

Stage sur les nouveautés en technologie et dans
les instruments de mesure. Paris, France, 22-26
Septembre 1975

CEA-CONF--3239

FR 76 00 975

LES MESURES DE TEMPERATURE PAR THERMOCOUPLES

J. LIERMANN

1 Introduction

Le "thermocouple" est sans doute le capteur le plus utilisé dans la mesure des températures, au laboratoire et dans l'industrie, et ceci depuis fort longtemps puisque son emploi remonte à la fin du siècle dernier. Le succès qu'il rencontre s'explique par ses intéressantes caractéristiques métrologiques et mécaniques, par ses dimensions très variées et surtout par son domaine de température très vaste, qui s'étend - théoriquement - de quelques Kelvin à 2800°C.

Mais ces possibilités ne doivent pas faire oublier qu'il est toujours difficile de mesurer correctement une température et ceci quel que soit le type de capteur utilisé.

Cet exposé n'a pas la prétention d'apporter des solutions aux nombreux problèmes qui se posent à l'utilisateur de thermocouples et nous nous limiterons à un survol très rapide du sujet, en donnant quelques exemples de réalisations pris parmi les nombreux cas que nous avons eu à examiner au Commissariat à l'Énergie Atomique.

Nous ne reviendrons pas sur les lois de la thermoélectricité - données dans de nombreux ouvrages - et nous ne parlerons ni des étalonnages, ni du traitement des mesures, sujets beaucoup trop vastes pour qu'ils puissent être traités dans le cadre de cet exposé.

Lorsqu'il veut mesurer une température (quel que soit le type de capteur utilisé) l'utilisateur est confronté à trois problèmes :

- quel capteur choisir
- à quel endroit le placer
- comment le fixer et le protéger

Ce sont surtout ces trois points que nous allons examiner, après avoir rappelé brièvement comment sont constitués les thermocouples les plus couramment utilisés.

2 Choix du thermocouple

Un thermocouple se compose essentiellement de :

- deux éléments thermoélectriques de natures différentes, réunis à une extrémité appelée "soudure chaude"
- un isolateur
- une gaine protectrice éventuellement

Le thermocouple peut se présenter sous sa forme la plus simple : deux conducteurs isolés réunis à leur extrémité chaude, ou au contraire, comme un ensemble complexe, comportant le thermocouple proprement dit, un protecteur métallique et un connecteur de sortie étanche. Entre ces deux extrêmes, on peut toujours choisir la solution la mieux adaptée au problème à résoudre.

2.1 Alliages de couple

De nombreux métaux purs et alliages ont été utilisés pour constituer des thermocouples mais seuls certains d'entre eux sont employés couramment compte tenu de leurs intéressantes propriétés mécaniques et thermoélectriques. Les principaux matériaux de couples sont le fer, le cuivre, l'alliage cuivre - nickel (constantan) le nickel chrome, le nickel aluminium, le platine et l'alliage platine-rhodium, le tungstène pur et allié avec le rhénium.

Nous avons rassemblé sur la planche 1, les couples thermoélectriques les plus usuels et indiqué leur domaine d'utilisation.

En résumé, on peut dire que de 0 à 650°C conviennent bien le fer le cuivre et le constantan et que le couple nickel-chrome/nickel aluminium permet des mesures correctes jusqu'à 1000°C.

On utilise ensuite le couple platine platine rhodié et pratiquement au-delà de 1800°C seuls conviennent les alliages de tungstène et de rhénium encore que leur utilisation exige de très grandes précautions.

C'est surtout le niveau de température qui influe sur le choix des éléments du couple; on s'assure que leur f.e.m par degré est suffisante et que l'on reste dans leur domaine de non détérioration. Mais dans certains cas, des alliages plus réfractaires peuvent être préférés si leur tenue à la corrosion ou leurs caractéristiques mécaniques sont meilleures.

Un souci de standardisation peut également influencer le choix, une seule nature de couple peut faciliter le traitement des mesures ou permettre l'interchangeabilité des capteurs (abaissment du prix, un seul modèle en stock).

Dans la plupart des ensembles industriels, le couple nickel-chrome/nickel aluminium présente le meilleur compromis puisque sa sensibilité et ses bonnes caractéristiques permettent son utilisation jusqu'à 1000°C et même au-delà au prix de certaines précautions.

2.2 Les isolateurs

Des conditions d'utilisation - et notamment du niveau de température, dépendra la nature des isolateurs, dont le but sera d'isoler les deux conducteurs l'un de l'autre et du protecteur ; les isolateurs et le protecteur pourront être confondus ; c'est le cas par exemple lorsque les éléments thermoélectriques sont logés dans une perle bi-filaire de grande longueur .

Les isolateurs peuvent se présenter sous trois formes :

- gaines souples de fibres minérales ou synthétiques guipées directement sur les conducteurs ou reportées
- éléments frittés réalisés à partir d'oxydes métalliques dont les plus courants sont l'alumine (pure ou combinée avec d'autres oxydes), les oxydes de beryllium et de thorium
- isolant minéral pulvérulent comprimé (magnésite ou alumine)

Tous ces matériaux deviennent bons conducteurs de l'électricité au-delà d'une limite propre à chacun d'eux et dont il conviendra de tenir compte lors du choix. A haute température, un autre point important est la compatibilité de l'isolant avec les conducteurs et la gaine extérieure.

2.3 Le protecteur

Il est fréquent au laboratoire, d'utiliser des conducteurs isolés avec une mince gaine de PVC de téflon ou de verre. Quelquefois, on laisse même les fils nus sur une certaine longueur afin qu'ils perturbent le moins possible le fluide donc le champ thermique.

Mais cette disposition reste l'exception et, dans la grande majorité des cas, le thermocouple ne peut être utilisé sans élément de protection. Le rôle de ce dernier est double :

- protéger le thermocouple des chocs, de l'oxydation, de la corrosion, de l'humidité
- le maintenir dans sa position initiale

Malheureusement, lorsque la température est élevée ou l'atmosphère agressive, le problème est reporté sur le protecteur lui même et il convient de choisir avec soin le matériau le constituant ainsi que sa forme et ses dimensions.

Mais le point le plus important est de choisir un élément protecteur qui n'introduise pas, par sa présence même, une erreur de mesure; celle ci, dans certains cas, peut atteindre 20 à 30%.

2.4 Le thermocouple à isolant minéral comprimé

Depuis une quinzaine d'années, un nouveau type de thermocouple est venu relayer le thermocouple à conducteurs goupés et les avantages qu'il présente sur ce dernier méritent qu'on lui accorde une attention particulière. Ce thermocouple est réalisé à partir d'un câble formé de deux conducteurs thermoélectriques placés dans une gaine métallique et isolés entre eux - et de la gaine - par un isolant minéral pulvérulent fortement comprimé. Le procédé de fabrication : tréfilage ou marteilage permet de réaliser des câbles de très grande longueur et de diamètres allant de 8 à 0,25 mm. La soudure chaude peut être parfaitement isolée de la gaine ou au contraire mise à la masse. L'extrémité froide est reliée soit à des fils d'extension ou de compensation soit à un connecteur par l'intermédiaire d'un élément d'étanchéité.

Les avantages que présente un tel thermocouple sont importants :

- câble flexible, que l'on peut plier, enrouler, sans déplacer les conducteurs ni modifier l'isolement
- gaine protectrice étanche protégeant durablement les éléments thermoélectriques ainsi que l'isolant des agressions du milieu environnant.

- possibilité de réaliser l'étanchéité à des pressions élevées - ou sous vide - soit par soudage ou brasage, soit par l'emploi de joints métalliques ou plastiques
- amélioration du contact thermocouple-structure due à la suppression des résistances de contacts entre les conducteurs, l'isolant et le gaine

Tous ces avantages expliquent que ce type de thermocouple soit de plus en plus utilisé mais les problèmes posés par l'emploi du thermocouple en général n'en sont pas supprimés pour autant et les préoccupations restent les mêmes quant au choix des composants.

3 Choix de l'emplacement du thermocouple

3.1 Le choix de l'emplacement du thermocouple, ou plus précisément, de sa soudure chaude, est le second problème qui se pose à l'utilisateur et c'est sans aucun doute le plus important mais aussi le plus difficile à résoudre. Et il n'est pas évident que chacun en soit toujours pleinement conscient. En effet compte tenu "qu'un thermomètre ne mesure bien que sa propre température", on peut commettre des erreurs considérables même si l'on dispose du thermocouple quasi parfait. Il n'est malheureusement pas possible de donner des "recettes" chaque cas devant être considéré en particulier. Un examen approfondi permettra d'adopter une solution tendant à limiter au maximum l'écart entre la température du thermocouple et celle que l'on veut mesurer. Cette différence peut être considérable et atteindre plusieurs dizaines de degrés (voir même centaines de degrés à haute température). On devra se méfier particulièrement des échanges par rayonnement avec les parties plus chaudes et aussi plus froides (que l'on a tendance à négliger davantage). Des écrans bien disposés permettront dans certains cas de limiter cette influence du rayonnement qui devient sensible à partir de 3 à 400°C.

L'apport ou l'extraction de chaleur par conduction peut être également un important facteur d'erreur, surtout lorsque le thermocouple est protégé par un "doigt de gant" de forte épaisseur.

La conduction par les conducteurs n'est pas à négliger non plus surtout si la conductivité thermique des alliages thermoélectriques est élevée (cuivre par exemple).

Dans le cas d'une mesure de température d'écoulement, on disposera le thermocouple de telle sorte qu'il soit fortement balayé par le fluide (éviter les zones mortes).

Mais dans tous les cas, on s'attachera à assurer un excellent contact thermique entre le thermocouple - le plus près possible de la soudure chaude - et le milieu dont on veut mesurer la température.

4 Fixation et protection des thermocouples

La durée de vie des thermocouples dépend beaucoup de l'environnement et des sollicitations mécaniques. Les vibrations induites par les écoulements et les déplacements dus à la dilatation différentielle des thermocouples et de leurs supports sont particulièrement à redouter et l'on s'attachera à les limiter au maximum. Des "doigts de gants" bien étudiés, des amortisseurs, des lyres de dilatation pourront apporter des solutions satisfaisantes mais là aussi, chaque cas doit être considéré en particulier.

Les doigts de gants, ou puits forés, s'ils protègent efficacement les thermocouples augmentent très sensiblement leur temps de réponse et peuvent masquer les variations rapides de température. Par ailleurs, il convient de ne pas reporter le problème de vibration sur l'organe de protection lui même, sa rupture entraînant la détérioration du thermocouple et pouvant faire subir des dommages importants à l'installation.

- 5 Le thermocouple est un capteur particulièrement bien adapté à la mesure des températures de fluides inertes ou en mouvement (gaz et liquides) et de matériaux divers (métalliques ou non) sous formes de pièces massives, de tôles et tubes épais ou minces, etc..

C'est même le seul capteur à contact utilisable si la température est élevée ou si la place est très limitée.

Il n'est malheureusement pas possible d'examiner ici en détail un grand nombre d'exemples de réalisation. Nous nous bornerons à quelques remarques qui s'appliquent aux cas de mesure les plus fréquemment rencontrés

5.1 Température de surface

La température d'une surface est particulièrement difficile à mesurer, le capteur, par sa présence, modifiant fatalement le champ thermique. Les thermocouples du type compacté de très petits diamètres placés parallèlement à la surface dans une petite rainure où ils sont brasés - ou à défaut sertis - offrent une solution intéressante, mais leur mise en place présente de grandes difficultés de réalisation.

Une bonne solution également consiste à "piquer" les deux fils de thermocouple dans la paroi, ce qui permet de mesurer effectivement la température de la surface délimitée par les deux fils; ceux-ci peuvent être fixés par soudage, par sertissage et même par collage en utilisant une colle conductrice.

5.2 Température d'un fluide

Dans le cas d'une mesure de température de gaz ou de liquide en mouvement, on veillera à ce que le capteur soit placé dans une zone où le fluide est suffisamment homogène. En cas d'impossibilité, on peut disposer plusieurs capteurs dans une même section - et en tirer une température moyenne - ou fixer en amont un diffuseur à faible perte de charge qui favorisera le mélange du fluide.

Si le fluide se déplace à vitesse élevée, ou s'il contient des poussières ou des gouttelettes pouvant détériorer rapidement le thermocouple, on est conduit à sacrifier un peu la précision à la fiabilité, soit en augmentant l'épaisseur du protecteur, soit en logeant le capteur dans une cavité ménagée dans la paroi.

5.3 Sources d'erreurs

Les erreurs de mesures peuvent avoir d'autres causes que celles dont nous venons de parler. Elles sont souvent dues, non plus au capteur lui-même, mais aux différents composants de la chaîne de mesure.

On évitera d'employer des passages étanches, des connecteurs, des câbles d'extension constitués de métaux différents que ceux utilisés dans le thermocouple. Ces éléments, qui sont généralement conçus pour des circuits électriques classiques, introduisent des f.e.m parasites d'autant plus importantes que la différence de température aux deux extrémités de l'élément est grande.

La compensation de soudure froide est aussi un point qu'il ne faut pas négliger, et les connexions, les armoires thermostatées et les systèmes de compensation électriques sont souvent des sources d'erreurs non négligeables.

Il convient également de citer le problème des tensions de mode commun et celui des courants induits. L'un et l'autre doivent être examinés avec beaucoup d'attention car ils sont très souvent à l'origine d'erreurs importantes surtout dans les grands ensembles industriels où les lignes de mesure cheminent à proximité de machines de grande puissance. Les thermocouples devront posséder un excellent isolement et les masses seront judicieusement raccordées. C'est surtout au niveau de l'appareil de mesure que les précautions seront prises et l'on tiendra compte lors du choix de celui-ci des conditions d'utilisation particulières des thermocouples.

6 Conclusion

Nous venons de voir que le thermocouple pouvait couvrir un champ d'applications considérable, présenter des formes et des dimensions très variées et effectuer des mesures aussi bien dans le domaine de la cryogénie que dans celui des hautes températures.

Malgré ces remarquables qualités ne doivent pas masquer les difficultés qu'il y a quel que soit le type de capteur, à bien mesurer une température. Et elles ne dispensent pas d'examiner chaque problème de mesure avec beaucoup d'attention. C'est au niveau de l'étude de l'appareillage, ou de l'ensemble industriel, que le choix du capteur et de son emplacement doit intervenir; des capteurs ajoutés au dernier moment ne peuvent que donner de médiocres résultats. Et c'est pourtant des indications qu'ils fournissent que dépend souvent la qualité d'un produit, le rendement d'une machine ou la sécurité d'une installation.

PLANCHE 1

Couples thermoélectriques	Température maximale d'emploi °C (1)	f.e.m./°C -µV (2)
Cuivre/Constantan	350	60
Fer/Constantan	650	60
Nickel-Chrome/Constantan	800	78
Nickel-Chrome/Nickel Aluminium	1 000	39
Platine-rhodié 10%/Platine	1 400	10
Platine-rhodié 13%/Platine		11
Platine-rhodié 30%/Platine-rhodié 6%	1 500	6,5
Platine-rhodié 40%/Platine rhodié 10%	1 600	5
Platine-rhodié 40%/Platine rhodié 20%	1 650	2
Platine-rhodié 40%/Platine rhodié 20%	1 650	2
Tungstène-rhénium 3%/Tungstène-rhénium 25%	2 600	8
Tungstène-rhénium 5%/Tungstène-rhénium 26%		7

(1) Utilisation en continu

(2) Valeur approximative à la température maximale d'emploi

