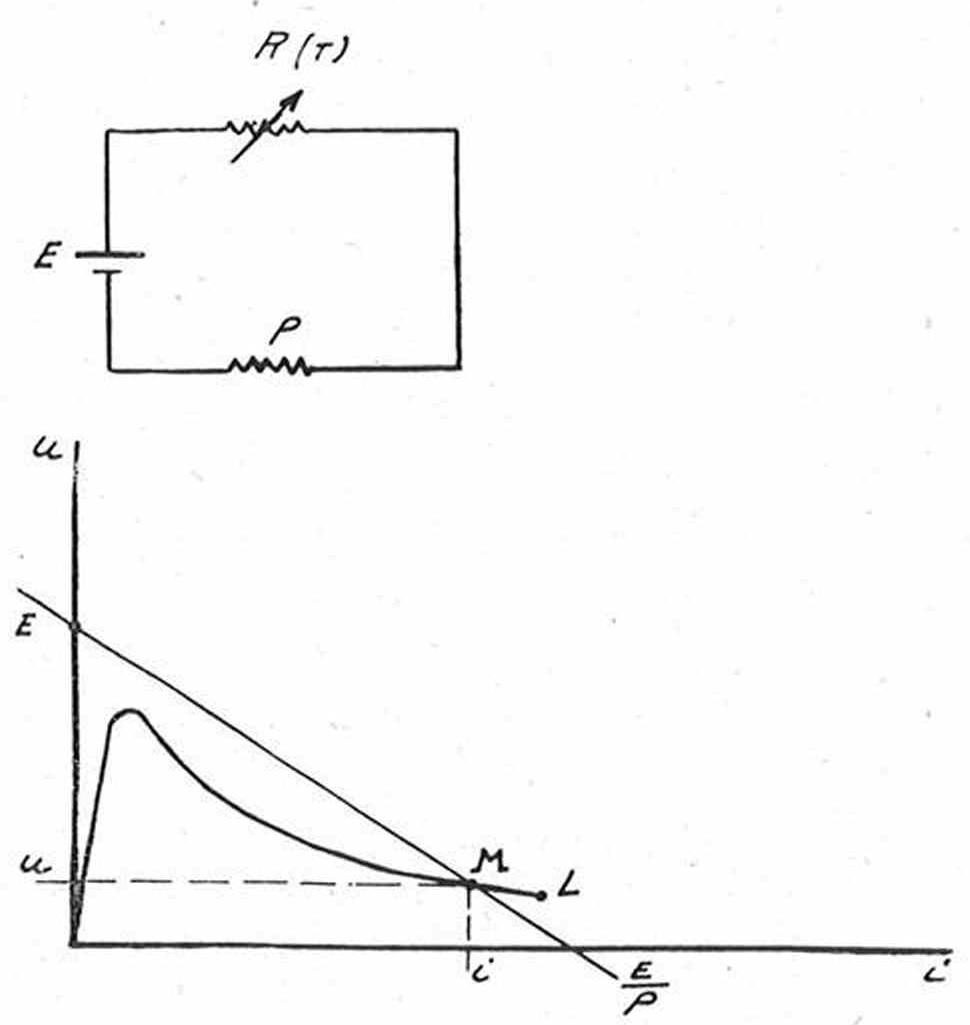


FIG. 21. — Détermination graphique du régime d'équilibre d'un circuit électrique contenant une thermistance chauffée par effet Joule.

1^{er} cas : Un seul point de fonctionnement qui est sur la portion ascendante de la courbe. Régime d'équilibre stable correspondant à un faible échauffement de la thermistance ;

2^e cas : Un seul point de fonctionnement qui est sur la partie descendante de la courbe. Régime d'équilibre stable correspondant à un notable échauffement de la thermistance.

3^e cas : Trois points d'intersection :

- P_1 : équilibre stable (faible échauffement) ;
- P_2 : équilibre instable (fort échauffement) ;
- P_3 : équilibre stable (fort échauffement).

4^e cas : Le point de fonctionnement est au-delà du point limite L . La thermistance chauffe exagérément et est détériorée.

5^e cas : Le point P_1 correspond à l'équilibre stable, mais est fort voisin de l'instabilité. Le point P_2 étant instable, il est nécessaire de surveiller de très près

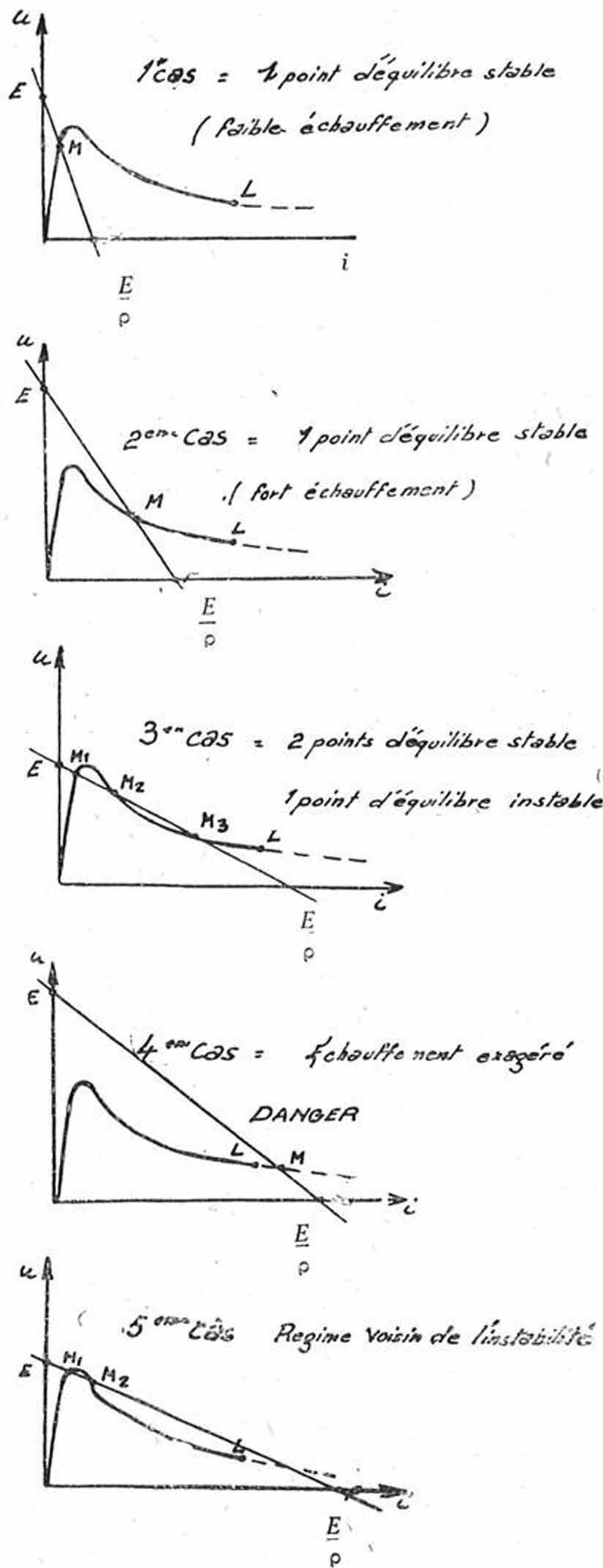
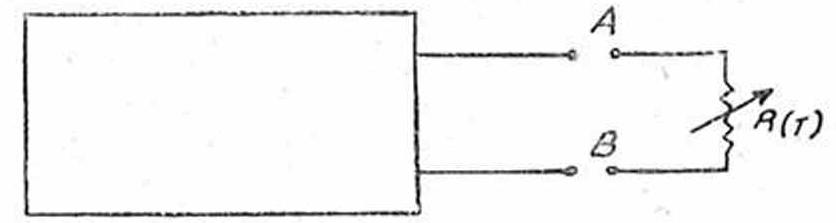


FIG. 22. — Etude de la stabilité du régime d'équilibre d'un circuit électrique contenant une thermistance chauffée par effet Joule.

le fonctionnement du système, car, en cas de légère variation d'un paramètre, le point de fonctionnement viendra en P_3 correspondant à une échauffement exagéré de la thermistance.

Généralisation : Si la thermistance est insérée dans un circuit complexe (fig. 23), le point de fonctionnement s'obtiendra en prenant l'intersection de :

1^o La caractéristique intrinsèque du circuit aux bornes A et B de branchement de la thermistance avec ;



$$V_A - V_B = f(I_{AB})$$

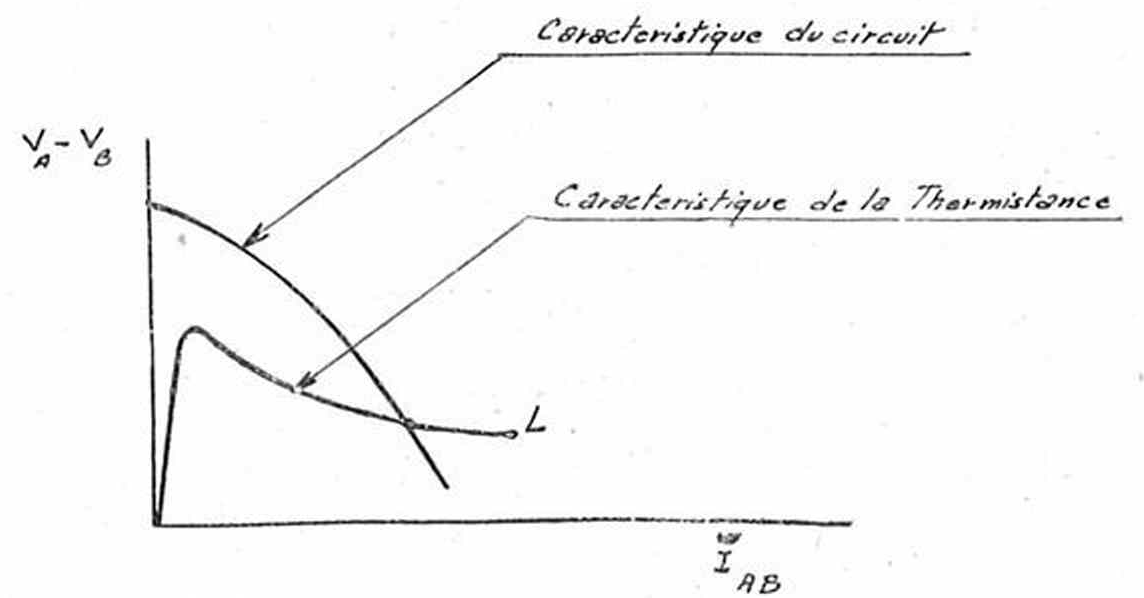


FIG. 23. — Détermination graphique du régime d'équilibre d'un circuit électrique à caractéristiques non linéaires contenant une thermistance chauffée par effet Joule.

2^o La caractéristique tension-intensité de la thermistance.

L'examen de la stabilité doit alors se faire dans chaque cas particulier.

Remarque importante : Il est nécessaire de prendre garde au fait que la courbe tension-intensité de la thermistance dépend de la température ambiante et des conditions de dissipation. Le point de fonctionnement dépend donc de ces paramètres.

Etude du régime transitoire d'un circuit électrique contenant une thermistance en série :

Lorsqu'on ferme l'interrupteur du circuit représenté sur la figure 24, la thermistance s'échauffe

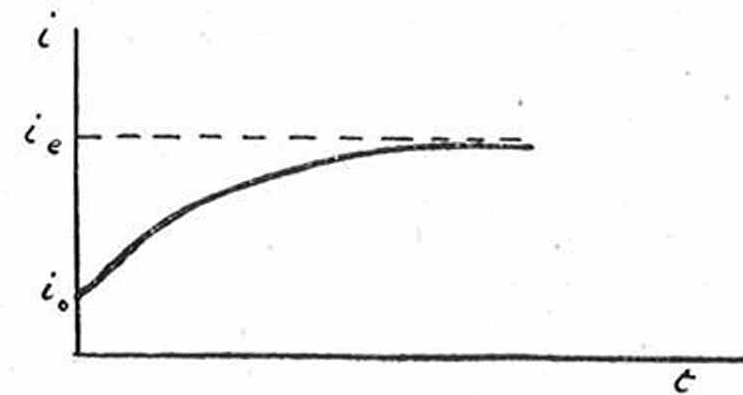
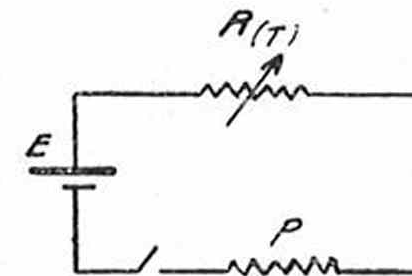


FIG. 24. — Régime transitoire d'un circuit électrique contenant une thermistance chauffée par effet Joule.

progressivement et le courant qui la traverse croît jusqu'à la valeur d'équilibre dont il a été question

précédemment. Le calcul du régime transitoire conduit aux expressions suivantes :

$$t = \int_{T_0}^T \frac{C d\tau}{E^2 \frac{R(\tau)}{[\rho + R(\tau)]^2} - K(\tau - T_0)} \quad (20)$$

$$i = \frac{E}{\rho + R(\tau)}$$

Cette intégrale ne peut être exprimée au moyen de fonctions élémentaires. L'expérience montre que l'intensité varie comme il est indiqué sur la courbe de la figure 24.

Cette courbe dépend d'un grand nombre de paramètres qui agissent de la manière suivante :

a) La première partie de la courbe dépend peu de la constante de dissipation K . La forme de la deuxième partie en dépend nettement ;

b) La pente de la courbe augmente lorsque la tension E augmente ou lorsque la résistance ρ diminue ;

c) La pente de la courbe est, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus élevée que la capacité calorifique est plus faible et la résistance de la thermistance plus faible ;

d) Une augmentation de la température ambiante accroît les intensités i_0 et i_e .

III. — LES APPLICATIONS DES THERMISTANCES

Les applications des thermistances sont extrêmement nombreuses et variées. On peut citer parmi les plus importantes :

- La mesure et la régulation des températures ;
- La compensation des dérives thermiques ;
- La pyrométrie optique ;
- La temporisation des relais ;
- La régulation des tensions ;
- La mesure des pressions des gaz ;
- La mesure des puissances électriques, etc...

Pour la commodité de l'exposé, on peut diviser ces applications en deux groupes :

Premier groupe d'applications dans lesquelles le courant qui traverse la thermistance ne l'échauffe pas de manière sensible.

Deuxième groupe d'applications dans lesquelles le courant qui traverse la thermistance l'échauffe de manière notable.

1^{er} GROUPE D'APPLICATIONS

Le courant traversant la thermistance ne l'échauffe pas de manière sensible.

La thermométrie électrique : Les thermistances sont utilisées pour mesurer et réguler les températures. Leur grande sensibilité permet d'utiliser un appareillage simple et peu coûteux. En effet, au voisinage de la température ambiante (25°C), le coefficient de température des thermistances est dix fois plus grand que celui du platine et six fois plus grand que celui du nickel.

Stabilité : La stabilité dans le temps des thermistances a fait l'objet de nombreuses recherches qui ont abouti à la mise au point de traitements de stabilisation très efficaces. Les performances suivantes peuvent être obtenues :

— Mesure ou régulation à une température *constante* inférieure à 150°C : dérive inférieure à $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Cette température limite est repoussée à 250°C pour les thermistances enrobées ;

— Mesure ou régulation à une température *variable* inférieure à 150°C : dérive inférieure à $\pm 1^\circ\text{C}$. Cette température limite est repoussée à 250°C pour les thermistances enrobées.

Appareillage : Tous les schémas utilisés en thermométrie électrique par résistance peuvent être utilisés.

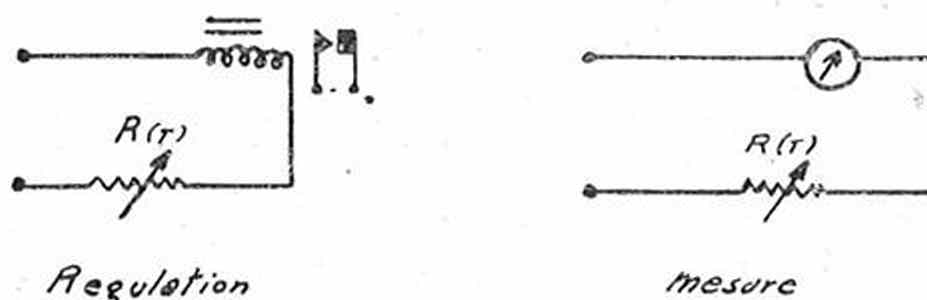


FIG. 25. — Schéma élémentaire d'un régulateur de température à thermistance.

1^{er} montage (fig. 25) : Ce montage, très simple, peut être utilisé, soit dans les applications de pré-

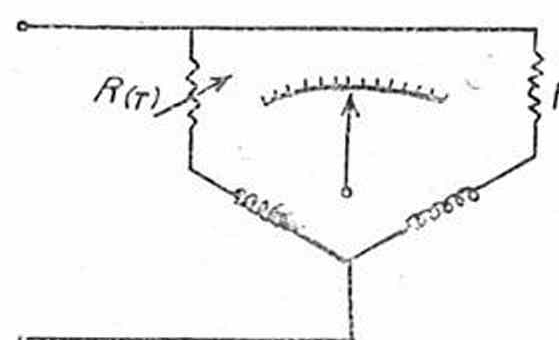


FIG. 26. — Schéma du régulateur de température à thermistance utilisant un logomètre à palette mobile.

cision, si l'on dispose d'une source de tension bien régulée (par exemple une pile étalon), soit dans les applications où la précision n'est pas recherchée, si la source de tension est médiocrement régulée.

2^e montage (fig. 26) : L'emploi d'un logomètre, à cadres croisé et palette de fer mobile, permet de réduire très sensiblement l'influence des variations de la tension d'alimentation. En donnant à la palette de fer une forme convenable, on peut dilater la partie utile de l'échelle de température.

3^e montage (fig. 27) : Les montages en pont de Wheatstone peuvent également être utilisés. Dans la plupart des cas, la nécessité d'utiliser une tension réglée n'est pas impérative, une variation de tension modifiant la fourchette de régulation sans changer la valeur de la température d'équilibre.

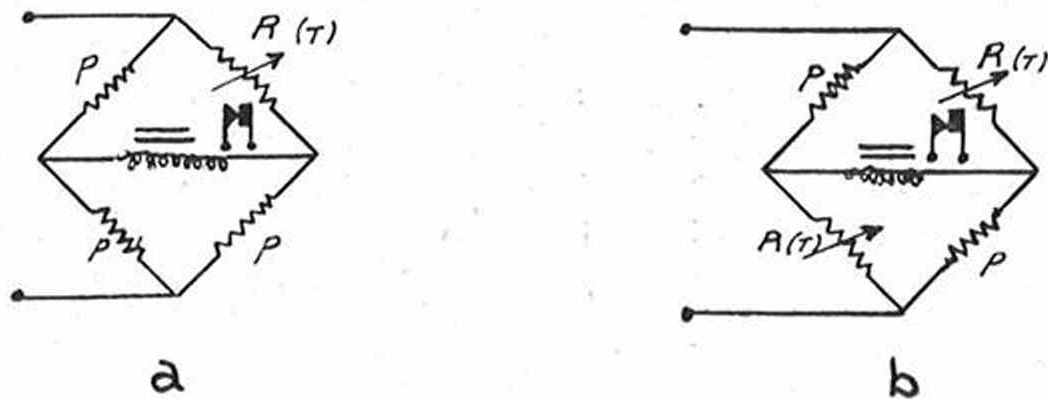


FIG. 27. — Schéma d'un régulateur de température à thermistance monté en pont de Wheatstone (a : sensibilité moyenne ; b : grande sensibilité).

Il est possible de doubler la sensibilité des montages en pont de Wheatstone en disposant une thermistance dans deux bras opposés.

4^e montage : L'emploi d'amplificateurs permet d'augmenter considérablement la sensibilité du pont. De nombreux systèmes peuvent être utilisés. Nous allons exposer le principe de deux d'entre eux.

Le premier (fig. 28) utilise un relais galvanométrique polarisé, inverseur, qui détecte le déséquilibre d'un pont de Wheatstone alimenté en courant continu (obtenu par redressement de courant alternatif suivi de filtrage).

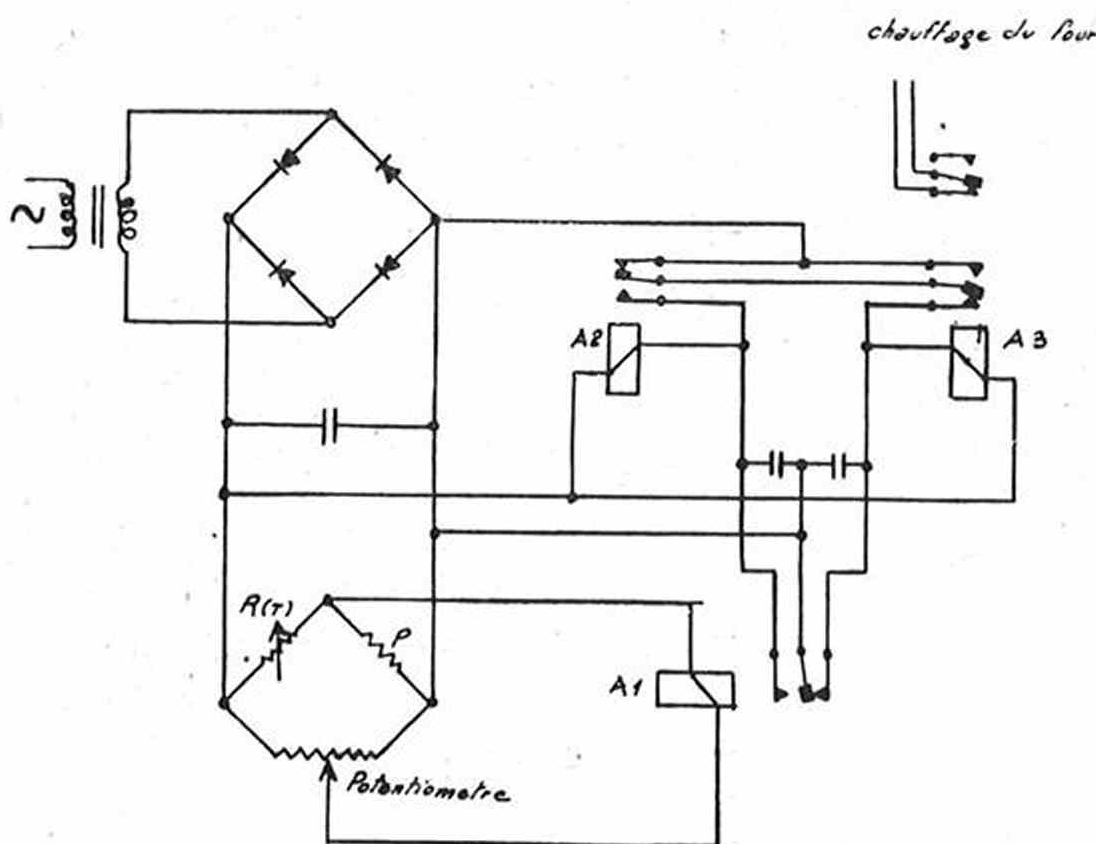


FIG. 28. — Régulateur de température à thermistance comportant un relais galvanométrique.

Le potentiomètre du pont permet de fixer la température de régulation. Le relais galvanométrique commande deux relais secondaires, inverseurs, A_2 et A_3 , qui se bloquent mutuellement. De cette façon, le système est insensible aux chocs et aux vibrations, car les relais A_2 et A_3 ne peuvent s'inverser que si le relais A_1 s'inverse franchement.

Le deuxième (fig. 29) utilise un amplificateur électronique qui présente l'avantage d'être à action continue. Sa description a paru dans le supplément aux numéros 7-8-9 de juillet-août-septembre 1952 du Journal de Physique et le Radium. Son principe est le suivant : la tension de déséquilibre du pont de Wheatstone contenant la thermistance est appliquée après amplification à la première grille d'une lampe mélangeuse. La deuxième grille de la mélangeuse reçoit une tension de phase convenable.

La tension résultante est appliquée à la grille d'un thyatron alimentée en courant alternatif et dont le circuit d'anode comprend la résistance de chauffage du thermostat. Toute variation de la température de ce dernier fait varier la tension de déséquilibre du pont, qui entraîne une modification du déphasage de la tension-grille par rapport à la tension-plaque du thyatron. L'angle de passage du courant anodique est donc modifié, donc également la puissance de chauffage du thermostat.

Étalonnage et interchangeabilité des éléments : la thermométrie par thermistances pose certains problèmes particuliers :

1^o La résistance des thermistances est liée à la température par une loi non linéaire. A moins d'employer un système correcteur, l'échelle des appareils de mesure ou de réglage n'est pas linéaire. La figure 30 reproduit le cadran du potentiomètre de réglage d'un régulateur de température.

Il est possible de rendre cette échelle très sensiblement linéaire dans une gamme de température ayant une étendue de 30 à 50°C pour les thermistances normales, et de 200 à 300°C pour les thermistances réfractaires, en shuntant la thermistance par une résistance fixe indépendante de la température, cela d'ailleurs au détriment de la sensibilité. En effet, il a été vu précédemment qu'il était possible, de cette manière, d'obtenir des correspondances linéaires entre une température d'une part, et une résistance, une intensité ou une tension, d'autre part.

2^o Les coefficients a et b , intervenant dans la formule ($R = a e^{b/T}$) sont définis avec certaines tolérances. De ce fait, le problème de l'interchangeabilité se pose dans certains cas, par exemple :

— Lors de l'étalonnage d'une série d'appareils de mesure ou de régulation ;

— Lorsqu'un même appareil récepteur doit être branché alternativement sur plusieurs sondes.

Plusieurs solutions sont possibles :

a) Utiliser des thermistances triées selon la tolérance correspondant à l'erreur admise ;

b) Utiliser des thermistances triées selon une plus large tolérance et associer à chacune d'entre elles une résistance fixe et une résistance parallèle, de manière à obtenir une loi de variation s'approchant, à la tolérance fixée, d'une loi nominale déterminée ;

c) Adapter la tension d'alimentation à chaque thermistance (fig. 31).

Dans les applications de haute précision, il est nécessaire de prévoir la fourniture d'une courbe de correction ou d'un cadran étalonné pour chaque thermistance.

Remarque : Lorsqu'une grande précision de régulation n'est pas demandée, il est possible d'utiliser d'autres systèmes fonctionnant sur des principes différents :

- a) Le régulateur statique de température (page 581) ;
- b) Le relais thermique de température (page 589).

sure et régulation de la température des salles, des camions, des wagons.

- Industries alimentaires : mesure de la température des silos à grains, des entrepôts frigorifiques.
- Météorologie, Agriculture : Mesure de la température de l'air (ballons, sondes). Détection des refroidissements nocturnes.

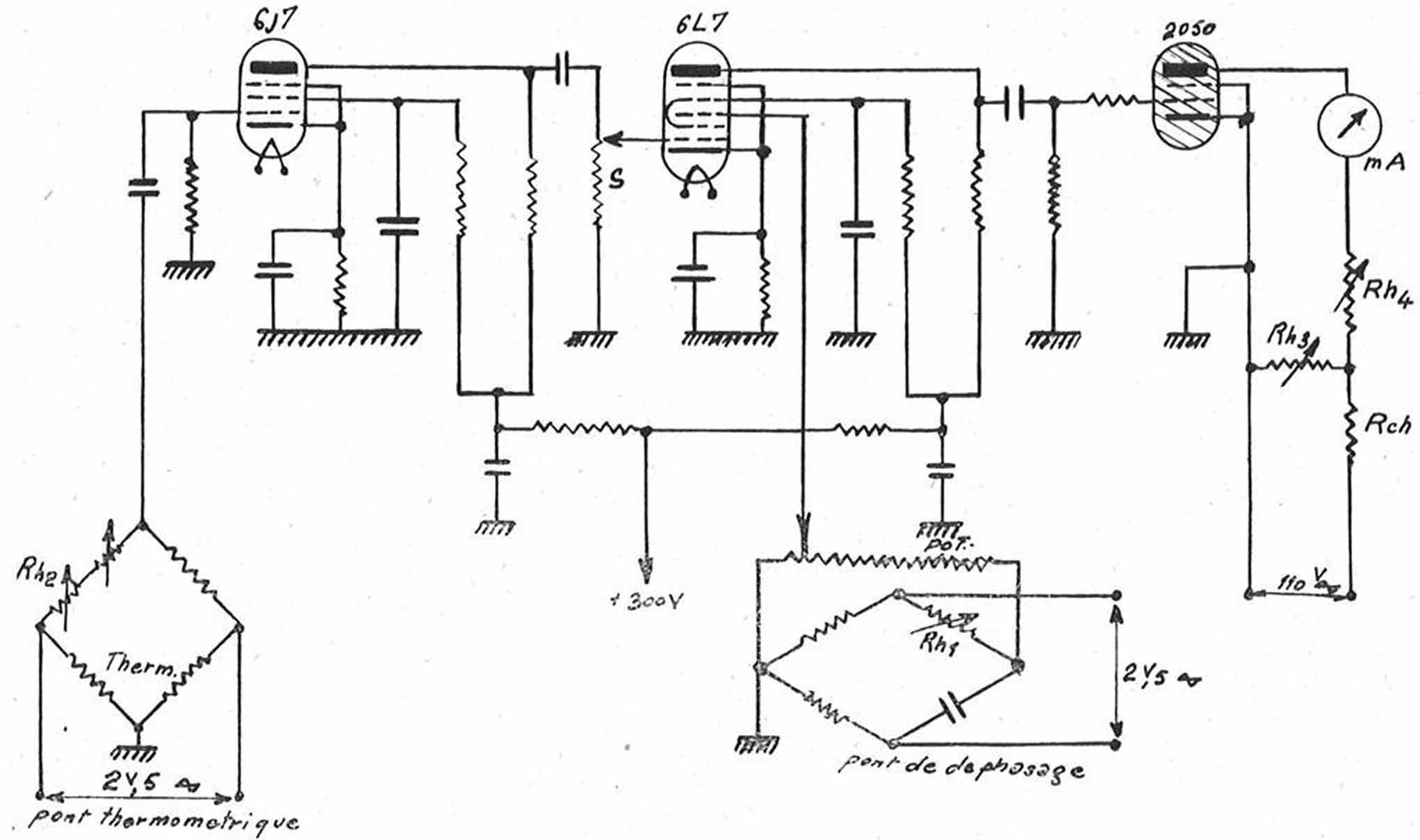


FIG. 29. — Régulateur de température à thermistance comportant un amplificateur électronique à action continue.

Applications diverses : La liste des principales applications de la thermométrie par thermistance donne une idée de la grande variété des possibilités d'emploi de ces matériels :

- Industries thermiques : mesure et régulation de la température des cryostats, étuves, fours, chaudières.
- Industries automobile et aéronautique : mesure de la température de l'eau des radiateurs, de l'huile des carters, des gaz d'échappement. Régulation de la température des glaces chauffantes des avions.

- Laboratoires : Toutes mesures ou régulation de température ;
- Sécurité : détection des échauffements anormaux (détecteurs thermométriques et thermo-vélocimétriques).

La compensation des dérives thermiques : Les caractéristiques des organes constituant les circuits électriques dépendent, dans une proportion plus ou

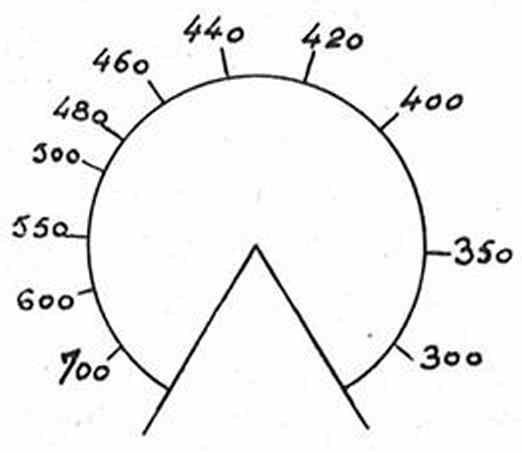


FIG. 30. — Reproduction du cadran de réglage d'un régulateur de température à thermistance.

— Industries mécanique électrique et radioélectrique : mesure de la température des organes de machines, paliers de machine, enroulements de moteurs électriques, huile de transformateur, étuves pour cristaux piézoélectriques....

— Industries du bâtiment et des transports : me-

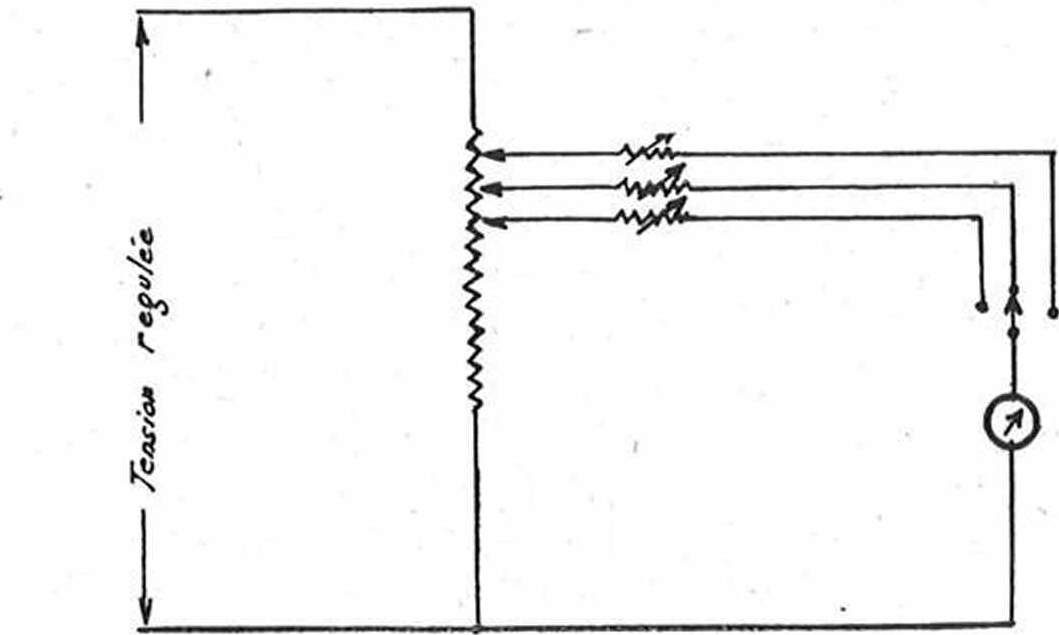


FIG. 31. — Schéma d'un thermomètre à thermistance à plusieurs directions.

moins élevée, de la température ambiante. Les thermistances permettent de compenser, dans un grand nombre de cas, les dérives thermiques des résistances, intensités, ou tensions des circuits. On désigne habituellement sous le nom de « compensation d'ambiance » l'ensemble de ces applications.

Nous examinerons, dans ce qui suit, deux applications importantes :

1° La compensation des variations thermiques des résistances métalliques ;

2° La régulation statique de température :

Remarque importante : Dans tous les problèmes de compensation d'ambiance, il est indispensable de s'assurer que :

1° La température de la thermistance de compensation est égale à celle de l'organe à compenser ;

2° L'intensité traversant la thermistance de compensation est suffisamment faible pour ne pas l'échauffer.

La compensation des variations thermiques des résistances métalliques : On sait que la valeur des résistances métalliques croît lorsque la température augmente suivant la loi linéaire :

$$Z(T) = Z(T_0) [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (21)$$

Pour les métaux usuels, α est compris entre $+ 0,003/^\circ\text{C}$ et $0,0065/^\circ\text{C}$.

Solution classique : on compense habituellement ces variations de résistance en disposant en série avec la résistance métallique une résistance fixe (constantan, manganin). Cette résistance de compensation doit être nettement plus élevée que la résistance à compenser. Par exemple, supposons qu'on désire compenser entre 0 et 60°C les variations de la résistance $Z(T)$ d'un fil de cuivre ayant une résistance de 24Ω à 20°C . Le coefficient de température est $+ 0,004/^\circ\text{C}$.

Remarquons que :

$$Z(0^\circ\text{C}) = 22 \text{ ohms ;}$$

$$Z(60^\circ\text{C}) = 28 \text{ ohms.}$$

La variation maximum est donc $\pm 12 \%$ par rapport à la valeur moyenne. Si l'on veut réduire cette variation à $\pm 2 \%$, il faudra disposer en série avec la résistance de cuivre une résistance fixe de 125 ohms. La résistance globale sera alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} 147 \text{ ohms à } 0^\circ\text{C ;} \\ 150 \text{ ohms à } 30^\circ\text{C ;} \\ 153 \text{ ohms à } 60^\circ\text{C.} \end{array} \right.$$

Deuxième solution : La caractéristique d'un dipôle constitué par une thermistance fixe en parallèle avec une thermistance présente une partie quasi-rectiligne à pente négative (voir Fig. 15b). On réalisera donc la compensation en disposant un tel dipôle en série avec le fil de cuivre (fig. 32).

En se reportant à la figure 19, on voit que si l'on utilise une thermistance en matériau 3 il est nécessaire que le rapport $\frac{R_{25}}{\rho}$ soit égal à 1,75 pour que la température d'inflexion soit 30°C . La pente au point d'inflexion est $\frac{-0,0085}{\rho}$. Si la température

croît de 1°C , la résistance du cuivre augmente de 0,1 ohm. Pour que la compensation soit correcte, il faut donc que la valeur de la résistance ρ soit :

$$\rho = \frac{0,1}{0,0085} = 11,75 \text{ ohms}$$

La résistance à 25°C de la thermistance à 25°C doit être

$$11,75 \times 1,75 = 20,5 \text{ ohms}$$

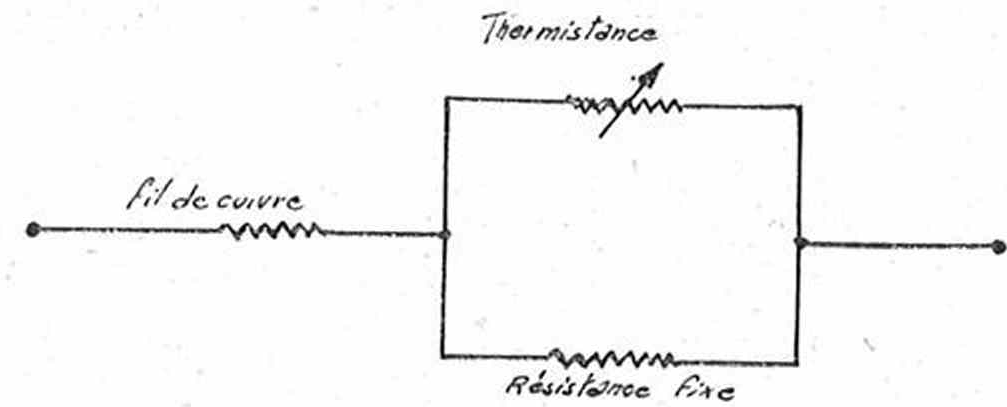


FIG. 32. — Compensation des variations thermiques de résistance d'un fil de cuivre.

La résistance du dipôle résistance-thermistance est donnée par la courbe référencée « 1,75 » de la figure 18. La résistance globale du fil de cuivre et du dipôle de compensation est alors :

température (°C)	0	10	20	25	30	40	50	60
Résistance (ohms)	31.7	31.9	31.9	32	32	32	32.1	32.3

La variation est inférieure à $\pm 1 \%$ de la valeur moyenne (32 ohms).

Si l'on compare les deux solutions, on constate que la deuxième solution donne une variation plus faible et que l'accroissement moyen de résistance n'est que 7 ohms au lieu de 125 ohms.

La régulation statique de température : La température d'équilibre T d'une étuve électrique dans laquelle est dissipée une puissance constante W est donnée par la formule

$$T = T_0 + \frac{W}{K} \quad (22)$$

où T_0 est la température ambiante et K la constante de dissipation. Si ρ est la valeur de la résistance chauffante et U la tension appliquée aux bornes de cette résistance, la formule précédente peut s'écrire :

$$T = T_0 + K \frac{U^2}{\rho} \quad (23)$$

Si l'on fait varier la tension U de telle manière que :

$$U = \sqrt{K \rho (T - T_0)} \quad (24)$$

la température restera constante.

Le schéma utilisé à cet effet est indiqué sur la figure 33 :

Si l'on pose :

$$Z(T) = \frac{\rho R(T)}{\rho + R(T)} \quad (15)$$

La tension U est donnée par la formule:

$$U = E \frac{Z(T)}{r + Z(T)} \quad (25)$$

En s'aidant des figures 16, 17, 18 et du tableau 19, on pourra déterminer par tâtonnements les caractéristiques des éléments de telle manière que la tension U varie comme il est indiqué par la formule (29).

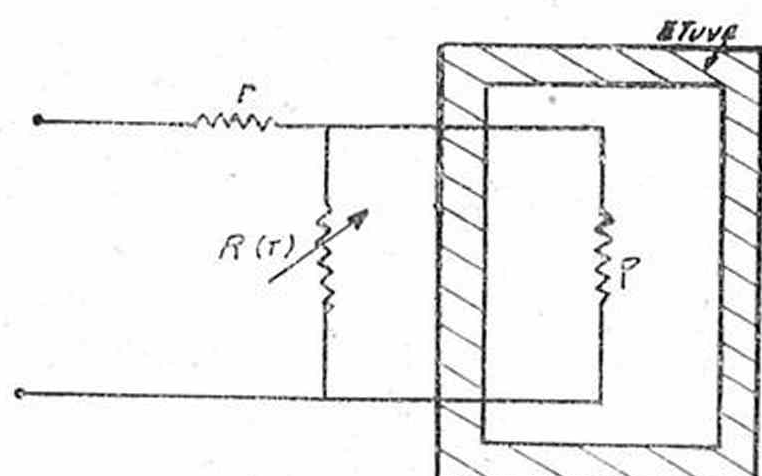


FIG. 33. — Schéma du régulateur statique de température à thermistance.

Applications : Les principales applications des thermistances aux problèmes de compensation d'ambiance sont les suivantes :

- Compensation des variations de résistance des cadres des appareils de mesure, des bobinages, des lignes de télécommunications ;
- Compensation de la dérive thermique des oscillateurs des discriminateurs ;
- Compensation de la dérive thermique des ponts détecteurs de tension utilisant des résistances non linéaires ;
- Compensation de l'influence de la température ambiante sur les systèmes temporisateurs à thermistances ;
- Compensation de l'influence de la température ambiante sur les bolomètres hyperfréquences à thermistances ;
- Compensation d'ambiance en pyrométrie optique ;
- Régulateur statique de température.

La pyrométrie optique : La grande sensibilité des thermistances permet de les utiliser dans les pyromètres optiques à radiation. Le flux calorifique est concentré au moyen d'un système optique sur une thermistance de faibles dimensions (habituellement une thermistance « perle »). La température d'équilibre T de cette dernière est donnée par la formule :

$$T = T_0 + \frac{W}{K} \quad (26)$$

W étant la puissance rayonnée absorbée par la thermistance ;

T_0 étant la température ambiante ;

K la constante de dissipation de la thermistance.

L'échauffement ($T - T_0$) entraîne une diminution de la résistance de la thermistance que l'on peut mesurer par un moyen approprié.

La compensation des variations de température ambiante peut s'effectuer au moyen d'une deuxième thermistance identique à la première mais protégée du rayonnement calorifique.

2^e GROUPE D'APPLICATIONS

Le courant traversant la thermistance l'échauffe de manière notable.

La courbe caractéristique d'équilibre tension-intensité des thermistances a été représentée sur la figure 7b. Dans toutes les applications antérieures on a supposé que le point de fonctionnement se tenait dans la première portion de la courbe (correspondant à un faible échauffement). Dans les applications dont il sera désormais question, le point de fonctionnement se trouvera dans la deuxième portion de la courbe.

La régulation de tension : Si l'on dispose une résistance fixe en série avec une thermistance, parcourue par un courant d'intensité relativement élevée, la caractéristique d'équilibre tension-intensité de l'ensemble est représentée sur la figure 34.

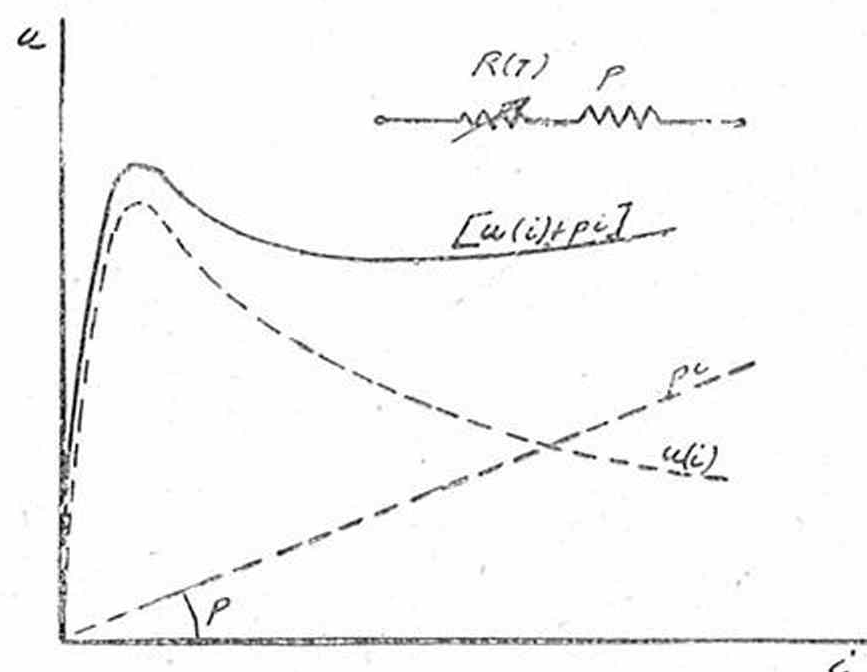


FIG. 34. — Caractéristique d'équilibre intensité-tension du « dipôle résistance-thermistance en série ».

Cette caractéristique comporte un palier sensiblement horizontal, ce qui montre qu'un tel système peut être utilisé en régulateur de courant. Le montage utilisé est représenté sur la figure 35.

Le calcul graphique du système est indiqué sur la figure 36.

L'équation de la droite de charge est :

$$\left(1 + \frac{P_2}{Z}\right) U + P_2 i = E \quad (27)$$

Cette droite coupe la caractéristique d'équilibre tension-intensité de l'ensemble en un point dont l'ordonnée est égale à la tension de sortie. Lorsque la tension d'entrée et la résistance de charge varient, cette droite balaye la partie du plan limitée par les droites AB et CD. Pour que la régulation soit correcte, il est nécessaire que ces droites limites AB et

CD coupent la caractéristique tension-intensité dans la zone utile de régulation.

Exemple : Régulateur fournissant une tension de sortie de $24 \pm 0,5$ volts à partir d'un réseau ayant une tension variant entre 54 et 76 volts, l'intensité maximum débitée étant de 100 mA .

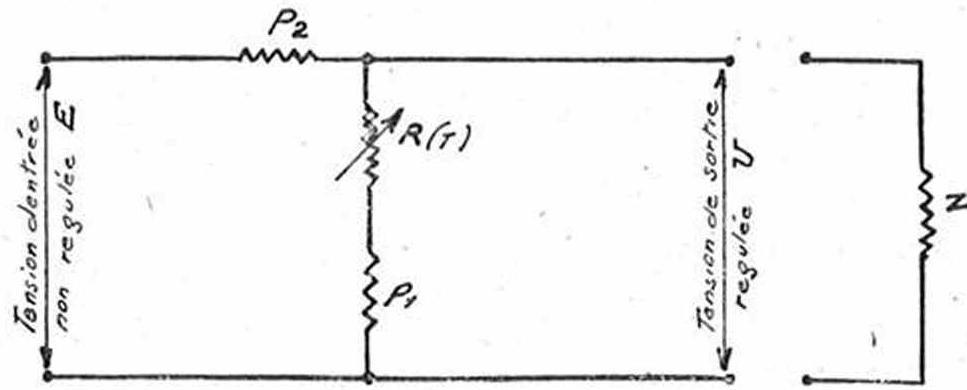


Fig. 35. — Schéma du régulateur de tension à thermistance.

Le schéma du régulateur est représenté sur la figure 37

Les caractéristiques sont les suivantes :

— Thermistance $R(T)$: disque de 22 mm de diamètre, de 1 mm d'épaisseur, en matériau 1, muni d'ailettes de refroidissement ;

- Résistance ρ_1 : 25 ohms ;
- Résistance ρ_2 : 200 ohms ;
- Résistance r : 1 000 ohms.

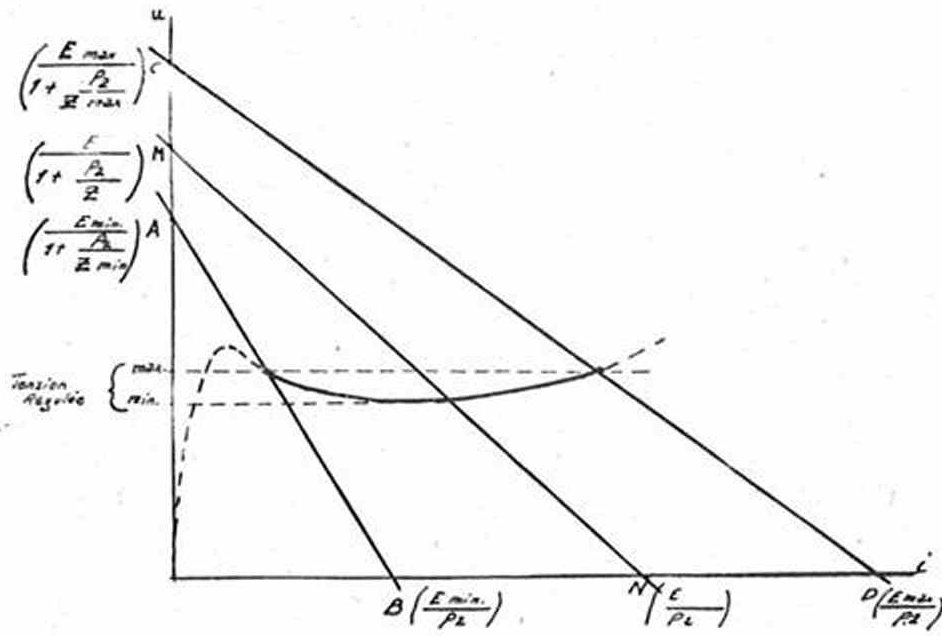


Fig. 36. — Calcul graphique d'un régulateur de tension à thermistance.

La courbe d'équilibre tension-intensité de la thermistance, placée dans l'air calme, disposée en série avec la résistance fixe, est représentée sur la figure 38 :

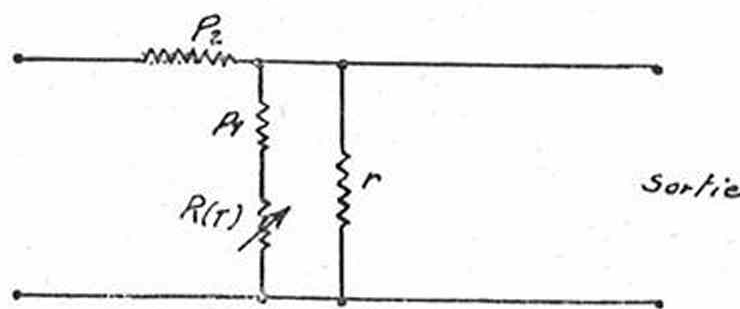


Fig. 37. — Exemple pratique de régulateur de tension à thermistance.

avec la résistance fixe, est représentée sur la figure 38 :

Les droites limites AB et CD sont définies par leurs coordonnées à l'origine :

$$A \left\{ \begin{array}{l} i = 0 \\ u = 27 \text{ volts} \end{array} \right. \quad C \left\{ \begin{array}{l} i = 0 \\ u = 63 \text{ volts} \end{array} \right.$$

$$B \left\{ \begin{array}{l} i = 270 \text{ mA} \\ u = 0 \end{array} \right. \quad D \left\{ \begin{array}{l} i = 380 \text{ mA} \\ u = 0 \end{array} \right.$$

On voit que ces droites coupent la caractéristique dans la zone utile de régulation (23,5 — 24,5 volts).

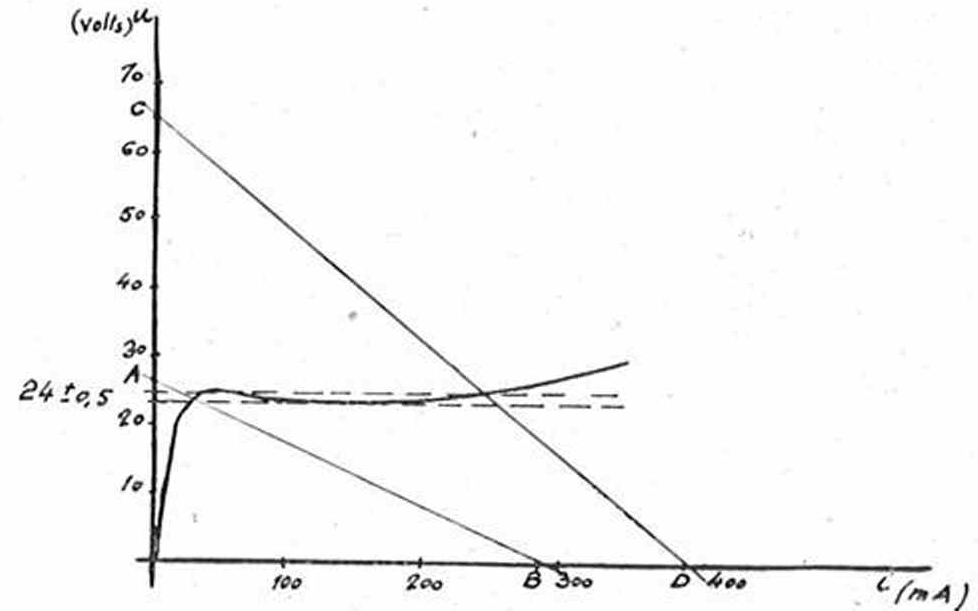


Fig. 38. — Caractéristiques du régulateur de tension représenté sur la figure 37.

Les avantages des régulateurs de tension à thermistances sont les suivants :

- Fonctionnement purement statique ;
- Possibilité de régulation sous faible tension (quelques volts) ;
- Fonctionnement en courant alternatif et en courant continu ;
- Montage simple et peu coûteux ;
- Rendement relativement élevé.

En contrepartie, ces régulateurs présentent deux inconvénients :

- Le temps de réponse élevé : de l'ordre de quelques secondes, pour les faibles puissances (< 100 mW) à quelques minutes, pour les puissances plus élevées (5 watts) ;
- La sensibilité aux variations de température ambiante.

Le coefficient de température d'un tel régulateur est négatif et de l'ordre de $-1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Ce coefficient peut d'ailleurs être réduit de moitié en disposant en série avec la thermistance une résistance métallique à coefficient de température positif.

La détection des variations de tension : Le dispositif qui va être décrit ci-après permet de déceler les fluctuations d'une tension autour d'une valeur centrale. La détection de ces fluctuations peut être utilisée soit pour les amplifier (cas de l'expansion des contrastes), soit, au contraire, pour les réduire (cas de la régulation de tension).

Le schéma de base du dispositif est indiqué sur la figure 39.

Dans deux bras opposés du pont de Wheatstone sont montées deux thermistances identiques $r(T)$ et dans les deux autres bras, deux résistances fixes identiques ρ . Ces éléments sont choisis de telle manière que :

$$\left[r(T) \right]_{\text{ambiance}} > \rho \quad (28)$$

Si l'on fait croître la tension V à partir de 0, la tension de sortie v varie comme il est indiqué sur la figure 40.

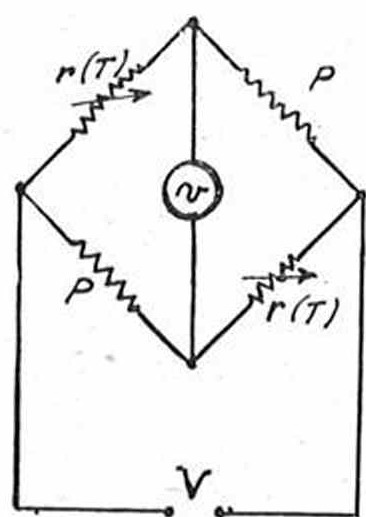


FIG. 39. — Schéma du détecteur de variations de tension à thermistance.

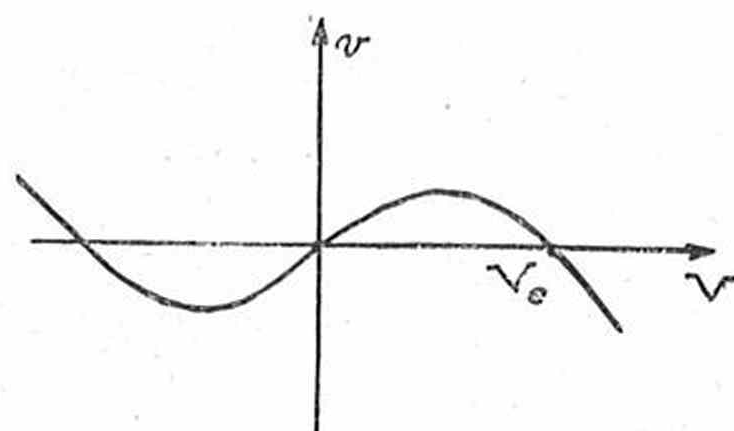


FIG. 40. — Caractéristique du détecteur de variations de tension à thermistance.

Cette courbe est définie par le système d'équations paramétriques suivant :

$$\begin{cases} V = u(i) + \rho i \\ v = u(i) - \rho i \end{cases} \quad (29)$$

La fonction $u(i)$ étant la caractéristique d'équilibre tension-intensité des thermistances, définie antérieurement par les équations (9).

L'équilibre du pont a lieu lorsque la tension d'entrée est égale à la tension V_e . Toute variation de la tension V autour de V_e entraînera une variation de v . La sensibilité du système est définie par l'expression :

$$\frac{v}{\left(\frac{V - V_e}{V_e}\right)}$$

On l'exprime habituellement en volts pour une variation de 1 % de tension d'entrée.

Exemple : Le pont défini comme suit :

- Thermistance perle $R_{25^\circ\text{C}} = 1,5 \text{ M}\Omega$;
- Résistance fixe = $33 \text{ 000 } \Omega$

a les caractéristiques suivantes :

- Tension d'entrée correspondant à l'équilibre : 70 volts. ;
- Sensibilité : 2 volts pour une variation de 1 % de la tension d'entrée.
- Temps de réponse : 2 secondes.

Compensation d'ambiance : Le système détecteur décrit ci-dessus a un coefficient de température négatif, c'est-à-dire que la tension d'équilibre V_e diminue lorsque la température croît.

Le schéma du système compensé est indiqué sur la figure 41.

Le système correcteur est un pont diviseur de tension comprenant une résistance fixe s et une thermistance $R(T)$ à grande dissipation. On a vu antérieurement que si l'on alimentait le pont sous la tension constante U , la tension aux bornes de la thermistance décroissait lorsque la température crois-

sait. Dans ces conditions, si ce diviseur de tension est calculé de telle manière que la tension V varie dans les mêmes proportions que la tension V_e quelle que soit la température ambiante, la dérive thermique du système détecteur est annulée.

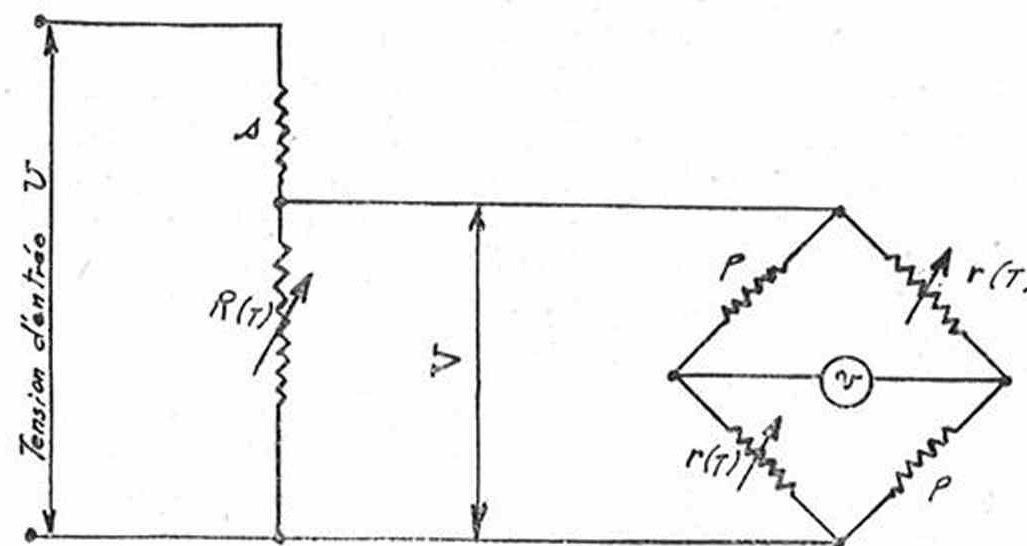


FIG. 41. — Compensation de la dérive thermique d'un détecteur de variations de tension à thermistance.

Les caractéristiques d'un tel système sont les suivantes :

- Fonctionnement purement statique ;
- Simplicité de montage ;
- Fonctionnement en courant alternatif et en courant continu ;
- Sensibilité élevée ;
- Temps de réponse de quelques secondes.

Remarque : en courant continu, les tensions de déséquilibre ont des polarités inverses de part et d'autre de l'équilibre, alors qu'en courant alternatif, c'est la phase de la tension de déséquilibre qui s'inverse.

La régulation des générateurs d'oscillations sinusoïdales :

Généralités : Tout oscillateur destiné à produire des oscillations sinusoïdales peut être considéré comme l'association de 3 dispositifs élémentaires :

- 1 amplificateur ;
- 1 dispositif de réaction, couplant la sortie de l'amplificateur à son entrée ;
- 1 circuit sélectif, intercalé plus ou moins directement dans la boucle.

Il se produit des oscillations entretenues si le gain total le long de la boucle est exactement égal à l'unité et si la somme des déphasages le long de la boucle pour la fréquence d'oscillations, est égal à $2k\pi$. Le circuit sélectif détermine la fréquence de l'oscillation en agissant le plus souvent sur le gain et sur la phase. En raison de sa « surtension », il atténue les harmoniques et la tension oscillante se rapproche plus ou moins de la sinusoïde idéale. Ce circuit sélectif est constitué soit par un circuit oscillant capacité-self-inductance, soit par un réseau capacité-résistance.

On sait par ailleurs que la limitation de l'amplitude des oscillations est due aux distorsions qu'introduit l'amplificateur lorsque l'amplitude atteint

inférieure à celle qui provoque les distorsions de l'amplificateur, la pureté de l'onde est beaucoup plus grande.

Les avantages suivants apparaissent également :

- Amplitude peu sensible aux changements de fréquence ;
- Amplitude indépendante des tensions d'alimentation ;
- Stabilité de fréquence accrue.

Les dispositifs limiteurs d'amplitude : Deux types de dispositifs peuvent être utilisés :

- Les dispositifs électroniques ;
- Les dispositifs thermiques.

A) Les dispositifs électroniques : de mise au point compliquée, introduisent eux-mêmes une certaine distorsion.

B) Les dispositifs thermiques : consistent à utiliser une résistance à grand coefficient de température. Cette résistance est disposée dans un pont diviseur alimenté par la tension de l'oscillateur. Sous l'effet de cette tension, la résistance s'échauffe ; sa résistance varie et le rapport du diviseur de tension est modifié.

Avant la mise au point des thermistances, on utilisait habituellement comme résistance une lampe à filament de tungstène. Le tableau ci-dessous fait ressortir les avantages des thermistances sur les lampes à filament de tungstène :

Thermistance	Lampe à filament de N
Coefficient de température : — 2 à — 5 %/°C suivant la température de travail Grande sensibilité.	Coefficient de température : + 0,4 %/°C Faible sensibilité.
Faible dissipation thermique Faible puissance absorbée	Forte dissipation thermique. Puissance absorbée notable.
Possibilité d'obtenir des impédances notables Adaptation aisée aux tubes électroniques	Très faible impédance. Adaptation difficile aux tubes électroniques.

Les dispositifs d'amplitude à Thermistance : Deux schémas sont indiqués ci-après :

1° Oscillateur à circuit capacité-self-inductance (fig. 42) :

— Coefficient de surtension du circuit oscillant = 12 ;

— Thermistance : type « perle » $R_{25^{\circ}\text{C}} = 2 M \Omega$.

La tensions de sortie est de 4,5 volts efficaces, la distorsion de 0,5 %.

2° Oscillateur à pont de Wien (fig. 43) :

— Thermistance : type « perle » — $R_{25^{\circ}\text{C}} = 2 M \Omega$
La tension de sortie est de 12 volts efficaces, la distorsion de 0,3 %. La variation de tension de sortie d'un bout à l'autre de la gamme est de 2 %.

Ces montages fonctionnent à des fréquences comprises entre 50 hz et 500 KHz. La compensation de température peut s'effectuer simplement au moyen d'une autre thermistance de valeur convenable, disposée dans le pont diviseur.

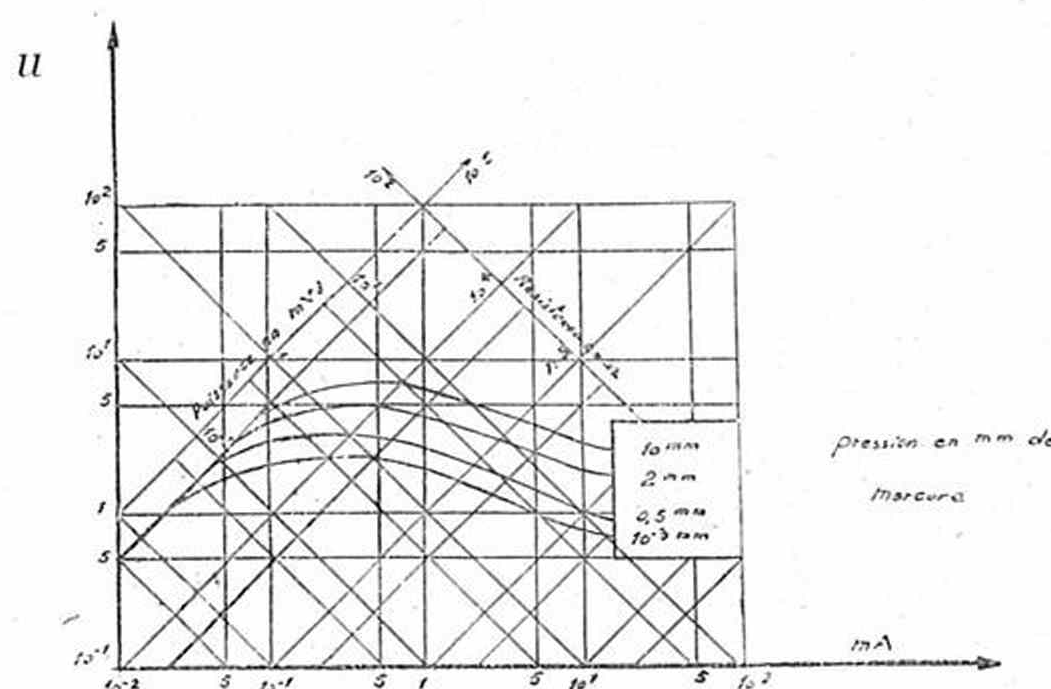


FIG. 44. — Influence de la pression sur la courbe d'équilibre intensité-tension d'une thermistance (thermistance perle ayant une résistance de 50 Kohm à 25°C).

La mesure des pressions gazeuses : La température d'équilibre d'une thermistance correspond à l'égalité entre l'énergie qu'elle absorbe par effet Joule et celle qu'elle dissipe dans le milieu ambiant. Lorsqu'une thermistance est placée dans un milieu gazeux calme les conditions de dissipation dépendent de la pression du gaz, pour autant que cette dernière est comprise entre 10^{-3} et 10 mm de mercure. Le fonctionnement des manomètres à thermistances est basé sur ce principe (qui est également celui de la jauge de PIRANI).

Sur la figure 44 a été dessiné le faisceau des courbes caractéristiques d'équilibre tension-intensité d'une thermistance placée dans l'air et soumise à différentes pressions.

Le montage du manomètre est représenté sur la figure 45.

Le pont de Wheatstone servant à la mesure comprend deux thermistances identiques $R_1(T)$ et $R_2(T)$. La thermistance $R_1(T)$ est placée dans une ampoule reliée à l'enceinte dont on veut mesurer la pression. La thermistance $R_2(T)$ est également placée dans une ampoule qui sera soit, remplie de gaz sous pression nettement supérieure à 10 mm de mercure si l'on désire mesurer des pressions supérieures à 1 mm de mercure, soit, vidée à une pression nettement inférieure à 10^{-3} mm de mercure si l'on désire mesurer des pressions inférieures à 1 mm de mercure.

Ces deux thermistances étant disposées au voisinage l'une de l'autre, l'influence des variations de température ambiante est très faible.

La mesure des vitesses des fluides : La puissance dissipée par convection croît lorsque la vitesse du fluide entourant la thermistance augmente. De ce

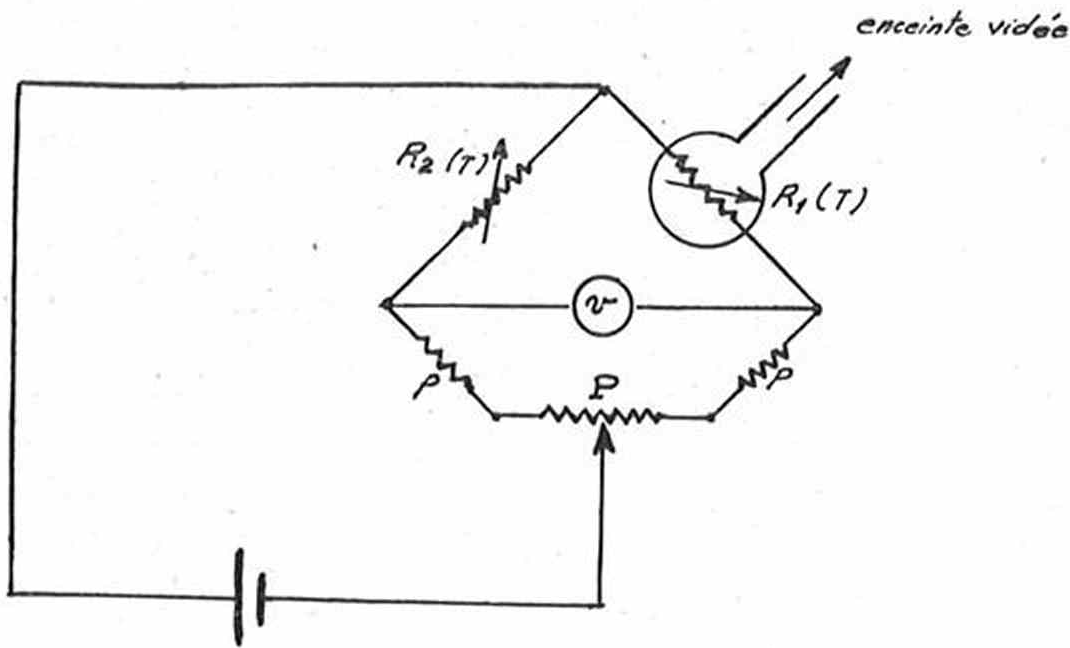


FIG. 45. — Schéma du manomètre à thermistance.

fait, la caractéristique d'équilibre tension-intensité de la thermistance se modifie. Il est donc possible de construire des anémomètres à thermistances fonctionnant suivant ce principe.

Le schéma de l'appareil est indiqué sur la figure 46.

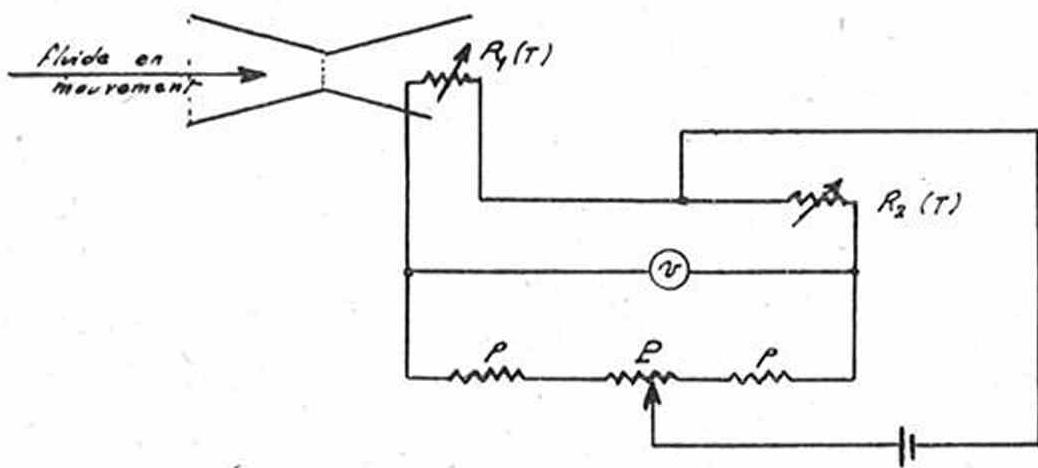


FIG. 46. — Schéma du dispositif de mesure de la vitesse des fluides.

La thermistance $R_1(T)$ est placée dans le fluide en mouvement ;

La thermistance $R_2(T)$, identique à la première est placée dans un fluide de même nature, mais au repos. Ces deux thermistances étant disposées au voisinage l'une de l'autre, l'influence de la température ambiante est très réduite.

La mesure des puissances électriques en haute fréquence : Les thermistances utilisées pour les mesures de puissances en haute fréquence sont constituées par des perles disposées à l'intérieur de petites

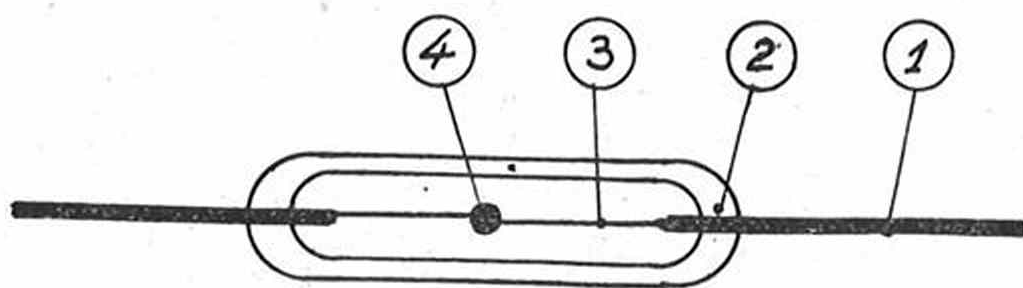


FIG. 47. — Coupe longitudinale des thermistances utilisées pour la mesure des puissance H.F. (1 : copperclad ; 2 : verre ; 3 : fil de platine ; 4 : élément semi-conducteur en forme de perle).

ampoules de verre comme le montre la figure 47. La longueur de l'ampoule est de l'ordre de 10 mm, son diamètre est de l'ordre de 3 mm.

L'adaptation de la charge à l'impédance du cir-

cuit s'effectue aisément en employant la méthode de mesure qui va être décrite. Comme la résistivité des matériaux constituant les thermistances est notable, on peut admettre que la profondeur de pénétration est supérieure au diamètre de la sphère, donc indépendante de la fréquence, même pour les fréquences dépassant 10 000 Mhz.

La thermistance est insérée dans un bras de pont de Wheatstone dont les trois autres bras comportent des résistances fixes ρ égales à l'impédance de charge du circuit (fig. 48).

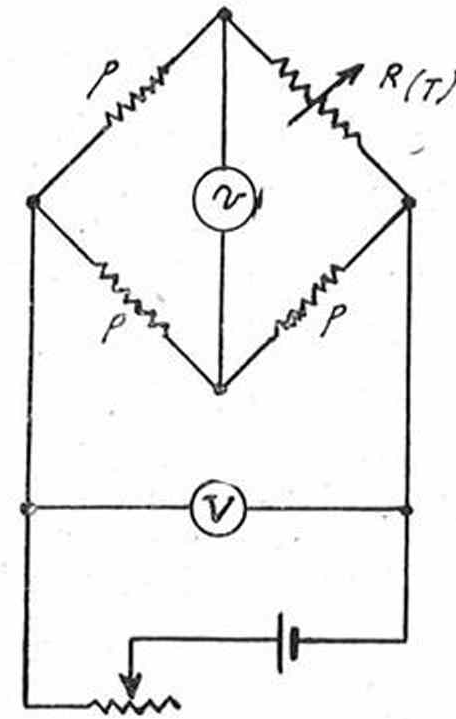


FIG. 48. — Schéma du circuit de mesure des puissances H.F.

Dans une première mesure, aucune puissance H.F. n'étant appliquée à la thermistance, on fait croître la tension U_1 continue, appliquée au pont, jusqu'à réaliser l'équilibre. La puissance absorbée par la thermistance est alors

$$P_1 = \frac{U_1^2}{4\rho}$$

On applique alors la haute fréquence et on diminue la tension continue jusqu'à réaliser de nouveau l'équilibre. La puissance continue est dans ce deuxième cas

$$P_2 = \frac{U_2^2}{4\rho}$$

La différence $(P_1 - P_2)$ est égale à la puissance H.F. absorbée par la thermistance.

Le principe même de la mesure permet d'éliminer les variations de température ambiante, à condition que les deux mesures soient faites assez rapidement et que la température ambiante varie lentement.

La temporisation : On a vu antérieurement que lorsqu'une thermistance était disposée dans un circuit électrique (fig. 24), l'intensité traversant le circuit était une fonction croissante du temps. De nombreuses applications pratiques en découlent, parmi lesquelles les on peut citer :

- La temporisation des relais ;
- Le chauffage progressif des filaments des tubes électroniques ;

— Le démarrage des moteurs.

1° *La temporisation des relais* : le montage du relais temporisé est donné par la figure 49.

Lorsque l'armature mobile du relais est attirée, deux contacts auxiliaires se ferment et court-circuitent la thermistance.

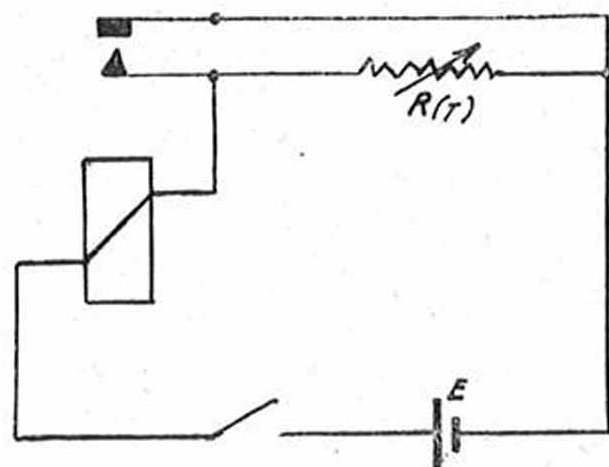


FIG. 49. — Schéma du circuit de temporisation d'un relais.

Les retards à l'attraction peuvent être compris entre une fraction de seconde et plusieurs dizaines de minutes.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

- a) Système simple, robuste et de faible prix de revient ;
- b) Lorsque le relais se ferme, la thermistance est à une température élevée. Si l'on désire recommencer

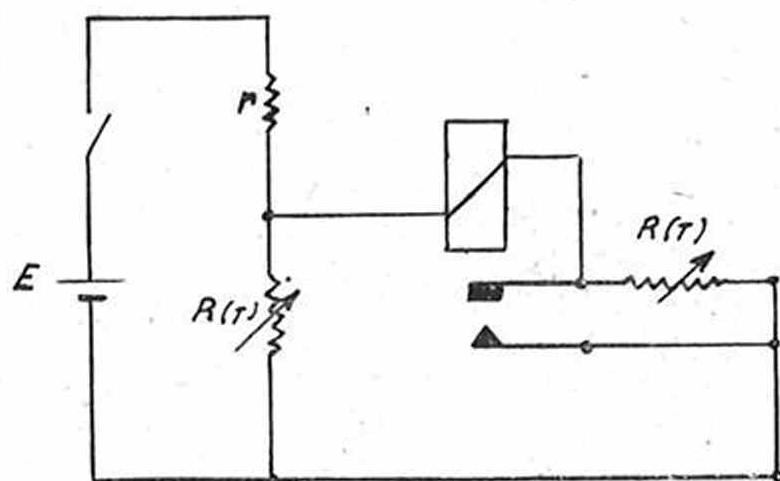


FIG. 50. — Compensation de la dérive thermique du circuit de temporisation d'un relais.

immédiatement la manœuvre de fermeture du relais, l'effet temporisateur ne se produira pas. Le temps nécessaire au refroidissement de la thermistance dépend de sa constante de temps qui varie de quelques secondes à quelques minutes :

c) Dépendance par rapport à la température ambiante. Le temps de temporisation est d'autant plus grand que la température ambiante est plus basse. Ceci peut parfois être avantageux, par exemple, dans le cas des relais temporisés utilisés dans les redresseurs munis de tubes à gaz. Si l'on désire que le temps de temporisation soit indépendant de la température ambiante, il suffit de faire varier la tension d'alimentation de manière convenable. Le schéma représenté sur la figure 50 pourra être utilisé à cet effet.

2° *Le chauffage progressif des filaments* : La mise en série d'une thermistance avec les filaments des

tubes électroniques permet d'éviter la surintensité qui se manifeste habituellement à la fermeture du circuit. Cette application des thermistances est connue depuis fort longtemps.

Alors que dans le problème de la temporisation de relais, le courant traversant la thermistance est interrompu lorsque le relais se ferme, la thermistance évolue ici jusqu'à son état d'équilibre thermique. La figure 51 indique les variations du courant tra-

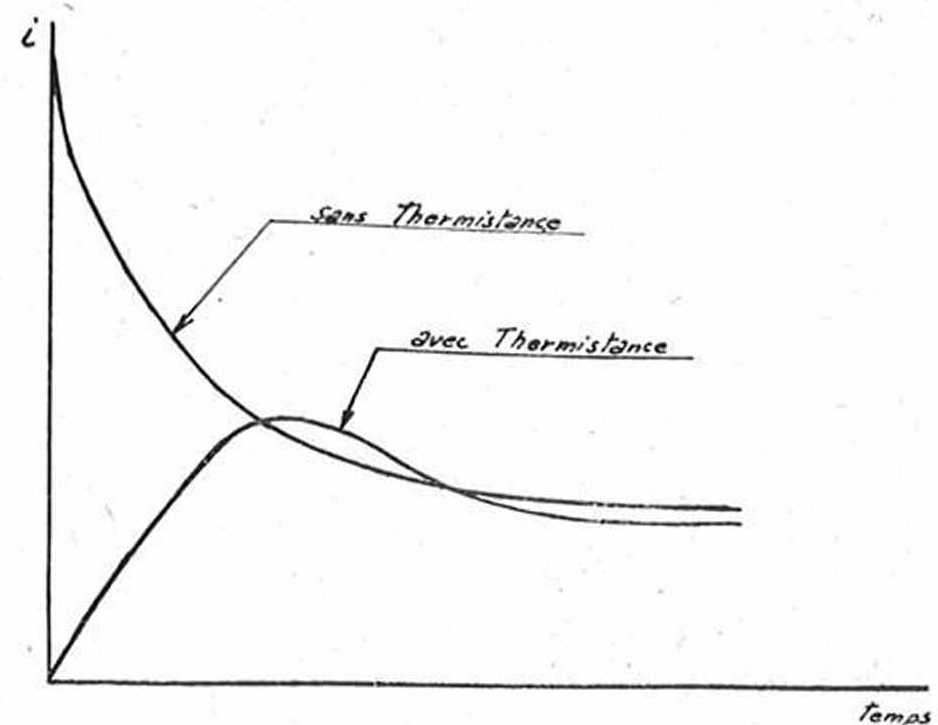


FIG. 51. — Variation du courant de chauffage des filaments des tubes électroniques avec ou sans protection par thermistance.

versant les filaments avec et sans protection par thermistances.

Les variations du temps de temporisation en fonction de la température ne sont pas habituellement compensées dans les applications courantes.

3° *Le démarrage des moteurs* : En disposant une thermistance dans le circuit d'alimentation des moteurs, on évite la surintensité qui se produit au démarrage tant que le moteur n'a pas atteint sa vitesse de régime. Le problème est, dans son principe, identique au précédent.

L'effet relais des thermistances : On a vu antérieurement que la courbe caractéristique d'équilibre tension-intensité des thermistances dépendait de la température ambiante et des conditions de dissipation. Par ailleurs, lorsqu'on insère une thermistance dans un circuit, le point de fonctionnement s'obtient en coupant la caractéristique de la dite thermistance par la droite de charge (fig. 22). On a vu également que l'équation de la droite de charge dépend de la tension d'alimentation et de la résistance fixe qu'on insère dans le circuit.

En définitive, le point de fonctionnement d'une thermistance dépend des facteurs suivants :

- 1° Tension d'alimentation ;
- 2° Résistance série ;
- 3° Température ambiante ;
- 4° Dissipation thermique de la thermistance.

Par « effet relais » on entend la possibilité de faire varier l'intensité traversant le circuit dans de grandes

proportions (par exemple, de 1 à 50) pour une variation très faible d'un des quatre facteurs précédents.

1° Effet relais en fonction de la température : Le circuit utilisé est indiqué sur la figure 52,

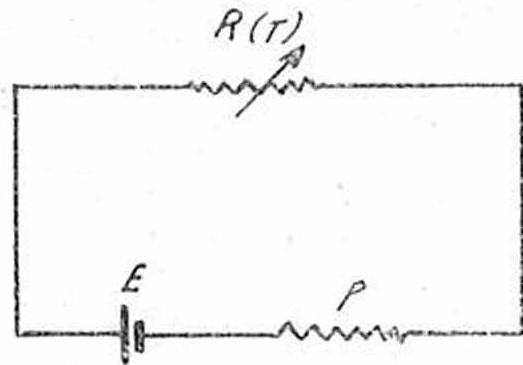


FIG. 52. — Circuit utilisé pour mettre en évidence l'effet relais des thermistances.

Si les paramètres suivants sont fixes :

- Tension d'alimentation E ;
- Résistance série ρ ;
- Coefficient de dissipation K

Le point d'équilibre dépend uniquement de la température ambiante. Sur la figure 53a a été dessiné, d'une part, le faisceau de courbes caractéristiques tension-intensité de la thermistance correspondant à diverses valeurs de la température ambiante, et d'autre part, la droite de charge correspondant aux caractéristique électriques du circuit.

Le fonctionnement du dispositif est le suivant :

Si la température ambiante est basse T_{01} , le point d'équilibre est en A_1 . L'intensité i qui traverse le circuit est faible. Si la température ambiante augmente, le point de fonctionnement se déplace et, pour la température T_{02} , vient en A_2 correspondant à l'intensité i_2 qui est également faible. La courbe caractéristique correspondant à T_{03} est tangente en A_3 à la droite de charge, le point A_3 est donc un point d'équilibre instable et, pour une très faible augmentation de température ambiante, le point de fonctionnement vient brusquement en A'_3 correspondant à une intensité i'_3 élevée. Si la température ambiante continue à croître, l'intensité croît lentement. Si la température ambiante décroît, le point de fonctionnement se déplace lentement jusqu'au point A_2 correspondant à la température T_{02} . La courbe caractéristique correspondant à T_{02} est tangente en A_2 à la droite de charge, le point A_2 est donc un point d'équilibre instable et, pour une très faible diminution de température ambiante, le point de fonctionnement vient brusquement en A'_2 correspondant à une faible intensité i'_2 . Si la température ambiante décroît à ce moment, le point d'équilibre se déplace lentement vers la gauche. Si la température ambiante croît, le point vient en A_3 et, de nouveau, saute brusquement en A'_3 , et ainsi de suite. Les variations de l'intensité en fonction de la température ambiante sont représentées sur la figure 53b.

L'allure de cette courbe justifie bien l'appellation d'« effet relais ».

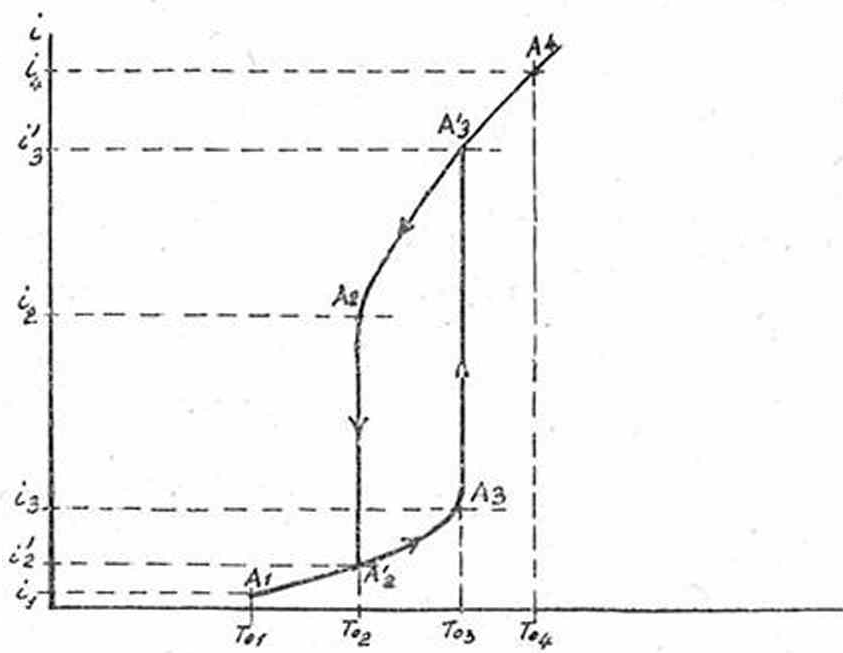
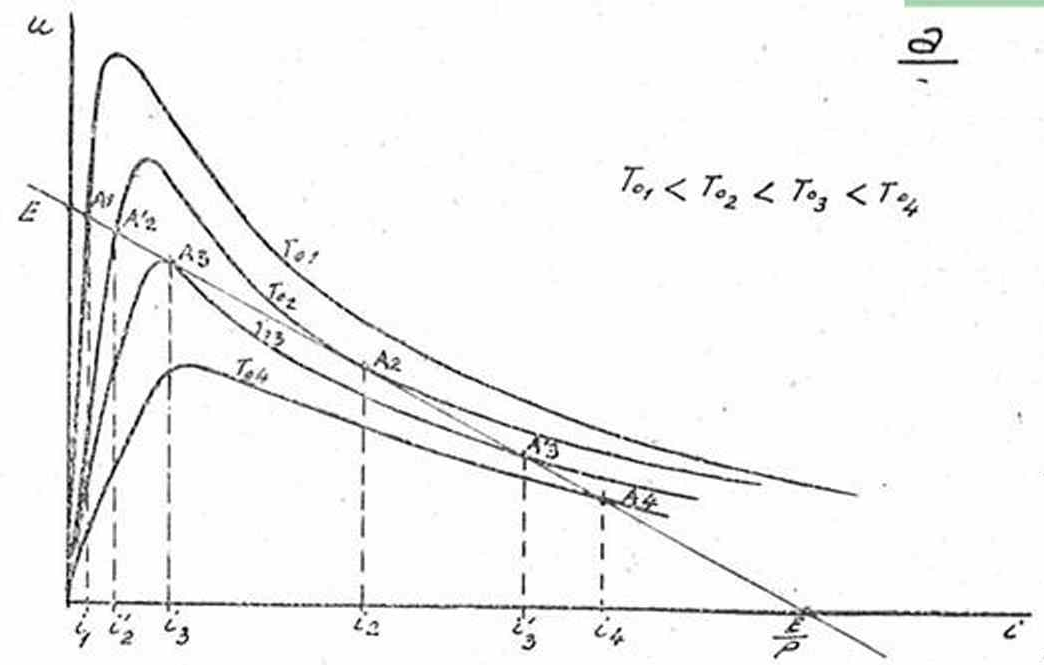


FIG. 53. — Effet relais d'une thermistance en fonction de la température ambiante.

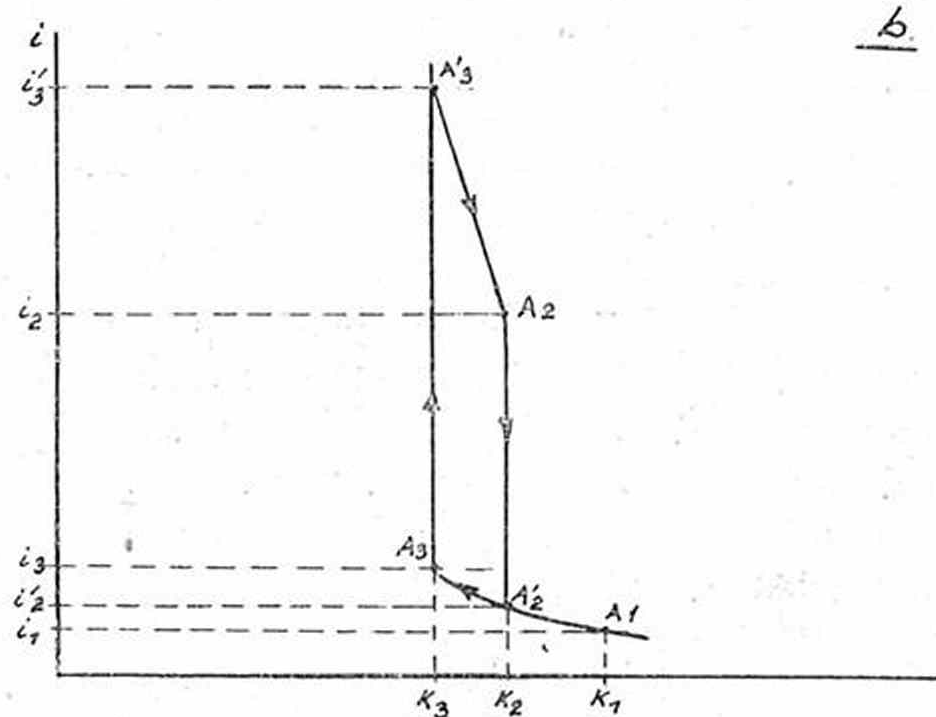
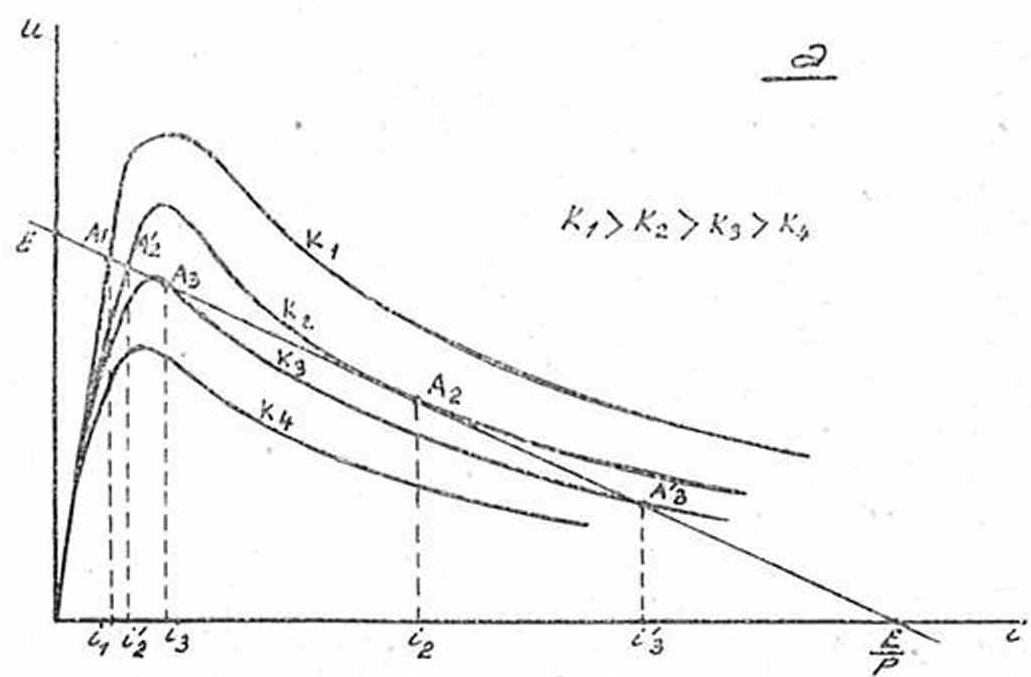


FIG. 54. — Effet relais d'une thermistance en fonction de la dissipation thermique.

2° *Effet relais en fonction de la dissipation* : Si la température ambiante, la tension et la résistance de charge sont constantes, le point d'équilibre dépend uniquement de la dissipation (par exemple, si la thermistance est placée dans un fluide isotherme, il dépend uniquement de la vitesse d'écoulement de ce fluide). Le même raisonnement que précédemment conduit aux courbes des figures 54a et 54b.

3° *Effet relais en fonction de la tension* : Si la température ambiante et le coefficient de dissipation sont constants, la caractéristique d'équilibre tension-intensité est bien déterminée. Si la résistance de charge ρ est constante et la tension E variable, la droite de charge se déplace parallèlement à elle-même, et le même raisonnement que précédemment conduit aux courbes des figures 55a et 55b.

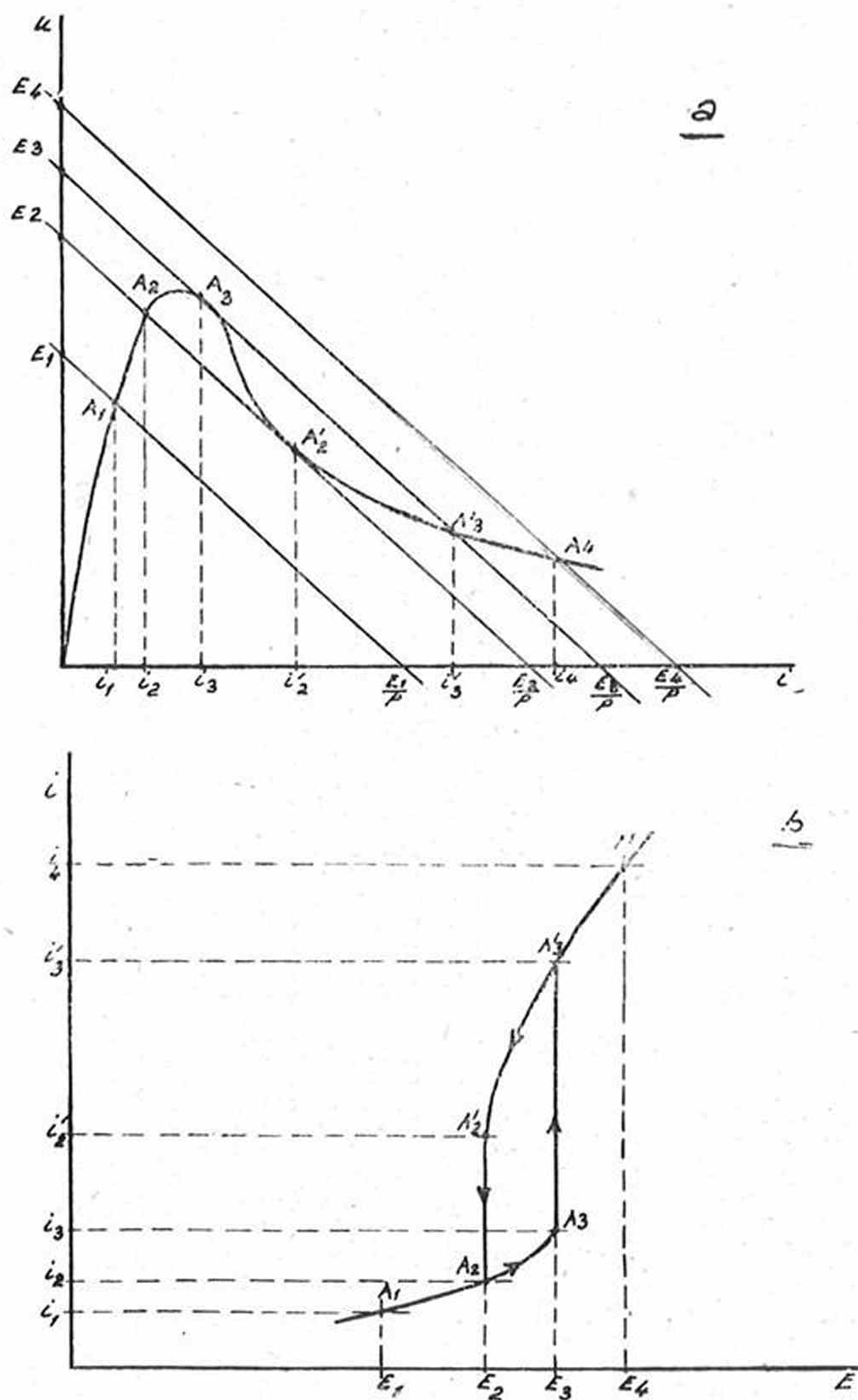


FIG. 55. — Effet relais d'une thermistance en fonction de la tension d'alimentation.

4° *Effet relais en fonction de la charge* : Si la température ambiante est fixe ainsi que la dissipation, la caractéristique d'équilibre tension-intensité est bien déterminée. Si la tension est fixe et la charge variable, la droite de charge va pivoter autour du point fixe de coordonnées ($i = 0 ; u = E$). Le même raisonnement que précédemment conduit aux courbes des figures 56a et 56b.

CONCLUSION

Cette communication était consacrée uniquement à l'exposé des propriétés et des applications des ther-

mistances. Il n'y a pas été question des importantes recherches de laboratoire qui ont permis d'é-

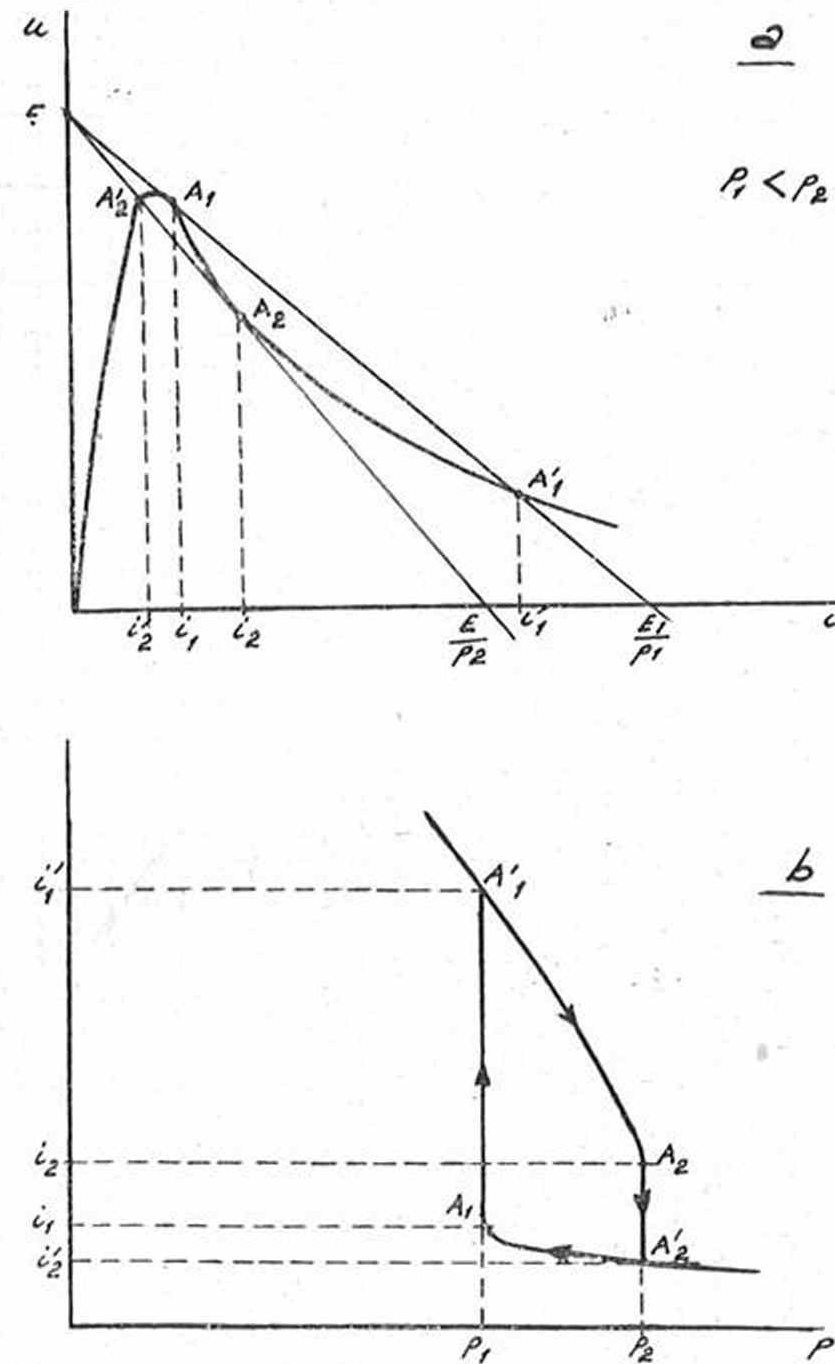


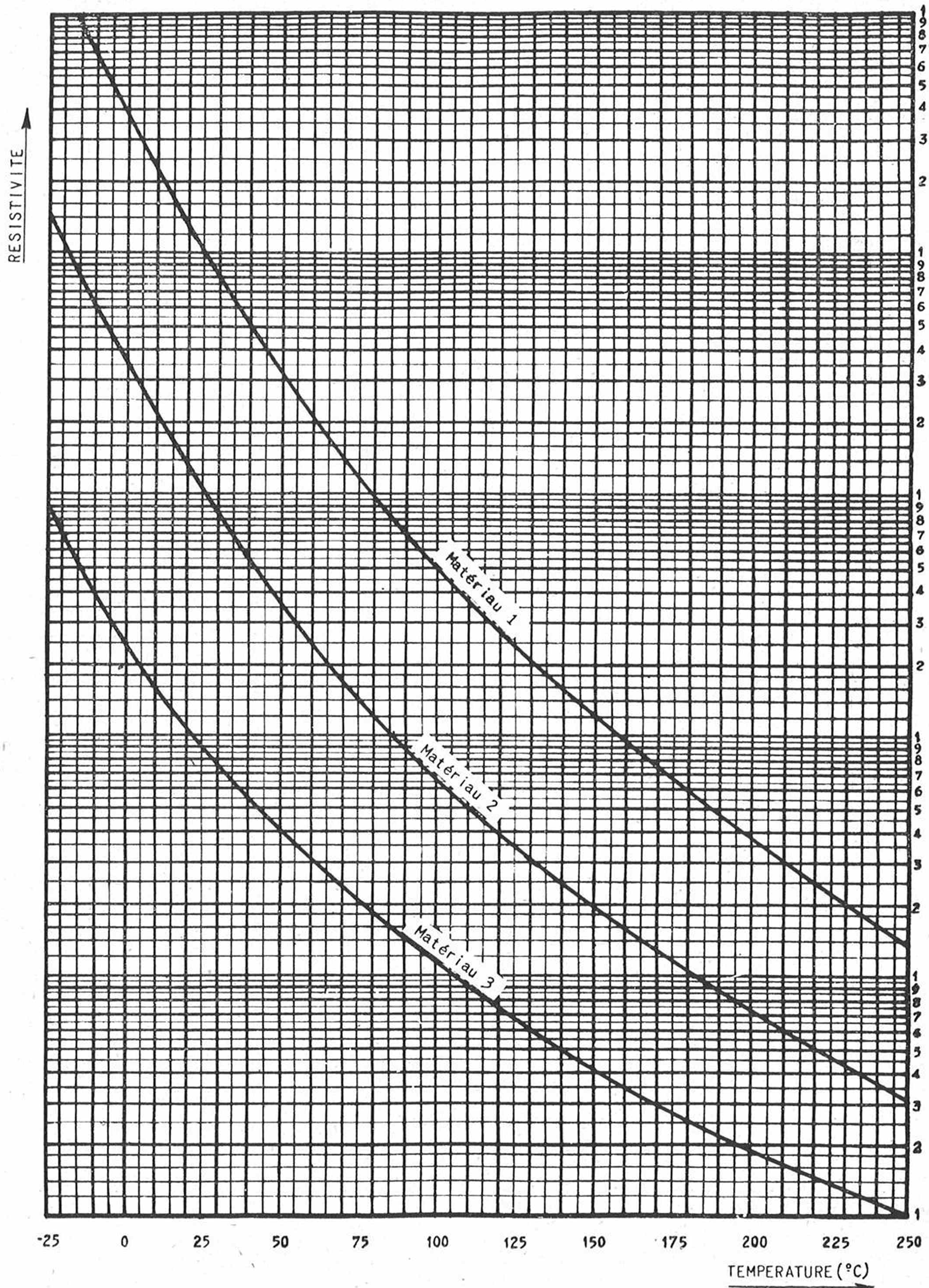
FIG. 56. — Effet relais d'une thermistance en fonction de la valeur de la résistance de charge.

laborer les matériaux semi-conducteurs qui entrent dans la fabrication des thermistances. Ces recherches très délicates, se poursuivent actuellement, parallèlement aux mises au point d'ordre technologique.

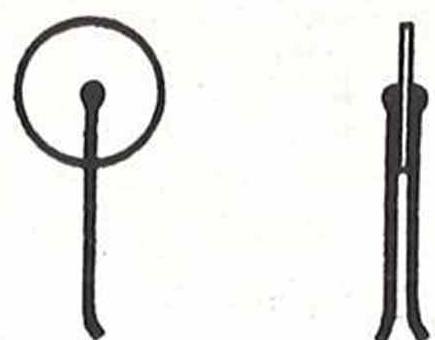
Quoiqu'étant de création récente, les thermistances ces ont déjà donné lieu à d'importantes applications. Leurs caractéristiques particulières permettent en effet de résoudre aisément certaines questions dont la solution serait, autrement, fort délicate. Nous espérons que cet exposé aura pu contribuer à mieux faire connaître les caractéristiques de ces matériels et, ainsi, à faciliter le travail des Ingénieurs et Techniciens qui doivent faire face aux problèmes multiples posés par la technique moderne.

BIBLIOGRAPHIE

- BECKER J.A. GREEN, C.B. et PEARSON, G.L. *Properties and Uses of Thermistors*. (*The Bell System Technical Journal*, Vol. XXVI, N° 1, janvier 1947).
- TESZNER, S. *Semi-conducteurs électroniques et complexes dérivés*, édité par Gauthier-Villars, à Paris (1950).
- THIEN-CHI NGUYEN et SUCHET Jacques. *Semi-conducteurs à grand coefficient de température négatif. Thermistances*. (*Annales de Radioélectricité*, t. V, N° 21, juillet 1950).
- PATCHETI G.N. *Precision A.C. Voltage Stabilizers*. (*Electronic Engineering*, septembre 1950).
- THIEN-CHI NGUYEN et SUCHET Jacques. *Etudes des semi-conducteurs aux températures élevées. Thermistances réfractaires*. (*Annales de Radioélectricité*, t. VI, N° 24, avril 1951).
- RIETHMULLER, J. *Oscillateurs sinusoidaux à limitation d'amplitude par thermistances*. (*Annales de Radioélectricité*).
- NETCHAEV. *Effet de relais des circuits comprenant des thermistances*. (*Elektrichestvo*, 1951, N° 1).



Variation relative de la résistivité des trois matériaux semi-conducteurs employés dans la fabrication des Thermistances C.I.C.E.



ECHELLE 1/1

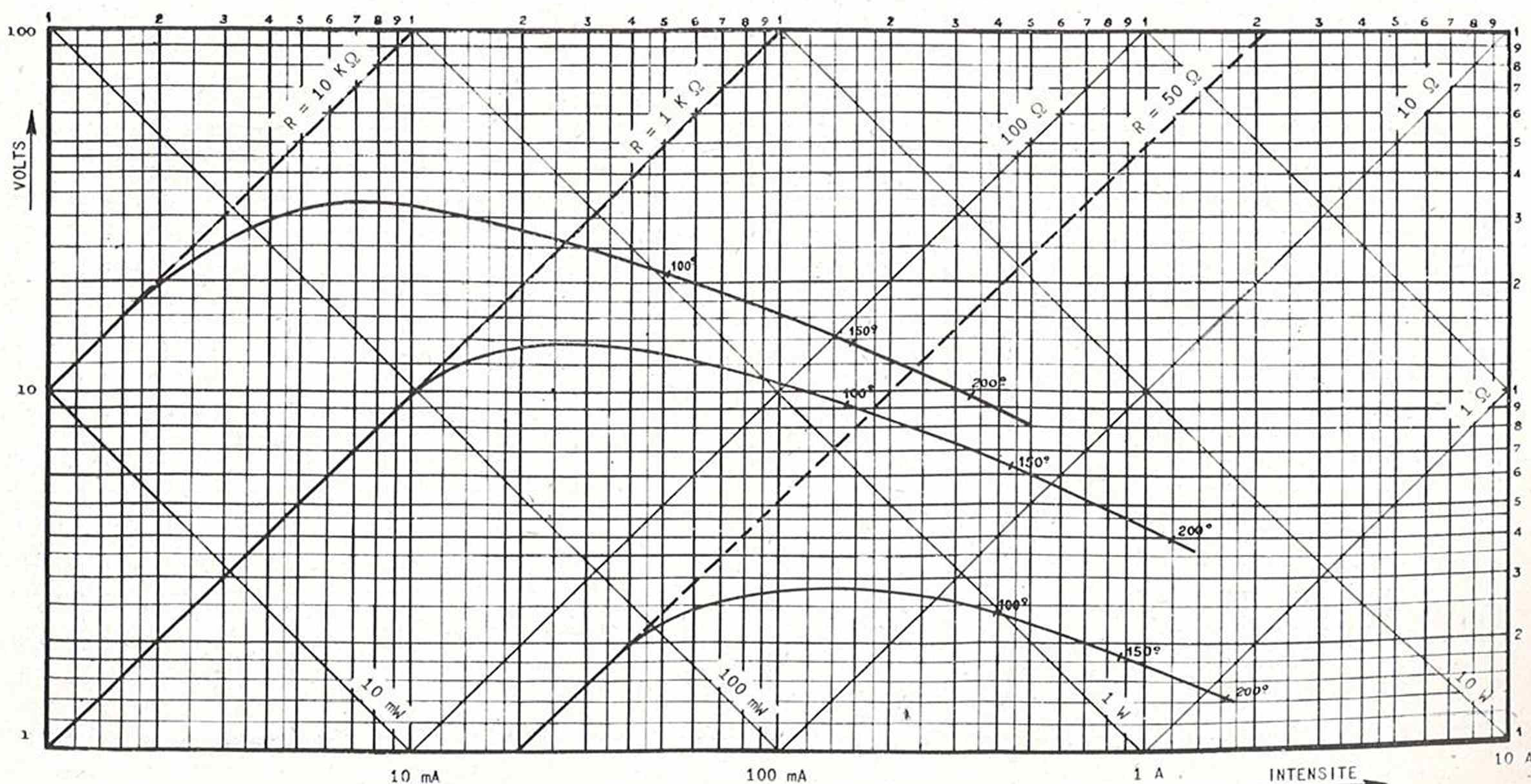
TYPE A

Pastille argentée sur ses deux faces

Poids		0,5 à 2 grammes
Dimensions	$\varnothing = 9 \text{ mm}$	ép. 0,5 à 3 mm
Tolérance standard sur R_{25}		$\pm 10 \%$
Température limite d'utilisation		150° C
Coefficient de dissipation thermique (dans l'air calme)		10 à 20 mW /° C
Sensibilité (dans l'air calme)		5 à 10 /100 °C /mW
Constante de temps (dans l'air calme)		1 à 2 min.

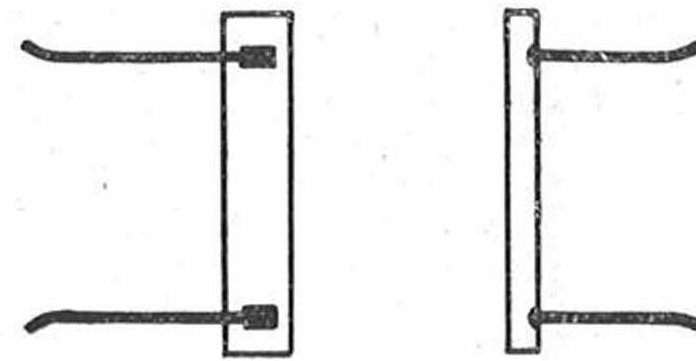
GAMME des RÉSISTANCES à 25°

Matériau 1 ($\alpha_{25} = -5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = -4,5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 3 ($\alpha_{25} = -3,6\%/^{\circ}\text{C}$)
5 à 25 KΩ 4,5 à 30 K Ω	400 à 2.000 Ω 350 à 2.500 Ω	8 à 50 Ω 10 à 54 Ω



TYPE B

Plaquette parallélépipédique

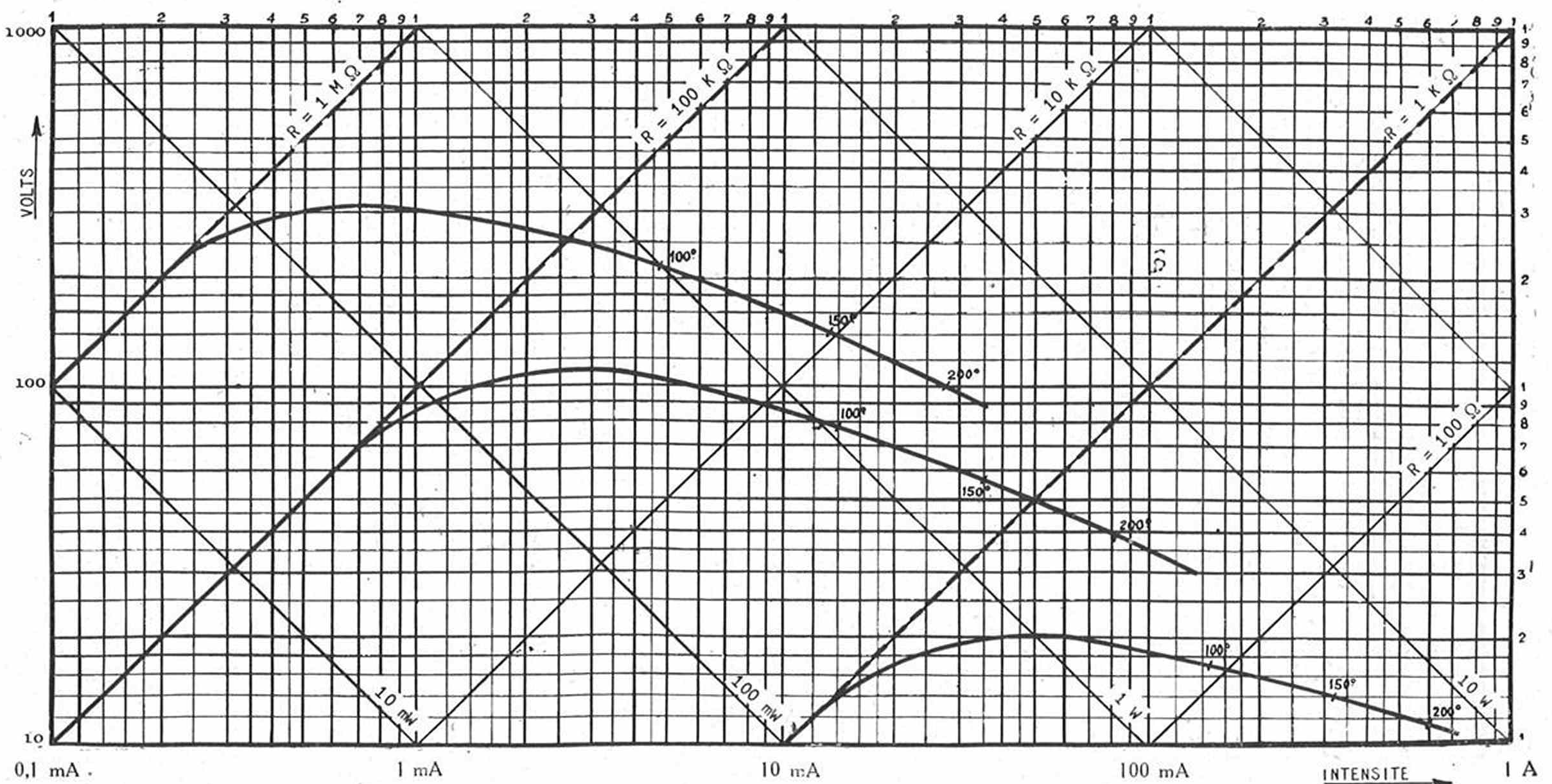


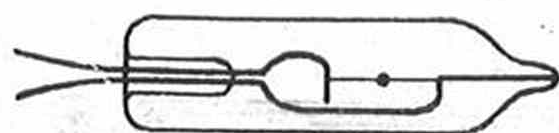
ECHELLE 1/1

Poids	1 à 2 grammes
Dimensions	1 à 2 × 5 × 27 mm
Tolérance standard sur R_{25}	± 10 %
Température limite d'utilisation	150° C
Coefficient de dissipation thermique	15 à 30 mW /° C
Sensibilité	3 à 7 /100 °C /mW
Constante de temps	1 à 2 minutes.

GAMME des RÉSISTANCES à 25°

Matériau 1 ($\alpha_{25} = - 5 \text{ \% /}^\circ \text{C}$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = - 4,5 \text{ \% /}^\circ \text{C}$)	Matériau 3 ($\alpha_{25} = - 3,6 \text{ \% /}^\circ \text{C}$)
0,5 à 1 M Ω	60 à 150 K Ω	750 à 2 500 Ω





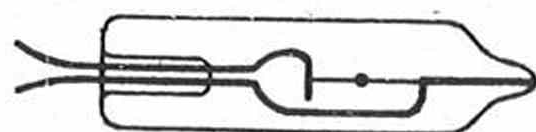
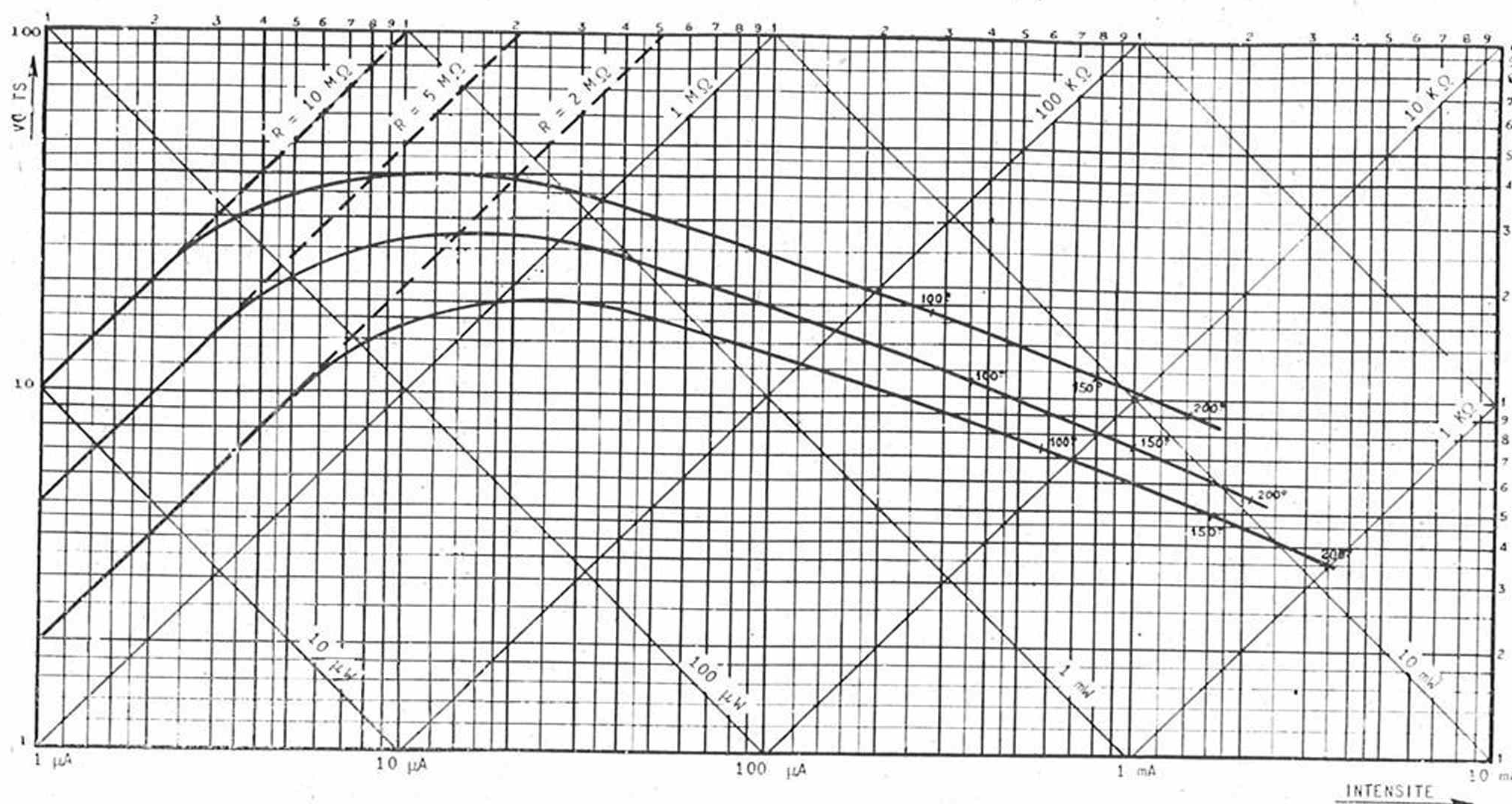
ECHELLE 1/1

TYPE CA

L'élément thermosensible est constitué par une petite sphère de diamètre inférieur à 1 mm disposée à l'intérieur d'une ampoule vidée

Matériau 1 ($\alpha_{25} = 5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = -4,5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 3 ($\alpha_{25} = -3,6\%/^{\circ}\text{C}$)
0,75 à 5 M Ω	50 à 200 K Ω	0,75 à 5 K Ω

Dimensions (verrerie) $L=30\text{mm}$ $\varnothing=8\text{mm}$
 Tolérance standard sur $R_{25} \pm 30\%$
 Coefficient de dissipation
 thermique 55 à 70 $\mu\text{W}/^{\circ}\text{C}$
 Sensibilité 15 à 20 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$
 Constante de temps 10 sec.



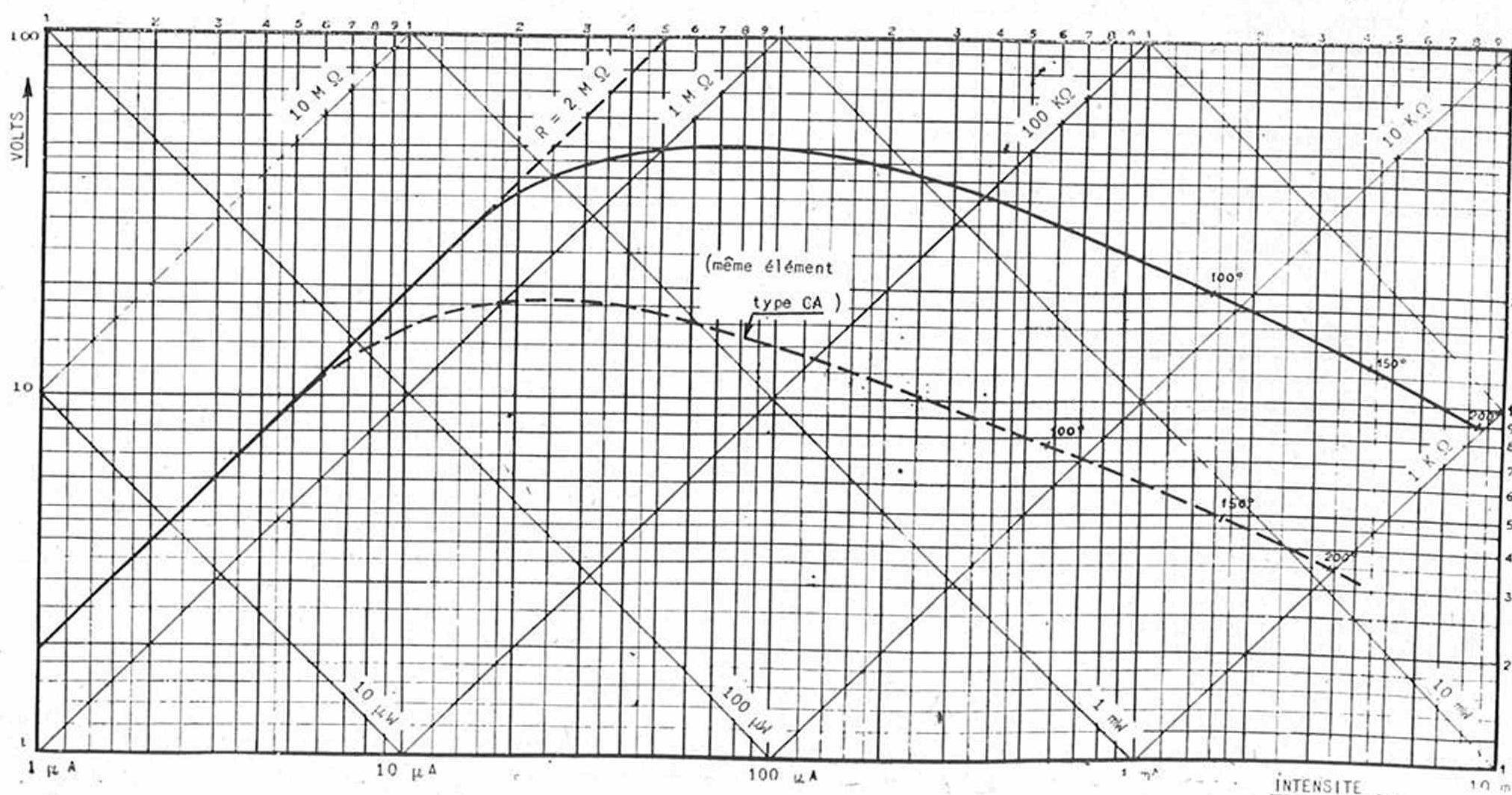
ECHELLE 1/1

TYPE CB

L'élément thermosensible est constitué par une petite sphère de diamètre inférieur à 1 mm, disposée à l'intérieur d'une ampoule remplie d'air

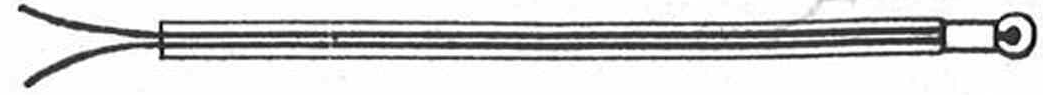
Matériau 1 ($\alpha_{25} = -5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = -4,5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 3 ($\alpha_{25} = -3,6\%/^{\circ}\text{C}$)
0,75 à 5 M Ω	50 à 200 K Ω	0,75 à 5 K Ω

Dimensions (verrerie) $L=30\text{mm}$ $\varnothing=8\text{mm}$
 Tolérance standard sur $R_{25} \pm 30\%$
 Coefficient de dissipation
 thermique 0,4 à 0,5 $\text{mW}/^{\circ}\text{C}$
 Sensibilité 2 à 2,5 $^{\circ}\text{C}/\text{mW}$
 Constante de temps 3 à 4 sec.



TYPE CS

Sonde thermométrique enrobée



ECHELLE 1/1

L'élément thermosensible est constitué par une petite sphérule de diamètre inférieure à 1 mm enrobée de verre

Dimensions

L = 65 mm Ø = 3 mm

Tolérance standard sur R₂₅

± 30 %

Température limite d'utilisation

300° C

Coefficient de dissipation thermique

1,5 à 2 mW / ° C

Sensibilité

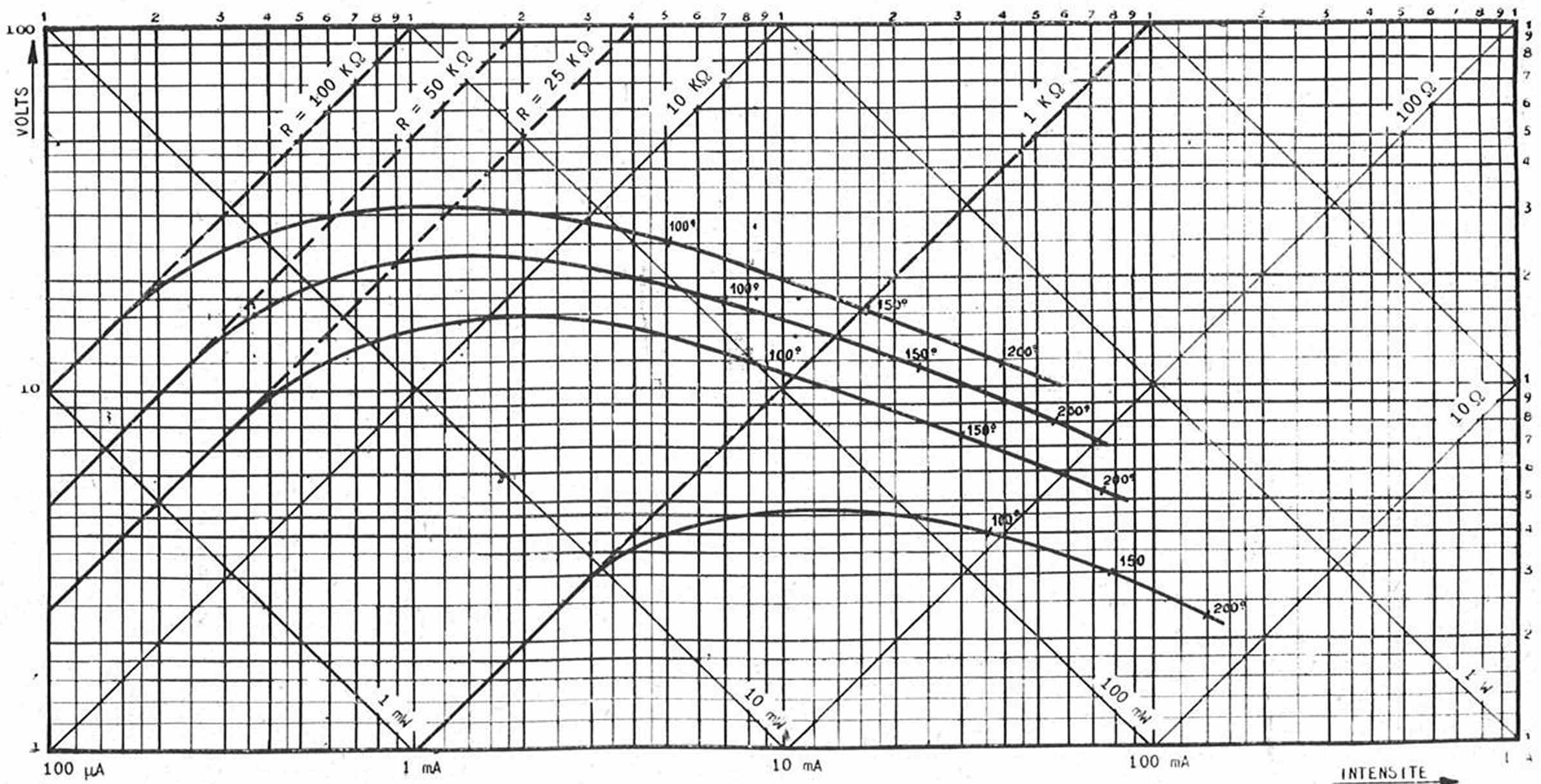
5 à 7 / 10° C / mW

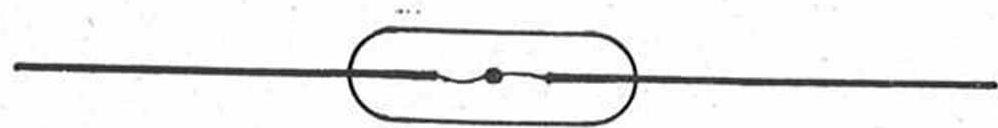
Constante de temps

30 sec.

GAMME DES RÉSISTANCES A 25°

Matériau 1	Matériau 2	Matériau 3
($\alpha_{25} = - 5 \text{ ‰} / ^\circ \text{C}$)	($\alpha_{25} = - 4,5 \text{ ‰} / ^\circ \text{C}$)	($\alpha_{25} = - 3,6 \text{ ‰} / ^\circ \text{C}$)
0,75 à 5 M Ω	30 à 200 — K Ω	0,75 à 5 K Ω





ECHELLE 2/1

TYPE C W

Wattmètre spécialement destiné aux mesures de puissance HF et UHF (10 000 MHz). L'élément thermosensible est constitué par une petite sphère de diamètre inférieur à 1 mm, disposée dans une ampoule remplie d'air.

Dimensions

L = 10 mm Ø 3 mm

Tolérance standard sur R₂₅

± 10 %

Coefficient de dissipation thermique

0,5 à 1 mW / ° C

Sensibilité

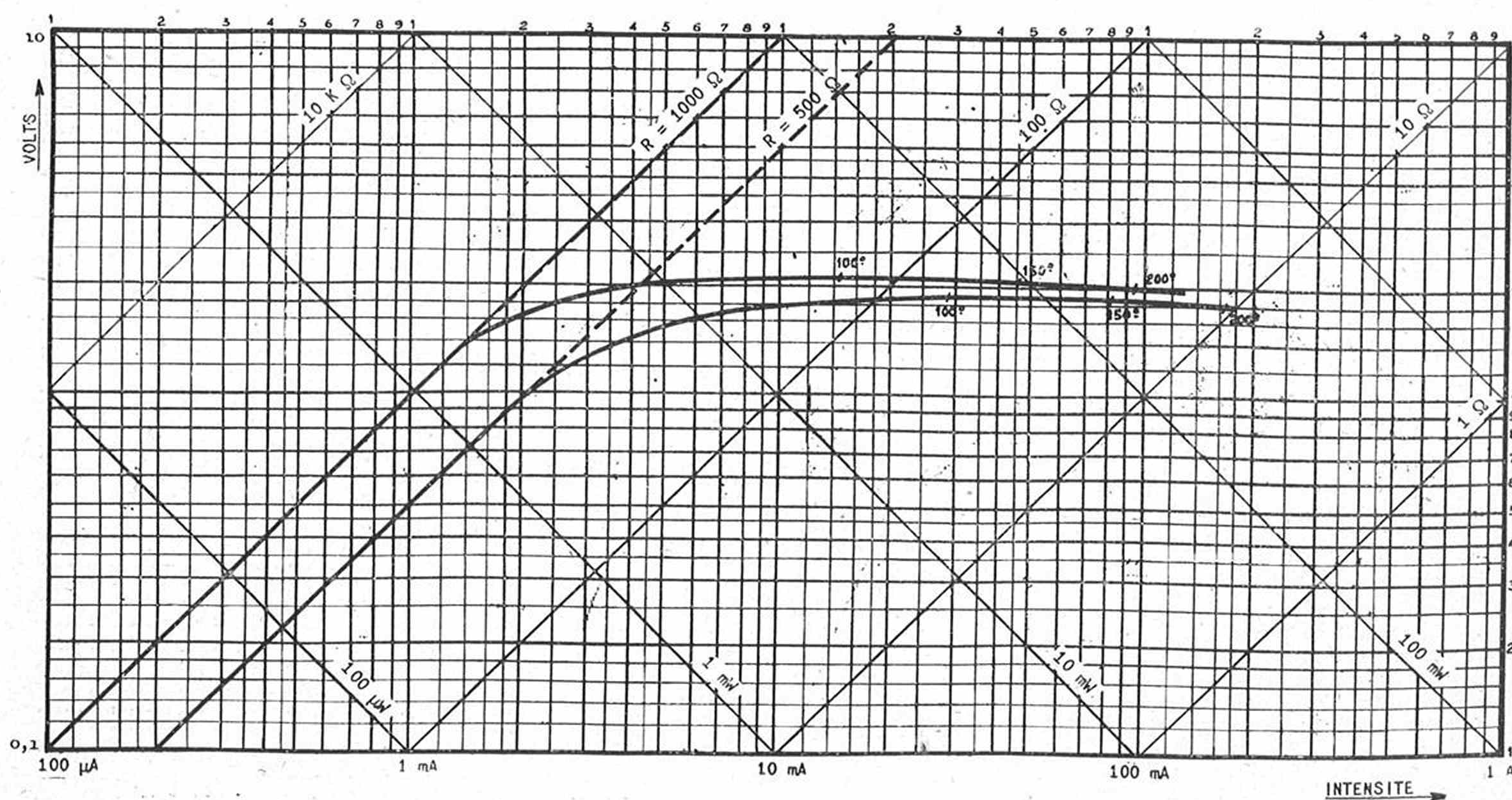
1 à 2 ° C / mW

Constante de temps

10 sec.

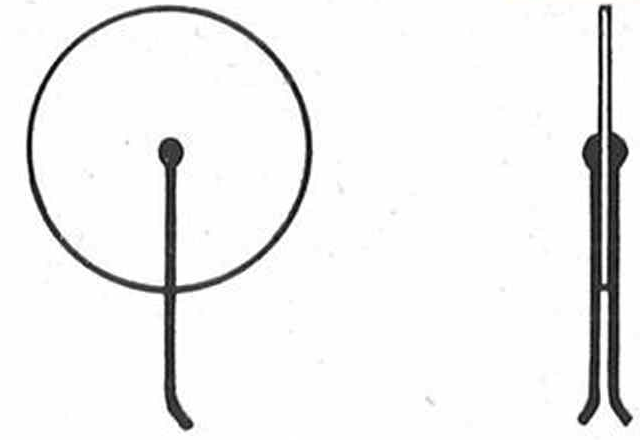
GAMME DES RÉSISTANCES A 25°

Matériau 3 ($\alpha_{25} = - 3,6\% / ^\circ C$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = - 4,5\% / ^\circ C$)
500 à 2 500 Ω	30 à 150 K Ω



TYPE D

Disque argenté sur ses deux faces



ECHELLE 1/1

Poids

quelques grammes

Dimensions

$\varnothing = 22$ mm ép. 1 à 3 mm

Tolérance standard sur R_{25}^*

$\pm 10\%$

Température limite d'utilisation

150° C

Coefficient de dissipation thermique

20 à 40 mW / ° C

Sensibilité

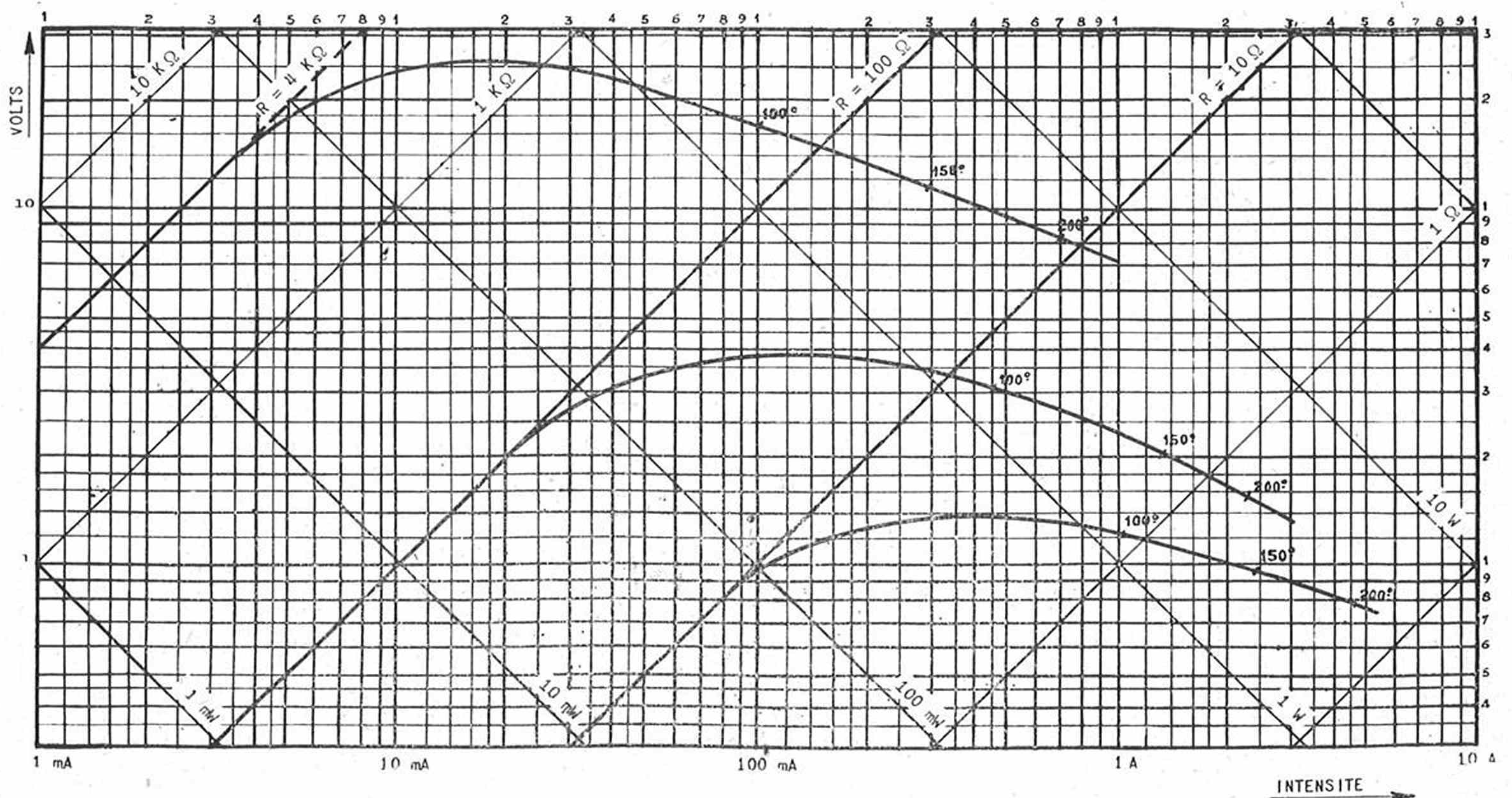
2,5 à 5 / 100 °C / mW

Constante de temps

1 à 5 minutes

GAMME DES RÉSISTANCES A 25°

Matériau 1 ($\alpha_{25} = -5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = -4,5\%/^{\circ}\text{C}$)	Matériau 3 ($\alpha_{25} = -3,6\%/^{\circ}\text{C}$)
750 à 2500 Ω	80 à 350 Ω	1,5 à 10 Ω





ECHELLE 2/1

Type G

Pastille argentée sur ses deux faces

Poids	0,1 gramme
Dimensions	$\varnothing = 4 \text{ mm}$ ép. 0,5 à 2 mm
Tolérance standard sur R_{25}	$\pm 10 \%$
Température limite d'utilisation	150° C
Coefficient de dissipation thermique	3 à 5 mW/° C
Sensibilité	0,2 à 0,3° C/mW
Constante de temps	20 secondes

GAMME DES RÉSISTANCES A 25°

Matériau 1 ($\alpha_{25} = - 5\% / ^\circ \text{C}$)	Matériau 2 ($\alpha_{25} = - 4,5\% / ^\circ \text{C}$)	Matériau 3 ($\alpha_{25} = - 3,6\% / ^\circ \text{C}$)
20 à 40 K Ω	1 à 3 K Ω	10 à 60 Ω

