Mesure de température de surface par contact en régime variable

B. Cassagne, G. Leroy

► To cite this version:

B. Cassagne, G. Leroy. Mesure de température de surface par contact en régime variable. Revue de Physique Appliquée, 1982, 17 (4), pp.153-161. 10.1051/rphysap:01982001704015300 . jpa-00244985

HAL Id: jpa-00244985

<https://hal.science/jpa-00244985>

Submitted on 1 Jan 1982

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

07.20Dt — 44.10. + i — 44.30. + v

Mesure de température de surface par contact en régime variable

B. Cassagne et G. Leroy

Laboratoire de Thermocinétique ERA C.N.R.S. 663, Institut de Physique, Université de Nantes
2, rue de la Houssinière, 44072 Nantes Cedex, France

(Reçu le 23 novembre 1981, révisé le 24 décembre 1981, accepté le 19 janvier 1982)

Résumé. — On présente une étude à la fois théorique et expérimentale de la mesure de température de surface par contact en régime variable. Cette étude montre clairement l'influence des caractéristiques thermiques et géométriques du milieu et du capteur thermométrique sur l'erreur de mesure et sur le temps de réponse. Elle souligne également le rôle primordial dans le cas d'un milieu conducteur des conditions de contact thermomètre-milieu. Enfin elle montre que l'expression utilisée pour le calcul de l'erreur en régime permanent est valable en régime variable sauf au tout début du phénomène.

Abstract. — We present a theoretical and experimental study of the surface temperature measurement by direct contact in a transient regime. This study unambiguously shows the influence of the thermal and geometrical properties of the medium and the thermometric sensor, on the measurement error and the response time. It is also shown that for a conductive medium the contact conditions between the thermometric sensor and the medium have a major influence. Finally, this study indicates that the expression used for the evaluation of the error in permanent regime is still valid in the transient regime except for the beginning of the phenomenon.

1. **Introduction.** — La mesure correcte d'une température de surface par contact est une opération délicate, surtout en régime variable. Cette mesure est sujette à de nombreuses erreurs en particulier celles liées aux transferts de chaleur parasites milieu-capteur thermométrique-environnement [1-17]. En effet les échanges superficiels qui se produisaient à la surface du solide sont modifiés par l'application du capteur et il en résulte à l'endroit même de la mesure une perturbation locale du champ de température donc une erreur de mesure. En régime permanent la notion de résistance thermique permet d'étudier de manière simple cette perturbation [11-16]. Par contre en régime variable la notion de résistance thermique n'a à priori plus aucun sens et doit être abandonnée. L'étude des erreurs nécessite alors la résolution de problèmes de transferts thermiques complexes.

Pour avoir une idée assez claire de l'influence des caractéristiques thermiques et géométriques du milieu et du thermomètre, et souligner le rôle des conditions de contact thermomètre-milieu, on présente ici une étude théorique et expérimentale de la mesure d'une température de surface par contact en régime variable. Cette étude est faite à partir d'un modèle schématique mais significatif, le capteur préalablement appliqué sur une face du milieu suivant l'évolution transitoire dont le milieu est le siège.

2. **Etude théorique.** — 2.1 DESCRIPTION DU MODÈLE CHOISI (Fig. 1). — On assimile le corps dont on veut mesurer la température de surface à un mur fini d'épaisseur L , de caractéristiques thermophysiques λ et $c\rho$. On suppose que ce milieu est limité d'un côté par une surface plane et adiabatique, la température de l'environnement étant T_E . Le capteur thermométrique est assimilé à une barre homogène équivalente, semi-infinie, de rayon y_B , de caractéristiques thermophysiques λ_B et $c_B \rho_B$, échangeant de la chaleur par convection et rayonnement avec l'environnement par sa surface latérale, le coefficient global d'échange barre-environnement étant h . L'élément sensible du capteur thermométrique que nous supposons infiniment mince est en contact imparfait (résistance de

Fig. 1. — Description du modèle choisi.

[Description of the chosen model.]

contact R_c par unité de surface) avec la face plane selon un cercle de rayon y_B . Les répartitions initiales de température dans le milieu et le capteur thermométrique sont identiques et égales à T_E . A l'instant initial, la face $x = L$ est portée à la température T_L constante. On se propose de calculer l'erreur de mesure en régime variable en tenant compte de l'imperfection du contact thermomètre-milieu.

2.2 CALCUL DE L'ERREUR DE MESURE. — Un phénomène transitoire se développe dans le mur de la face $x = L$ vers la face $x = 0$. Au bout d'un temps suffisamment long, on atteint un nouveau régime permanent. La température dans le mur est alors uniforme et égale à T_L sauf au voisinage du capteur où le champ de température est perturbé. La température de la face $x = 0$ qu'il s'agit de mesurer évolue donc de T_E à T_L . On désigne par $T(t)$ cette température qui est en fait celle qu'il y aurait à l'instant t sur la face $x = 0$ en l'absence du capteur thermométrique. On désigne par $T_M(t)$ la température mesurée par le capteur.

L'erreur absolue de mesure est alors

$$E_a(t) = T(t) - T_M(t)$$

et l'erreur relative

$$E_r(t) = \frac{T(t) - T_M(t)}{T(t) - T_E}.$$

Le calcul a été effectué en utilisant d'une part la théorie des sources de chaleur, d'autre part la transformée de Laplace [18, 19]. On donne à titre d'exemple les résultats des calculs effectués pour deux milieux :

— un conducteur $\lambda = 100 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $c\rho = 3,1 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ dont l'épaisseur est $L = 5,5 \times 10^{-2} \text{ m}$

— un isolant $\lambda = 0,19 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $c\rho = 1,7 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ dont l'épaisseur est $L = 10^{-2} \text{ m}$.

Les caractéristiques de la barre thermométrique sont les suivantes :

$$\lambda_B = 17 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad c_B \rho_B = 3,4 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

On considère deux valeurs du rayon y_B de la barre thermométrique $y_B = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ et $y_B = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ et pour chaque valeur du rayon y_B , trois valeurs du rapport R_c/y_B qui caractérise la qualité du contact thermomètre-milieu :

$$\frac{R_c}{y_B} = 0 - 0,20 - 1 \text{ KmW}^{-1}.$$

Le coefficient d'échange h est donné par la relation :

$$hy_B = 5 \times 10^{-3} + 5 y_B.$$

Les évolutions des températures exactes $T(t)$ et des températures mesurées $T_M(t)$ sont données sur les figures 2 et 3. L'erreur absolue $E_a(t)$ est donnée sur les figures 4 et 5. On constate sur ces figures :

— que l'erreur absolue de mesure est croissante

Fig. 2. — Evolutions des températures exactes $T(t)$ et des températures mesurées $T_M(t)$ pour le conducteur.

[Evolutions of the exact temperatures $T(t)$ and the measured temperatures $T_M(t)$ for the conductor.]

Fig. 3. — Evolutions des températures exactes $T(t)$ et des températures mesurées $T_M(t)$ par l'isolant.

[Evolutions of the exact temperatures $T(t)$ and the measured temperatures $T_M(t)$ for the insulator.]

Fig. 4. — Evolution de l'erreur absolue $E_a(t)$ pour le conducteur.

[Evolution of the absolute error $E_a(t)$ for the conductor.]

Fig. 5. — Evolution de l'erreur absolue $E_a(t)$ pour l'isolant.

[Evolution of the absolute error $E_a(t)$ for the insulator.]

avec le temps, le maximum de cette erreur se produisant en régime permanent ;

— que l'erreur absolue de mesure pour un milieu isolant est dans tous les cas supérieure à celle obtenue pour un milieu conducteur ;

— que les conditions de contact jouent un rôle très important sur l'erreur absolue de mesure. Lorsque le contact est parfait, l'erreur commise sur un conducteur est très inférieure à celle commise sur un isolant. Dès que le contact est imparfait, l'erreur absolue devient plus importante, quelle que soit la nature du corps à mesurer, et augmente avec l'imperfection du contact. Cependant des différences fondamentales apparaissent entre les mesures sur milieux conducteurs et sur milieux isolants.

• Pour un milieu isolant, l'erreur absolue, qui était déjà très importante avec un contact parfait, n'augmente que faiblement avec l'imperfection du contact de (0,65 à 0,70 et de 0,69 à 0,73) ; cette erreur dépend donc relativement peu de la résistance de contact mais principalement de la convergence des lignes de flux vers le capteur.

• Pour un milieu conducteur par contre, l'erreur commise dépend essentiellement de la résistance thermique de contact, l'erreur absolue croissant d'autant plus vite que le contact est imparfait (de 0,004 à 0,299 et de 0,004 à 0,337).

— Enfin que le rayon y_B de la barre a un rôle également important. En effet quels que soient les corps considérés et la résistance de contact R_c , l'erreur absolue de mesure augmente avec le rayon y_B .

Sur les figures 6 et 7 nous avons représenté l'évolution de l'erreur relative $E_r(t)$.

On constate que l'erreur relative décroît au cours du temps et tend asymptotiquement vers l'erreur relative en régime permanent.

Mais une différence fondamentale apparaît sur la valeur de l'erreur relative $E_r(0)$ à l'instant initial $t = 0$, suivant que le contact est parfait ou imparfait :

— lorsque le contact est parfait ($R_c = 0$) un développement limité de $E_r(t)$ au voisinage de $t = 0$ montre que $E_r(0)$ ne dépend que des effusivités du milieu et de la barre :

$$E_r(0) = \frac{\sqrt{\lambda_B c_B \rho_B}}{\sqrt{\lambda c \rho} + \sqrt{\lambda_B c_B \rho_B}}$$

ce qui est un résultat classique de thermocinétique [18]

— lorsque le contact est imparfait ($R_c \neq 0$) ce développement limité montre que $E_r(0)$ vaut 1 quels que soient la nature du milieu, l'imperfection du contact, et le diamètre de la barre thermométrique.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le contact imparfait entre le milieu et la barre thermométrique joue un rôle de « tampon » entre eux dans les premiers instants. La température vraie $T(t)$ s'est déjà élevée, tandis que la température mesurée $T_M(t)$ reste encore égale à T_E ceci à cause du contact imparfait, d'où $E_r(0) = 1$.

Fig. 6. — Evolution de l'erreur relative $E_r(t)$ pour le conducteur.

[Evolution of the relative error $E_r(t)$ for the conductor.]

Fig. 7. — Evolution de l'erreur relative $E_r(t)$ pour l'isolant.

[Evolution of the relative error $E_r(t)$ for the insulator.]

Enfin les évolutions de l'erreur relative $E_r(t)$ en fonction des conditions de contact, du rayon et de la nature du milieu sont semblables à celles trouvées pour l'erreur absolue.

2.3 VALIDITÉ EN RÉGIME VARIABLE DE L'EXPRESSION DE L'ERREUR RELATIVE ÉTABLIE POUR LE RÉGIME PERMANENT. — En régime permanent ($t \rightarrow \infty$) l'erreur relative $E_r(t)$ est indépendante du temps et égale à

$$E_r(\infty) \text{ soit } E_r(\infty) = \frac{T(\infty) - T_M(\infty)}{T(\infty) - T_E}, E_r(\infty) \text{ est donc}$$

née par un calcul simple de résistances thermiques [11, 12]. Or les courbes donnant l'évolution de l'erreur relative $E_r(t)$ en régime variable (Fig. 6 et 7) montrent que celle-ci varie énormément dans les tous premiers instants mais que rapidement elle devient constante et égale à celle trouvée en régime permanent $E_r(\infty)$. Par contre les températures exactes $T(t)$ et mesurées $T_M(t)$ continuent à évoluer de façon notable pendant un temps beaucoup plus long. Ceci montre que l'erreur relative $E_r(t)$ est constante avant l'obtention du régime permanent.

Pour chiffrer ce résultat nous avons introduit un temps de réponse t_r correspondant à une erreur relative constante à 5 % près et défini par la relation :

$$\frac{E_r(t_r) - E_r(\infty)}{E_r(0) - E_r(\infty)} = 0,05.$$

Le tableau I suivant donne les différentes valeurs de ces temps de réponse t_r pour les deux exemples considérés.

Tableau I

Valeurs de $\frac{R_c}{y_B} \text{ KmW}^{-1}$		0	0,20	1
Conducteur	$y_B = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$	1,2 s	4,7 s	9,2 s
	$y_B = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$	9,2 s	46 s	98 s
Isolant	$y_B = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$	106 s	110 s	116 s
	$y_B = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$	377 s	381 s	384 s

On constate d'abord que pour un même corps le temps de réponse t_r est d'autant plus grand que le rayon de la barre y_B est grand. De plus ce temps de réponse croît très rapidement avec R_c dans le cas conducteur, alors qu'il varie très peu pour l'isolant. Ceci montre l'influence prédominante dans le cas de milieux isolants de l'effet de convergence des lignes de flux vers le capteur sur l'effet de résistance de contact. Par contre pour des milieux conducteurs le temps de réponse dépend essentiellement de la résistance de contact R_c .

Il est enfin intéressant de comparer ces temps de réponse calculés pour l'erreur relative à la durée t_0 du régime variable étudié $T(t)$, cette durée t_0 étant définie par la même relation :

$$\frac{T(\infty) - T(t_0)}{T(\infty) - T(0)} = 0,05.$$

Soit pour le conducteur $t_0 = 123 \text{ s}$ et pour l'isolant $t_0 = 1170 \text{ s}$.

On constate donc que les temps de réponse t_r correspondant à une erreur relative constante à 5 %

près sont dans tous les cas inférieurs, et souvent de beaucoup à la durée t_0 du phénomène thermique étudié. Ceci montre quantitativement que l'expression de l'erreur relative établie pour le régime permanent peut donner de très bons résultats en régime variable à condition de considérer des temps supérieurs à t_r . Pour $t > t_r$ on a

$$\frac{T(t) - T_M(t)}{T(t) - T_E} = E_r(\infty) = \text{Cte.}$$

3. Etude expérimentale. — Une étude expérimentale a été entreprise pour confirmer les résultats théoriques précédents et tester divers capteurs. On décrit tout d'abord la méthode expérimentale et le dispositif correspondant puis on présente les premiers résultats obtenus pour un milieu conducteur analogue à celui de l'étude théorique.

3.1 MÉTHODE EXPÉRIMENTALE. — Elle consiste à comparer l'évolution dans le temps de la température exacte d'une surface étalon d'un milieu solide en

l'absence de toute sonde thermométrique avec celle mesurée directement au moyen d'un capteur en contact avec celle-ci. La température exacte est déterminée indirectement à partir de l'extrapolation du champ de température sous-jacent à cette surface. Cette extrapolation est facilitée si le phénomène thermique est unidimensionnel et se propage de l'intérieur du milieu vers la surface. On a donc choisi de réaliser le modèle du mur initialement isotherme subissant une variation de température connue sur l'une de ses faces, l'autre face, dont on mesure la température, étant thermiquement isolée. La température exacte de la surface est alors déterminée en résolvant l'équation indéfinie de la chaleur, associée aux conditions aux limites définies ci-dessus.

3.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL. — Le dispositif expérimental global est représenté sur la figure 8. Sa conception et sa réalisation ont fait l'objet de beaucoup d'attention. Le modèle du mur (paroi étalon), le dispositif thermométrique de surface et une cavité simulant l'environnement sont placés dans une enceinte dans

Fig. 8. — Schéma synoptique du dispositif expérimental.

[Synoptic scheme of the experimental device.]

laquelle règne un vide de l'ordre de 10^{-2} torrs supprimant toute forme importante de convection (Fig. 9).

Le mur est constitué par un cylindre en laiton ($L = 55 \text{ mm}$ $\varnothing = 36 \text{ mm}$). Le laiton a été choisi car des mesures soignées effectuées au laboratoire ont permis de connaître ses caractéristiques thermophysiques λ et c_p de manière précise (1 %) ainsi que leurs lois de variation avec la température $\lambda(T)$ et $c_p(T)$ [20].

Fig. 9. — Enceinte simulant l'environnement.

[Environmental simulation vessel.]

L'une de ses faces peut être soumise à une brusque variation de température par l'intermédiaire d'une boîte à eau B_1 avec laquelle elle est en bon contact thermique. L'autre face est parfaitement polie et un écran anti-rayonnant isole la surface latérale. Dans ces conditions l'hypothèse du mur à face arrière isolée est satisfaite. Cinq thermocouples chromel-alumel émaillés ($\varnothing = 8/100 \text{ mm}$), numérotés de 1 à 5, sont implantés dans le cylindre selon son axe et permettent

de relever le champ de température. Afin de minimiser les risques d'erreur relatifs à un mauvais positionnement des thermocouples, à un mauvais contact thermique ou à des fuites de chaleur parasites le long des fils, le cylindre a été coupé suivant son plan axial (Fig. 10). Les thermocouples pénètrent par des trous radiaux à l'intérieur d'un demi-cylindre et sont soudés à l'étain sur son axe. Ils sont ainsi placés selon des plans isothermes. En dehors de leur jonction les fils sont isolés électriquement et en bon contact thermique avec le cylindre grâce à une colle bonne conductrice thermique. La position des thermocouples a été relevée avec une précision supérieure à $2/100 \text{ mm}$ au moyen d'une lunette à visée. Les deux parties du cylindre ont alors été recollées au moyen de la même colle conductrice. Le plan de coupe étant parallèle à la direction du flux de chaleur, il ne perturbe pas la distribution monodimensionnelle de la température. Enfin l'étalonnage des thermocouples a été effectué de manière très précise.

Le capteur thermométrique à tester est soit soudé, maté, collé, ou appuyé sur la surface. Ses fils de liaison avec l'extérieur sont tendus selon l'axe d'une cavité cylindrique en cuivre qui joue le rôle d'enceinte extérieure et avec les parois de laquelle s'effectuent les échanges. Pour cela la cavité est noircie intérieurement, polie à l'extérieur et maintenue à un niveau de température constant T_E à l'aide d'une boîte à eau B_2 . Elle est placée dans l'axe du cylindre et juxtaposée à la face isolée. La température et le coefficient d'échange équivalents T_E et h sont alors parfaitement définis et stabilisés (Fig. 9).

Les soudures froides des thermocouples sont réunies dans une boîte de grande inertie thermique maintenue à température constante T_E . Un microvoltmètre numérique permet de faire les mesures en régime permanent. En régime variable, l'acquisition des données se fait sur un enregistreur à mémoire. Les signaux délivrés par deux des thermocouples sont d'abord traités par deux amplificateurs différentiels flottants d'impédance d'entrée $5 \text{ M}\Omega$ et d'impédance de sortie $0,5 \Omega$. Cinq choix de bandes passantes sont possibles allant de 10 Hz à 100 kHz , et le gain peut varier de manière continue de 1 à 1 000. L'enregistreur à mémoire est un

Fig. 10. — Positionnement des thermocouples dans le cylindre.

[Position of thermocouples in the cylinder.]

analyseur de transitoires d'impédance d'entrée de 1 M Ω . Il est muni de deux canaux d'entrée et attribue 1 024 mots de 10 bits à chaque canal. Un sélecteur à dix gammes permet de faire varier la sensibilité d'entrée de 50 mV à 50 V nécessitant ainsi l'amplification des signaux. La résolution en amplitude est de 0,1 % (10 bits par mots) de la pleine échelle. La base de temps peut être choisie de 10 ms à 100 s rendant possible l'enregistrement d'une donnée à une cadence de 10 μ s à 0,1 s. L'information contenue dans la mémoire est observée sur oscilloscope pour s'assurer de la qualité de l'essai, puis sortie sur bande perforée et traitée par ordinateur.

Un circuit hydraulique, constitué de cinq vannes électromagnétiques et deux bacs calorifugés thermostatés aux températures respectives T_E et T_L (à quelque 1/100 °C), permet la réalisation de signaux thermiques dans les boîtes à eau B_1 et B_2 au moyen d'un interrupteur. Ce dernier, sert aussi de « topper » pour l'enregistrement des données. L'équilibre thermique initial est obtenu en imposant la température T_E dans B_1 et B_2 , l'équilibre final en imposant la température T_L dans B_1 et T_E dans B_2 ($T_L > T_E$).

3.3 MISE AU POINT ET ESSAIS PRÉLIMINAIRES. —

La mise au point a tout d'abord consisté à vérifier expérimentalement l'hypothèse de l'adiabaticité de la face arrière du cylindre. En effet on observe en régime permanent qu'il n'y a pas de gradient longitudinal de température dans le mur et par conséquent que la face arrière est parfaitement isolée. La mise au point a aussi consisté à vérifier que la température de surface obtenue par extrapolation du champ de température sous-jacent est bien la température exacte $T(t)$. Pour cela on a enregistré en régime variable les températures $T_M(x_1)$ et $T_M(x_5)$ de deux thermocouples intérieurs (x_1 sert d'origine des abscisses, x_5 est l'abscisse du thermocouple le plus proche de la surface). A partir de $T_M(x_1)$ et des lois de variations des caractéristiques thermophysiques du laiton avec la température $\lambda(T)$ et $c\rho(T)$ [20] un modèle de conduction non linéaire aux différences finies [21] permet de calculer la température en tout x supérieur à x_1 en particulier en x_5 . On montre que la température calculée en x_5 notée $T(x_5)$ est identique à 5×10^{-3} près à la température mesurée en ce point $T_M(x_5)$, quel que soit le temps considéré de l'enregistrement, ce qui est un résultat assez remarquable. On peut donc espérer compte tenu de ce résultat calculer la température vraie de surface $T(t)$ à partir de l'enregistrement de la température du thermocouple intérieur $T_M(x_1)$, ceci avec une précision de l'ordre de 5×10^{-3} .

Cette mise au point étant faite; la démarche expérimentale pour un capteur thermométrique de surface donné, comprend trois étapes :

- on étalonne le capteur de surface par rapport aux thermocouples intérieurs du cylindre
- on procède aux essais permettant de calculer

avec une grande précision l'erreur de mesure en régime permanent

— on enregistre en régime variable la température $T_M(x_1)$ du thermocouple intérieur n° 1 et la température $T_M(t)$ mesurée par le capteur de surface. Comme on vient de le voir, $T_M(x_1)$ permet d'obtenir avec une bonne précision (5×10^{-3}) la température vraie de la surface $T(t)$. On en déduit :

— l'erreur absolue de mesure

$$E_a(t) = T(t) - T_M(t)$$

— et l'erreur relative de mesure

$$E_r(t) = \frac{T(t) - T_M(t)}{T(t) - T_E}.$$

3.4 ESSAIS POUR LE THERMOCOUPLE APPUYÉ. —

Le thermocouple étudié est un thermocouple chromel-alumel, entouré d'une gaine de silice, et qui est appuyé sur la face isolée à l'aide d'un ressort (Fig. 11). C'est un procédé non destructif de mesure directe de la température de surface. La manipulation a été effectuée pour

Fig. 11. — Schéma du thermocouple appuyé.

[Diagram of the clamped thermocouple.]

un signal d'amplitude $T_L - T_E = 40$ °C. Les évolutions de la température exacte $T(t)$, de la température mesurée $T_M(t)$, de l'erreur absolue $E_a(t)$ et de l'erreur relative $E_r(t)$ sont données sur la figure 12.

On constate sur cette figure :

— que l'erreur absolue $E_a(t)$ est croissante avec le temps. Elle est nulle au temps $t = 0$, le maximum de cette erreur se produisant en régime permanent. On remarque la faible dispersion des points de mesure;

Fig. 12. — Evolutions de la température exacte $T(t)$, de la température mesurée $T_M(t)$, de l'erreur absolue $E_a(t)$ et de l'erreur relative $E_r(t)$ dans le cas du thermocouple appuyé.

[Evolutions of the exact temperature $T(t)$, of the measured temperature $T_M(t)$, of the absolute error $E_a(t)$ and of the relative error $E_r(t)$ for the clamped thermocouple.]

— que l'erreur relative $E_r(t)$ est de 100 % dans les premiers instants, décroît très rapidement puis devient constante et égale à celle trouvée en régime permanent $E_r(\infty)$. On remarque que cette erreur est importante même en régime permanent ($E_r(\infty) = 14,5\%$);

— que les températures exactes $T(t)$ et mesurées $T_M(t)$ continuent à évoluer de façon notable pendant un temps beaucoup plus long. Ceci montre que l'erreur relative est constante avant l'obtention du régime permanent. Comme dans l'étude théorique, pour chiffrer ce résultat nous avons introduit un temps de réponse t_r défini par la relation :

$$\frac{E_r(t_r) - E_r(\infty)}{E_r(0) - E_r(\infty)} = 0,05.$$

Pour le thermocouple appuyé $t_r = 34$ s.

Il est intéressant de comparer t_r à la durée t_0 du régime variable étudié, t_0 étant défini par la même relation que dans l'étude théorique soit :

$$\frac{T(\infty) - T(t_r)}{T(\infty) - T(0)} = 0,05.$$

On a ici $t_0 = 176$ s.

On observe donc que le temps de réponse $t_r = 34$ s est inférieur à la durée $t_0 = 176$ s du phénomène étudié. Ceci montre expérimentalement que l'expression de l'erreur relative en régime permanent $E_r(\infty)$ donne de très bons résultats en régime variable à condition de considérer des temps supérieurs à $t_r = 34$ s.

Pour $t > t_r = 34$ s on peut écrire

$$\frac{T(t) - T_M(t)}{T(t) - T_E} = E_r(\infty) = 0,145.$$

Tous ces résultats confirment expérimentalement ceux de l'étude théorique.

3.5 AUTRES ESSAIS. — D'autres essais ont été effectués pour des thermocouples chromel-alumel identiques au précédent, mais matté et matté-collé au lieu d'être appuyés. Les évolutions de l'erreur relative $E_r(t)$ correspondante sont représentées sur la figure 12. $E_r(t)$ est toujours décroissante dans le temps, mais il apparaît de plus que les conditions de contact jouent un rôle très important sur la valeur de cette erreur. En effet les résistances thermiques de contact par unité de surface déduites de l'expression de l'erreur en régime permanent sont :

Thermocouple matté-collé	$R_c = 0,11 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$
Thermocouple matté	$R_c = 0,16 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$
Thermocouple appuyé	$R_c = 1,50 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$

Le contact thermocouple-milieu est donc bon pour les thermocouples matté-collé et matté et de mauvaise qualité pour le thermocouple appuyé. L'erreur $E_r(t)$ croît d'autant plus vite que le contact est imparfait dans le cas d'un matériau conducteur (par exemple $E_r(\infty)$ passe de 1,3 % à 14,5 %).

Enfin on peut déduire les temps de réponse t_r soit :

Thermocouple matté-collé	$t_r = 9$ s
Thermocouple matté	$t_r = 15$ s
Thermocouple appuyé	$t_r = 34$ s.

Fig. 13. — Evolutions de l'erreur relative $E_r(t)$ pour les thermocouples appuyé, matté et matté-collé.

[Evolution of the relative error $E_r(t)$ for the clamped, bruised and bruised-sticked thermocouples.]

Les temps de réponse t_r augmentent beaucoup avec l'imperfection du contact et sont très inférieurs à la durée $t_0 = 176$ s du phénomène étudié. Ceci confirme les résultats précédents.

Ce montage dont la réalisation a été très soignée permettra par la suite d'étudier les autres paramètres qui interviennent dans l'erreur — diamètre des fils — nature du milieu différente (isolant).

4. **Conclusion.** — L'étude théorique et expérimentale de la mesure d'une température de surface par contact en régime variable a été entreprise à partir d'un modèle schématisé mais significatif. L'étude théorique montre clairement l'influence des caractéristiques thermiques et géométriques du milieu et du thermomètre et souligne le rôle des conditions de contact thermomètre-milieu. D'autre part il existe dans chaque cas un temps de réponse t_r au-delà duquel

l'expression de l'erreur relative établie pour le régime permanent est utilisable. L'étude expérimentale, menée dans le cas d'un milieu conducteur, a permis de confirmer un certain nombre de résultats de l'étude théorique. Elle a montré en particulier l'influence prédominante, pour un milieu conducteur, du contact thermomètre-milieu à la fois sur la valeur de l'erreur et sur le temps de réponse t_r , t_r restant inférieur à la durée t_0 du régime variable étudié.

Bibliographie

- [1] NUSSELT, W., *Forsch. Geb. Ing. Wes.*, **63** et **64** (1909).
- [2] VERNOTTE, P., *Publication Scientifique et Technique du Ministère de l'Air* **224** (1949).
- [3] BURNETT, D. R., *J. Heat Trans.* **83** (1961) 505.
- [4] HUETZ, J., LEROUX, J. P., PALAZY, G., *C.R. Hebd. Séan. Acad. Sci.* **259** (1964) 2801.
- [5] HENNING, C. D., PARKER, R., *J. Heat Trans.* **89** (1967) 146.
- [6] LARSON, M. B., NELSON, E., *J. Heat Trans.* **90** (1968) 166.
- [7] DUTT, M., STICKNEY, T., *ISA Trans.* **9** (1970) 81.
- [8] HENNECKE, D. K., SPARROW, E. M., *Int. J. Heat Mass. Transfer* **13** (1979) 13.
- [9] KELTNER, N. R., *ISA ASI* 74223 (1974) 91.
- [10] SINGHS, B. S., DYBBS, A., *J. Heat Trans.* **98** (1976) 491.
- [11] CASSAGNE, B., Thèse de Doctorat de 3^e cycle Nantes (1974).
- [12] BARDON, J. P., *Revue Générale de Thermique* **170** (1976) 121.
- [13] GÉRY, A., LAURENT, M., SINICKI, G., DEGIOVANNI, A., *Entropie* **70** (1976) 31.
- [14] CASSAGNE, B., KIRSCH, G., BARDON, J. P., *Int. J. Heat Mass Trans.* **23** (1980) 1207.
- [15] GÉRY, A., Thèse de Doctorat d'Etat Lyon (1980).
- [16] BARDON, J. P., CASSAGNE, B., *Techniques de l'Ingénieur* R 2732 (1981).
- [17] LEROY, G., Diplôme d'Etudes Approfondies Nantes (1979).
- [18] CARSLAW, H. S., JAEGER, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, 2^e ed. (Oxford University Press London) 1959.
- [19] BELLMAN, R., KALABA, R. E., LOCKETT, J. A., *Numerical Inversion of the Laplace Transform* (Elsevier New York) 1966.
- [20] FOURCHER, B., Thèse de Doctorat de 3^e cycle Nantes (1974).
- [21] BRANSIER, J., CAUSSADE, B., LAURIAT, G., JALIN, R. et BALAGEAS, D., *Entropie* **65** (1975) 9.