



Date de publication :
10 mars 2010

Mesure des températures - Éléments de choix d'une chaîne et d'une méthode de mesure

Cet article est issu de : **Mesures - Analyses | Mesures physiques**

par **Jacques ROGÉZ, Jean LE COZE**

Résumé Cet article passe en revue les critères les plus communs qui président au choix d'une chaîne de mesure, ce choix étant fortement lié au nombre de contraintes imposées par l'environnement d'utilisation. L'ordre de grandeur des températures à mesurer influe profondément sur le choix du capteur, tandis que l'intervalle exploré autour de la valeur moyenne permet de préciser le choix de la chaîne de mesure. Les attentes en termes de caractéristiques techniques (sensibilité, fidélité, exactitude...) définissent ensuite les propriétés du capteur. Pour autant, la réponse restera la plupart du temps un compromis dont l'expérimentateur seul pourra juger de la pertinence.

Abstract This article reviews the most common criteria that govern the choice of a measurement chain which is strongly influenced by the number of constraints imposed by the environment used. The magnitude of the temperatures to be measured has considerable influence on the sensor choice and the interval explored around the average value enables precision choice of the measurement chain. The needs in terms of technical characteristics (sensitivity, reliability, accuracy, etc.) then define the sensor characteristics. The response nonetheless remains a compromise, the relevance of which can only be assessed by the experimenter.

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **07/06/2021**

Pour le compte : **7200034507 - universite de lille // 194.254.129.28**

Mesure des températures

Éléments de choix d'une chaîne et d'une méthode de mesure

par **Jacques ROGEZ**

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrometallurgie de Grenoble

Docteur ès sciences

Chercheur CNRS (Centre national de la recherche scientifique) à l'IM2NP – Institut des matériaux, de Microélectronique et des Nanosciences de Provence (Marseille)

et **Jean LE COZE**

Ingénieur civil des Mines

Docteur ès sciences

Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

1. Critères de choix	R 2 518 – 2
2. Choix du capteur et de la chaîne en fonction du domaine de température	— 7
3. Sensibilité	— 9
4. Exactitude	— 9
5. Temps de réponse	— 9
Pour en savoir plus	Doc. R2517

Le présent article de synthèse constitue une introduction à la rubrique Thermométrie, à ce titre, il sera fait de fréquents renvois aux différents articles de cette rubrique, où sont détaillées les méthodes particulières propres à chaque capteur.

Dans le présent article, les capteurs et méthodes d'utilisation seront exposées succinctement en faisant référence aux articles spécialisés de ce traité Mesures et Contrôle.

La complexité du choix d'une chaîne de mesure est, à l'évidence, liée au nombre de contraintes imposées par l'environnement d'utilisation. La nature de l'information souhaitée et la méthode de mesure seront aussi des critères importants du choix. Chaque cas particulier aura sa réponse propre et il n'est pas possible d'envisager ici tous les cas. Beaucoup de critères de choix peuvent paraître au premier abord incongrus, comme le poids du capteur, sa couleur..., mais peuvent avoir dans certains cas leur importance. Nous essaierons ici de passer en revue les critères les plus communs en réponse aux questions précédemment posées. La réponse sera souvent un compromis dont seul l'expérimentateur pourra juger de la pertinence.

Quelques éléments de choix ont déjà été rassemblés dans l'article « Mesure des températures. Questions à se poser avant la mesure » [R 2516].

1. Critères de choix

Le choix peut simplement être guidé par la **nature du matériau** à tester. Il faut, pour cela aussi, être à l'écoute des études spécifiques réalisées. Par exemple, dans le domaine de la santé, la mesure de la température corporelle est en particulier importante chez les nouveaux-nés et chez les enfants atteints de déficiences immunitaires. La décision d'une hospitalisation peut en dépendre. La conclusion de 44 études sur plusieurs milliers de cas recommande l'emploi du thermomètre à dilatation de liquide plutôt que la thermographie infrarouge tympanique.

Le **prix**, éminemment fluctuant d'un fournisseur à l'autre, ne sera pas abordé ici, bien que certainement décisif dans le choix final. On peut cependant annoncer ceci : à performances égales, le couple thermoélectrique est moins cher que la résistance.

Les tableaux **1** et **2** résument les caractéristiques principales des différents thermomètres (sensibilité dans le tableau **1**, fidélité et exactitude dans le tableau **2**), et le tableau **3** leurs avantages et inconvénients.

Il est évident que la technique idéale consiste en l'utilisation, dans le domaine que l'on étudie, des appareils dérivés des étalons d'interpolation, c'est-à-dire construits avec les mêmes matériaux, en admettant cependant des tolérances plus larges que celles des étalons. Chacun d'eux possède un intervalle de température recommandé. Cette démarche, hautement souhaitable au laboratoire, se révèle souvent trop onéreuse et inapplicable dans la pratique industrielle à cause des contraintes spécifiques et souvent draconiennes de cette activité. Seuls les étalons d'interpolation possèdent des courbes d'étalonnage graduées selon un pas très fin, et cela grâce aux formules d'interpolation élaborées par les organismes spécialisés.

Cependant, d'autres appareillages bâtis sur le même principe ou faisant intervenir des phénomènes physiques totalement différents sont capables de rendre de meilleurs services pratiques, plus adaptés aux contraintes industrielles :

- les couples thermoélectriques nickel-chrome/nickel allié (type K) ont une sensibilité de $40 \text{ à } 42 \mu\text{V.K}^{-1}$ entre 300 et 400 K, alors que ceux dérivés de l'ancien étalon Pt-Rh10 %/Pt (type S) donnent entre 6 et $11 \mu\text{V.K}^{-1}$ et coûtent beaucoup plus cher ;
- le thermocouple Pt-Rh30 %/Pt-Rh6 % ne nécessite pas de correction de soudure froide, pour un prix et une sensibilité comparables, au-delà de 1 500 K, à ceux de l'étalon ;

Tableau 1 – Sensibilité du phénomène thermométrique des principaux thermomètres

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Sensibilité du phénomène thermométrique : valeur et commentaire	Remarques
Thermomètres à dilatation de gaz (thermomètres)	une variation de volume ou de pression d'une masse de gaz donnée	$\frac{1}{P_0} \frac{dP}{dT} = 3,7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ Sensibilité convenable	
Thermomètres à dilatation de liquide :			
– à enveloppe de verre – à enveloppe métallique	une variation de volume du liquide. On mesure la différence de dilatation entre le liquide et son enveloppe	$\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} = \begin{cases} 0,2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (mercure)} \\ 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (pentane)} \end{cases}$	Précision la meilleure avec le mercure sensibilité globale fonction du rapport : volume du bulbe/diamètre du capillaire
Thermomètres à dilatation de solide :			
– à tige – à bilame	une variation de longueur d'un solide. On mesure la différence d'allongement entre la tige et le support ou entre deux lames de nature différente soudées (bilame)	$\frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1} \text{ (Pyros)}$ $D = 0,15 \text{ mm.K}^{-1} \text{ (bilame)}$	Pyros = alliage à 72 % Ni + (Cr, Fe, W, Mn)
Thermomètres à tension de vapeur (thermomètres)	une variation de la pression de vapeur saturante d'un liquide qui est indépendante des volumes occupés par le liquide et la vapeur (bulbe contenant un liquide en équilibre avec sa vapeur)	$\frac{dP}{dT} = 20 \text{ kPa.K}^{-1} (0,2 \text{ atm.K}^{-1}) \text{ (aniline)}$	Non linéaire
Repères (cônes, peintures, etc.)	une réaction physico-chimique réversible ou irréversible à une température critique donnée	$\Delta = 4 \text{ K } (T < 150^\circ\text{C})$ $\Delta = 20 \text{ K } (T = 500^\circ\text{C})$ $\Delta = 30 \text{ K } (T = 1000^\circ\text{C})$ $\Delta = 50 \text{ K } (T = 1500^\circ\text{C})$	

Tableau 1 – Sensibilité du phénomène thermométrique des principaux thermomètres (suite)

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Sensibilité du phénomène thermométrique : valeur et commentaire	Remarques
Thermomètres à résistance métallique :			
– platine – nickel – cuivre	une variation de la résistance électrique d'un corps conducteur	$\frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} = \begin{cases} 3,9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (platine)} \\ 6,6 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (nickel)} \\ 3,9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (cuivre)} \end{cases}$ Plusieurs dizaines de fois plus sensible qu'un couple thermoélectrique	Interchangeabilité des résistances de platine : $\pm 0,3 \text{ K}$ (à 0°C) ou $\pm 0,7 \%$ VM ou $\pm 0,2 \%$ EM (1)
Oxydes (thermistances)	une variation de la résistance électrique d'un corps semi-conducteur	$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2}$ avec $1000 < b < 4\,000 \text{ K}$ Sensibilité dix fois supérieure à celle des résistances au platine, permettant de déceler 10^{-2} K	Interchangeabilité du capteur : $\pm 10 \%$ de la valeur en ohms à 0°C
Résistances au germanium Résistances au carbone	une variation de résistance électrique d'un corps non métallique	$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{n}{T} \text{ avec } 1 < n < 3$ $\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -10^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ à } 5 \text{ K (germanium)}$ $= -10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ à } 100 \text{ K (carbone)}$ Sensibilité élevée	Précision : $\pm 0,1 \%$ au laboratoire (germanium) Étalonnage avant chaque mesure (carbone)
Couples thermoélectriques :			
Cu/Au-Co (***) Cu/constantan (T) Ni-Cr/constantan (E) Fe/constantan (J) Ni-Cr/Ni allié (K) Pt-Rh10 %/Pt (S) Pt-Rh30 %/Pt-Rh6 % (B) Pt-Rh20 %/Pt-Rh40 % (*) Ir-Rh60 %/Ir (**) W-Re3 %/W-Re25 % (W)	l'apparition d'une f.é.m. dans un circuit comportant deux conducteurs de nature différente, lorsque cette variation est appliquée entre les deux soudures du couple ainsi formé	$d\theta/dT$ (en $\mu\text{V.K}^{-1}$) = *** : 4 à 43 (4 à 300 K) T : 17 à 60 (80 K à 350 $^\circ\text{C}$) E : 27 à 80 (70 K à 600 $^\circ\text{C}$) J : 24 à 58 (70 K à 600 $^\circ\text{C}$) K : 40 (0 à 1 100 $^\circ\text{C}$) S : 9 à 12 (200 à 1 300 $^\circ\text{C}$) B : 11 (1 000 à 1 700 $^\circ\text{C}$) * : 4 (1 200 à 1 800 $^\circ\text{C}$) ** : 6 (1 500 à 2 000 $^\circ\text{C}$) W : 18 à 8 (1 500 à 2 400 $^\circ\text{C}$) Sensibilité assez faible selon le type de couple et le domaine de température	Interchangeabilité des fils : en moyenne $\pm 0,75 \%$ VM ou $\pm 3 \text{ K}$ sauf couple S $\pm 0,4 \%$ VM ou $\pm 2,5 \text{ K}$ Dérives fonctions de l'atmosphère et de la nature du milieu
Pyromètres :			
– à radiation totale (PRT) – à récepteur sélectif (PRS) – à disparition de filament (PDF) – bichromatiques (P2C)	une variation des radiations du spectre émis. Dans le PRT le spectre entier est focalisé sur un capteur de température (couple thermo-électrique, résistance...). Dans le PRS seul un domaine restreint de longueur d'onde est reçu par un convertisseur photon-électron. Dans le PDF on compare la luminance monochromatique (généralement à $0,65 \mu\text{m}$) de la source à celle d'une lampe tare dont la relation courant-température est connue. Dans le P2C on sélectionne deux longueurs d'onde et on compare leur luminance à l'aide de récepteurs photoélectriques	$\frac{1}{M} \frac{dM}{dT} = \frac{4}{T} (\text{K}^{-1}) \text{ (PRT)}$ $\frac{1}{E} \frac{dE}{dT} = \frac{n}{T} (\text{K}^{-1}) \text{ avec } 4 < n < 12 \text{ (PRS)}$ $\frac{1}{\ell_\lambda} \frac{d\ell_\lambda}{dT} = \left(\frac{c_2}{\lambda} \right) \frac{1}{T^2} (\text{K}^{-1})$ $(c_2 = 1,4388 \text{ cm.K}) \text{ (PDF)}$ $\frac{1}{X} \frac{dX}{dT} = -\frac{1}{T} (\text{K}^{-1}) \text{ (P2C)}$ La sensibilité d'un pyromètre est de $0,4 \text{ K}$ à $1\,064^\circ \text{C}$ si l'œil est le comparateur. Elle peut être dix fois supérieure avec une cellule photoélectrique	PRT et PRS peu recommandés pour des mesures absolues PDF : $\frac{1}{i} \frac{di}{dT} = \frac{1}{T} \frac{1}{2}$ P2C : correction automatique d'émissivité

(1) Valeurs données en % de : EM étendue de mesure ; PE pleine échelle (graduation maximale) ; VM valeur mesurée.

Tableau 2 – Fidélité et exactitude des principaux thermomètres

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Fidélité f (% VM) (1) ou dérive du capteur δ (K)	Exactitude (précision) du dispositif industriel complet (1) (2) valeur et commentaire
Thermomètres à dilatation de gaz (thermomomètres)	une variation de volume ou de pression d'une masse de gaz donnée	(3)	± 2 % EM Précision convenable
Thermomètres à dilatation de liquide :			
– à enveloppe de verre	une variation de volume du liquide. On mesure la différence de dilatation entre le liquide et son enveloppe	$\delta = \begin{cases} 1\text{K} (400\text{ }^{\circ}\text{C} ; 1000\text{ h}) \\ 0,2\text{ K} (20\text{ }^{\circ}\text{C} ; \text{plusieurs années}) \end{cases}$	± 1 % PE (enveloppe de verre)
– à enveloppe métallique			± 2 % EM (enveloppe métallique) Les thermomètres à échelle ajustable peuvent fournir 10^{-3} K mais leur emploi est délicat
Thermomètres à dilatation de solide :			
– à tige – à bilame	une variation de longueur d'un solide. On mesure la différence d'allongement entre la tige et le support ou entre deux lames de nature différente soudées (bilame)		± 2 à 3 % EM (à tige) ± 1 à 3 % EM (bilame)
Thermomètres à tension de vapeur (thermomomètres)	une variation de la pression de vapeur saturante d'un liquide qui est indépendante des volumes occupés par le liquide et la vapeur (bulbe contenant un liquide en équilibre avec sa vapeur)		$\pm 1,5$ % EM (milieu de l'échelle) de 5 à 50 K sur la valeur cherchée
Repères (cônes, peintures, etc.)	une réaction physico-chimique réversible ou irréversible à une température critique donnée	Mesures irréversibles	± 1 % VM (sur l'étalonnage du repère)
Thermomètres à résistance métallique :			
– platine – nickel – cuivre	une variation de la résistance électrique d'un corps conducteur	$\delta = 1\text{ K} (650\text{ }^{\circ}\text{C} ; 6\,000\text{ h})$ (platine)	Platine : $\pm 0,5$ à 1 % VM Exactitude dix fois supérieure à celle du couple thermoélectrique jusqu'à $1\,064\text{ }^{\circ}\text{C}$
Oxydes (thermistances)	une variation de la résistance électrique d'un corps semi-conducteur	$\delta = 10^{-2}\text{ K} (50\text{ }^{\circ}\text{C} ; 3\text{ à }4\text{ mois})$ moins bon à $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	± 1 % EM
Résistances au germanium Résistances au carbone	une variation de résistance électrique d'un corps non métallique	$f = 0,03\text{ \% VM}$ (germanium) $f = 0,1\text{ \% VM}$ (carbone) (en l'absence de cyclages)	$\pm 1,5$ % EM
Couples thermoélectriques :			
Cu/Au-Co (***) Cu/constantan (T) Ni-Cr/constantan (E) Fe/constantan (J) Ni-Cr/Ni allié (K) Pt-Rh10 %/Pt(S) Pt-Rh30 %/Pt-Rh6 % (B) Pt-Rh20 %/Pt-Rh40 % (*) Ir-Rh60 %/Ir (**) W-Re3 %/W-Re25 % (W)	l'apparition d'une f.é.m. dans un circuit comportant deux conducteurs de nature différente, lorsque cette variation est appliquée entre les deux soudures du couple ainsi formé	$E : \delta = 2\text{ K} (600\text{ }^{\circ}\text{C} ; 1\,000\text{ h})$ $J : \delta = 2\text{ K} (875\text{ }^{\circ}\text{C})$ et $1\text{ K} (750\text{ }^{\circ}\text{C})$ en $1\,000\text{ h}$ $K : \delta = 9\text{ K} (1\,000\text{ }^{\circ}\text{C})$ et $0,5\text{ K} (500\text{ }^{\circ}\text{C})$ en $1\,000\text{ h}$ $S : \delta = 2\text{ à }10\text{ K} (1\,400\text{ }^{\circ}\text{C} ; 500\text{ h})$ $B : \delta = 7\text{ à }18\text{ K} (1\,350\text{ }^{\circ}\text{C} ; 10\,000\text{ h})$ (*) : $\delta = 3\text{ à }10\text{ K} (1\,700\text{ }^{\circ}\text{C} ; 700\text{ h})$ $W : \delta = 5\text{ à }15\text{ K} (2\,000\text{ }^{\circ}\text{C} ; 50\text{ h})$	$T : \pm 2\text{ \%}$ (en dessous de 200 K) $S : \pm 0,5\text{ \% VM}$ $W : \pm 1,5\text{ à }2\text{ \% VM}$ ***, T, E, J : en général : $\pm 1\text{ \% VM}$ $K, S, B, *, **, W$: parfois : $\pm 1\text{ \% EM}$ (selon l'appareil de lecture)

Tableau 2 – Fidélité et exactitude des principaux thermomètres (suite)

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Fidélité f (% VM) (1) ou dérive du capteur δ (K)	Exactitude (précision) du dispositif industriel complet (1) (2) valeur et commentaire
Pyromètres :			
– à radiation totale (PRT) – à récepteur sélectif (PRS) – à disparition de filament (PDF) – bichromatiques (P2C)	une variation des radiations du spectre émis. Dans le PRT le spectre entier est focalisé sur un capteur de température (couple thermoélectrique, résistance...). Dans le PRS seul un domaine restreint de longueur d'onde est reçu par un convertisseur photon-électron. Dans le PDF on compare la luminance monochromatique (généralement à 0,65 μm) de la source à celle d'une lampe tare dont la relation courant-température est connue. Dans le P2C on sélectionne deux longueurs d'onde et on compare leur luminance à l'aide de récepteurs photoélectriques	PRT et PRS : $f = 3$ à 15 (fonction de la température ambiante) PDF : $f = 2$ (ou meilleure si mesure de i par potentiomètre)	PRT : ± 1 à 1,5 % PE PRS : $\pm 0,5$ à 2 % PE PDF : $\pm 0,5$ à 1 % PE P2C : $\pm 0,5$ à 1 % PE Le pyromètre optique n'indique jamais, ou presque, la température thermodynamique du milieu. Un écart de plusieurs dizaines de degrés est courant si les corrections d'émissivité et d'absorption n'ont pas été effectuées. Dans les conditions de corps noir, la précision est très largement supérieure.

(1) Valeurs données en % de : EM étendue de mesure ; PE pleine échelle (graduation maximale) ; VM valeur mesurée.
(2) Étalonnage :
par comparaison, erreur $\geq \pm 0,5$ K à 1 064 °C ;
par points fixes, erreur $\geq \pm 0,2$ K à 1 064 °C.
Courbes d'interpolation : erreur supplémentaire de $\pm 1,5$ K (à 1 200 °C).
Précision d'un potentiomètre à équilibrage automatique : $\pm 0,3$ % EM.
(3) Les manomètres à tube déformables présentent une hystérésis mécanique : $f = \pm 0,5$ % PE.

Tableau 3 – Avantages et inconvénients des principaux thermomètres

Thermomètres	Références d'articles à consulter dans les Techniques de l'Ingénieur	Avantages	Inconvénients	Sécurité d'emploi
Thermomètres à dilatation de gaz	<i>Thermomanomètres</i> [R 2550]	– Appareillage simple, robuste, peu coûteux à l'achat et à l'entretien. – Échelle linéaire (sensibilité constante le long de l'échelle). – Autonomie de l'ensemble. – Temps de réponse intéressant.	– Corrections d'espaces nuisibles délicates. Les diamètres intérieurs des tubes doivent être inférieurs à 0,2 mm. – Dimension extérieure du tube élevée ($\varnothing$ 15 mm). – Correction de pression atmosphérique.	– Médiocre.
Thermomètres à dilatation de liquide	<i>Thermomètres à dilatation de liquide dans le verre</i> [R 2530]	– Normalisation très poussée. – Autonomie, simplicité d'emploi. – Prix modeste. – Adaptation possible en régulation. – Indérégulables sauf accident de surchauffe. – Sensibilité aussi grande que l'on veut en modifiant le rapport des volumes bulbe/capillaire.	– Fragilité. – Correction de colonne émergente délicate due au gradient le long de la tige, surtout si le thermomètre est protégé par une enveloppe métallique. – Temps de réponse élevé. – Faible étendue de mesure si l'on veut une grande exactitude. – L'enveloppe de verre présente une hystérésis qui impose des étalonnages fréquents.	– Thermomètres à enveloppe de verre : très bonne. – Thermomètres à enveloppe métallique : médiocre
Thermomètres à dilatation de solide	<i>Pyromètres à bilames</i> [R 2540]	– Échelle linéaire. – Régulation simple de température. – Les bilames sont peu coûteux et robustes.	– Les thermomètres à tige sont relativement fragiles et assez chers. – Les bilames sont sensibles à la surchauffe.	– Thermomètre à tige : médiocre. – Bilame : assez bonne.
Thermomètres à tension de vapeur	<i>Thermomanomètres</i> [R 2550]	– Les mêmes avantages que les thermomètres à gaz. – Pas de correction de dilatation de l'enveloppe. – Le capillaire peut être très long (> 50 m).	– Échelle non linéaire. – Dimension importante du bulbe ($\varnothing = 15$ mm).	– Médiocre.

Tableau 3 – Avantages et inconvénients des principaux thermomètres (suite)

Thermomètres	Références d'articles à consulter dans les Techniques de l'Ingénieur	Avantages	Inconvénients	Sécurité d'emploi
Repères	<i>Détermination des températures superficielles par cristaux liquides</i> [R 2640] <i>Mesure des températures par méthodes repères</i> [R 2650]	– Contrôle possible dans les endroits inaccessibles ou des pièces mobiles.	– Nécessite une surveillance permanente. – La cinétique de la réaction physico-chimique implique généralement un retard de même que le transfert thermique dans le détecteur.	– Bonne.
Thermomètres à résistance métallique	<i>Thermomètres à résistance métallique.</i> [R 2570] <i>Étalonnage et vérification des thermomètres.</i> [R 2520]	– Faible encombrement $\varnothing < 2$ mm, parfois < 1 mm. – Gamme de température importante.	– Auto-échauffement par le courant de mesure qui doit rester faible (< 10 mA) et effet parasite des fils de jonction. – Mesure différentielle difficile. – Dimensions plus importantes que celles des couples thermoélectriques. – Prix assez élevé surtout pour l'appareil de mesure de la résistance. – Sensible à une contamination chimique à température élevée entraînant une dérive. – Recuits de stabilisation nécessaires lorsque la sonde subit des cycles thermiques. – Défauts d'isolement à haute température. – Non linéaire. – Particulière vigilance à l'étalonnage.	– Résistance de platine : bonne. – Résistance de nickel ou de cuivre : médiocre.
Oxydes (thermistances)	<i>Thermistances CTN et autres thermomètres à semi-conducteur</i> [R 2580]	– Encombrement très réduit $< 0,1$ mm. – Pas de problème de fils de jonction car les résistances à mesurer sont importantes ($> 10^3 \Omega$).	– Fidélité médiocre aux cyclages thermiques. – Non-linéarité imposant un étalonnage en plusieurs points. – Soigner l'isolement en raison de la résistance élevée.	– Assez bonne.
Résistances au germanium et au carbone		– Dimensions faibles (de l'ordre de quelques millimètres). – Mesures simples aux basses températures.	– Sensibilité aux cycles thermiques surtout pour le carbone. – Non-linéarité. – Mauvaise interchangeabilité.	– Résistance au germanium : bonne. – Résistance au carbone : assez bonne.
Couples thermo-électriques	<i>Couples thermo-électriques</i> [R 2590] <i>Étalonnage et vérification des thermomètres</i> [R 2520] <i>Température de surface. Mesure par contact</i> [R 2730]	– Interchangeabilité bonne (± 2 K) et aisée. – Grande variété de couples utilisables dans un grand domaine de température (4 K-2 900 K) avec le même appareillage électrique. – Mesures différentielles et ponctuelles aisées. – Mesures de températures de surface par soudure du couple sur la surface. – Remplacement des pyromètres lorsque les émissivités sont inconnues. – Bonne reproductibilité jusqu'à 1 300 K.	– Influence des gradients sur les fils d'alliage qui ne sont pas toujours homogènes. – Instabilité par contamination et recristallisation au-delà de 1 500 K. – Défauts d'isolement au-delà de 1 800 K ou isolement difficile. – Non-linéarité. – Nécessité d'une correction automatique ou manuelle due à la température de la soudure froide.	– Assez bonne à bonne (selon le domaine de température). – Médiocre au-delà de 1 400 °C.
Pyromètres	<i>Pyrométrie optique</i> [R 2610]	– Accession aux hautes températures. – Durée de vie illimitée. – Grande souplesse d'utilisation. – Mesures sans contact. – Automatisation courante. – Temps de réponse pouvant être très faible (quelques ms).	– Étalonnage délicat car dépendant du milieu visé. L'étalonnage est généralement fait par comparaison avec un couple thermoélectrique.	– Pyromètre à radiation totale : médiocre. – Pyromètre à récepteur sélectif : assez bonne. – Pyromètre à disparition de filament : bonne. – Pyromètre bichromatique : bonne.

- une thermistance, au voisinage de la température ambiante, est 10 fois plus sensible qu'une résistance de platine. Elle permet, sans appareillage complexe, la détection de très faibles variations de température (10^{-2} K), à condition d'accepter une incertitude plus importante sur la détermination du niveau exact de température ;
- le thermomètre à dilatation de liquide est un outil fiable et d'exactitude correcte ;
- le couple thermoélectrique Pt-Rh10 %/Pt n'est plus considéré selon l'EIT-90 (échelle internationale de température de 1990) comme instrument étalon. Les couples thermoélectriques sont cependant largement utilisés avec succès entre 4 et 2 700 K (couple Au-Co/Cu à basse température et W-Re à haute température) ;
- la résistance de platine, étalon entre 13,8 K et 961,78 °C, s'emploie de 2 à 1 350 K ;
- les pyromètres dans l'infrarouge peuvent réaliser des mesures à partir de – 60 °C.

La comparaison des qualités des divers capteurs permet de tirer quelques **conclusions** :

- Contrairement au thermocouple, les systèmes résistifs nécessitent l'emploi d'alimentations externes qui appartiennent à la chaîne de mesure et donc doivent être considérés avec autant de soin que le capteur proprement dit.
- Les résistances thermiques ainsi que les thermistances génèrent de la chaleur entraînant des corrections.
- Le couple thermoélectrique est moins stable et moins précis que la résistance thermique.
- La thermistance est sans conteste la plus sensible alors que le couple thermoélectrique est le moins sensible.
- La résistance thermique de platine est linéaire avec la température alors que la thermistance ne l'est pas.
- Par contre, le signal de sortie de la thermistance est important contrairement à celui du couple thermoélectrique qui demande une amplification avec les problèmes de bruit de fond et de dérive concomitants.
- Le couple thermoélectrique est simple, robuste et facilement interchangeable. Les résistances thermiques et les thermistances sont fragiles et doivent être nécessairement protégées. Le montage des résistances thermiques est plus délicat que celui des thermocouples : elles nécessitent des mesures à quatre fils avec tous les problèmes de résistances de contact qui y sont liés.

En premier lieu, on privilégiera évidemment la **fidélité** de la chaîne. Cette qualité est quasiment imposée aux constructeurs si l'instrument qu'ils proposent veut garder le qualificatif d'instrument de mesure. Dans le choix, on tiendra compte tout d'abord du domaine de température imposé, ensuite de la sensibilité, de l'exactitude et du temps de réponse souhaités. On retiendra qu'une mesure ponctuelle, avec toutes les nuances que cette dénomination engendre, n'est pas forcément la solution idéale.

2. Choix du capteur et de la chaîne en fonction du domaine de température

L'ordre de grandeur des températures à mesurer influe profondément sur le choix du capteur, tandis que l'intervalle exploré autour de la valeur moyenne permet de préciser le choix de la chaîne de mesure.

Chaque type de thermomètre possède un domaine de travail optimal. En changeant d'intervalle de température, on est contraint de faire appel à des méthodes de mesure totalement différentes. Cette remarque est valable lorsque l'on désire augmenter notablement l'exactitude.

On se reportera au tableau 4 qui indique les divers domaines de travail pour chaque méthode de mesure envisagée. Pour une exploitation industrielle aisée, il est bon de ne pas sortir des limites usuelles repérées par un trait continu dans ce tableau.

Les couples thermoélectriques sont présents dans un grand domaine de mesure. Beaucoup sont utilisables entre – 268 °C et 2 316 °C.

Les résistances thermiques sont plus limitées au domaine – 270 °C à 850 °C.

Les thermistances se cantonnent aux températures comprises entre – 40 °C et 150 °C.

Les possibilités de choix sont les plus nombreuses entre 200 et 500 K. En dehors de ces limites, les possibilités sont d'autant plus restreintes que l'on s'en écarte davantage.

Au-dessous de 200 K, les méthodes les plus utilisées sont : les résistances (platine, germanium, carbone) et certains couples thermoélectriques. Les thermomètres à tension de vapeur ou à dilatation de gaz ne sont utilisables que par des laboratoires très spécialisés.

Lorsque l'on travaille au-dessous de 10 K, les possibilités se raréfient encore : susceptibilité paramagnétique (d'utilisation très spéciale) ou tension de vapeur de l'hélium. Les plus simples à mettre en œuvre sont les résistances de carbone et de germanium.

De 800 à 1 300 K, les couples thermoélectriques sont des instruments de choix, du point de vue de la sécurité de mesure et de la facilité de mise en œuvre. Les pyromètres à radiation totale ou à récepteur sélectif, relativement peu précis dans l'absolu, offrent cependant de grandes facilités dans le contrôle industriel continu.

Au-delà de 1 300 K, on arrive franchement dans le domaine privilégié des méthodes optiques. Jusqu'à 1 800 K, on peut certes utiliser des couples de métaux précieux. Cependant, au-delà de 1 600 K, les difficultés liées à la fidélité à long terme permettent de moins en moins les mesures permanentes. L'utilisation de couples de métaux réfractaires (par exemple W-Re), possible en pratique jusqu'à 2 700 K, pose de sérieux problèmes de maintenance et de sécurité d'emploi.

Les limites d'utilisation peuvent être imposées par les dimensions du capteur : par exemple, les couples thermoélectriques Pt-Rh10 %/Pt de diamètre 0,3 mm ne peuvent être utilisés de façon fiable que jusqu'à 1 650 K, alors que, si le diamètre atteint 0,5 mm, on peut repousser les limites de 200 K.

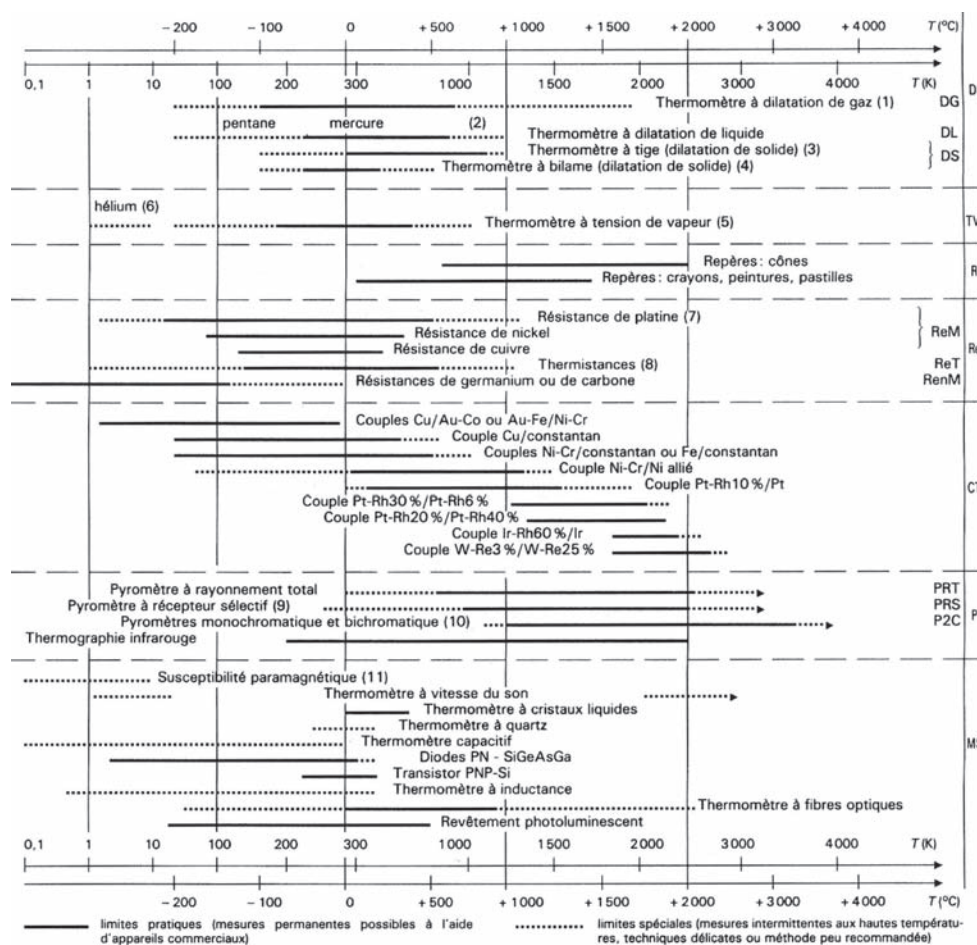
De même, les isolants des gaines et des enveloppes utilisées peuvent présenter des températures maximales d'utilisation plus faibles que celles du capteur lui-même (fluage de la silice, diffusion et transport des impuretés, isolement défectueux de l'alumine à haute température).

Enfin, l'environnement de la mesure peut être un facteur limitant dans la gamme de température d'utilisation : aux très basses températures, l'obtention d'un contact thermique satisfaisant est un aspect déterminant pour les résistances sujettes au phénomène d'auto-échauffement ; la condensation d'impuretés gazeuses à la température ambiante est susceptible de provoquer des défauts d'isolement aux températures plus basses.

L'extension du domaine de température d'utilisation des capteurs pose des problèmes délicats qui proviennent du fait que, hormis le thermomètre à gaz (loi des gaz parfaits), aucun système thermométrique n'utilise un phénomène physico-chimique idéalement pur, c'est-à-dire représentable par une grandeur qui ne soit fonction que de la température.

Par exemple, la relation résistance-température dans le thermomètre à résistance fait intervenir des phénomènes tels que variations de dimensions, création de lacunes, fluage intergranulaire, recristallisation à haute température. À basse température, divers phénomènes ont une influence contraire sur la résistivité : par exemple, la supraconductivité et la diffraction des électrons de conduction sur les joints de grains qui diminuent leur libre parcours moyen.

Tableau 4 – Domaine de température propre à chaque thermomètre



D : thermomètres à dilatation (DG, DL, DS)

TV : thermomètres à tension de vapeur

R : méthodes repères

Re : thermomètres à résistance (ReM : résistance métallique, ReT : thermistance, RenM : résistance non métallique)

CT : couples thermoelectriques

P : pyrométrie (PRT, PRS, PDF, P2C)

MS : méthodes spéciales

(1) Au laboratoire de métrologie, cet instrument permet la comparaison de l'EIT-90 avec l'échelle thermodynamique entre 3 K et 1 064, 43 °C. Des mesures jusqu'à 1 900 K ont même été réalisées. La température minimale atteinte est 0,3 K. En deçà, la tension de vapeur de l'hélium devient trop faible.

(2) Dispositif non commercialisé-enveloppe de silice-gallium liquide.

(3) 1 000 K en régime permanent.

(4) Intervalle utilisé en pratique : 220 K à 420 K.

(5) Peu recommandé au-delà de 670 K. Intervalle de mesure limité par la température ambiante T_0 , de 170 K à T_0 transmission par la vapeur, de T_0 à 970 K transmission par le liquide.

(6) Le thermomètre à tension de vapeur d'hélium est utilisé par les métrologistes entre 0,2 K et 5,2 K.

(7) Les appareils de grande exactitude ($\pm 10^{-2}$ K) servent à l'interpolation de l'EIT-90 entre 13,8033 K et 961,78 °C. Il s'agit alors de montages de résistances de platine très soignées à trois ou quatre conducteurs. Au-dessous de 14 K, il n'est plus très précis (étalonnage à ± 3 mK) ni très sensible (0,1 mK).

(8) Exceptionnellement jusqu'à 1 370 K, avec Al_2O_3 , à partir de 1 K avec ZnO , SnO_2 .

(9) Mesures possibles à partir de la température ambiante.

(10) Définition de l'EIT-90 à partir de 961,78 °C par la loi du rayonnement de Planck.

(11) En étudiant la susceptibilité du système de spins nucléaires, les mesures peuvent s'effectuer jusqu'à 10^{-5} K.

En définitive, aucun thermomètre ne pouvant balayer toute la gamme des températures, **chaque thermomètre a un domaine privilégié** où la loi physique constitue une excellente approximation. Lorsque l'on sort de ce domaine apparaissent des parasites en tous genres (dérives difficiles à contrôler à haute température, disparition ou insensibilité du phénomène à basse température). Il est passionnant de voir les efforts déployés dans les laboratoires de métrologie pour maîtriser ces dérives : analyse à haute température de la trempe des lacunes, fluages et recristallisation des fils platine, transport en phase gazeuse à partir des enveloppes, ou recherches encore plus théoriques sur les phénomènes inductifs, capacitifs, magnétiques, pyroélectriques, etc.

3. Sensibilité

■ La **sensibilité** d'un capteur est une qualité essentielle. Cependant, une trop grande sensibilité peut masquer l'allure principale du phénomène étudié par une amplification excessive de détails non représentatifs. Il vaut mieux dégrossir une étude avec un capteur peu sensible pour affiner ensuite l'observation, plutôt que l'inverse. De plus, un capteur de sensibilité élevée coûte cher et sa mise en œuvre est délicate.

Il convient de bien orienter le choix du capteur en fonction de la température envisagée, car la sensibilité de celui-ci est rarement constante sur un large domaine de température. Le capteur n'est que le premier maillon de la chaîne de mesure qui vise à amplifier le signal délivré par le capteur. L'amplification mécanique ou électronique permet aisément des gains de 10^5 et plus. La sensibilité de la chaîne complète est le produit de la sensibilité du capteur par les divers gains successifs des éléments de la chaîne. Il faut être conscient que la chaîne, d'une part, accroît dans les mêmes proportions l'importance du signal et celle du bruit généré ou lu par le capteur et, d'autre part, possède son bruit propre. Une sensibilité trop faible que l'on croit compenser par un gain d'amplification élevé n'est pas une solution acceptable. Cependant, utiliser une sensibilité très élevée peut être illusoire, car la définition de l'échelle thermométrique a sa propre limite. Par exemple à 800 K, l'exactitude limite donnée par l'EIT-90 n'est que de 3 mK et, à 1 500 K, elle est de 100 mK. Ces sensibilités sont rarement atteintes industriellement.

■ Linéarisation des mesures

Un capteur qui a une sensibilité constante dans tout l'intervalle de mesure est **linéaire**. C'est une garantie de facilité de lecture et de constance d'exactitude en tout point. Cet aspect est cependant mineur vis-à-vis de la fidélité. En effet, les défauts de linéarité du capteur sont souvent très facilement corrigés par un traitement du signal à l'intérieur même de la chaîne de mesure.

Les constructeurs proposent de plus en plus des thermomètres linéaires. Il en résulte un emploi plus commode de l'appareil. Lorsque la linéarisation intervient sur l'organe de lecture généralement numérisé, la méthode de détection n'est pas modifiée. Dans ce cas, la mesure de type potentiométrique repose sur la comparaison de la f.é.m. cherchée avec une f.é.m. de référence interne, modifiée progressivement par tranches selon le niveau atteint. Si les tensions de référence sont bien choisies, on obtient un rapport de f.é.m. fonction linéaire de la température et affiché directement en degrés, après correction automatique de la température de soudure froide si nécessaire. La linéarisation de la lecture, même si elle n'est qu'un artifice électronique, est susceptible de simplifier les

procédures d'étalonnage, en ce sens que, si l'on est certain de la linéarité de la réponse par un étalonnage électrique interne par exemple, le nombre de points d'étalonnage purement thermométriques peut être très largement réduit.

Une autre procédure de linéarisation des mesures consiste en la construction de détecteurs spéciaux ou en l'utilisation d'alliages à réponse linéaire. Dans le cas des sondes à résistance, on met en série différents métaux (nickel, manganine) dont les réponses individuelles se compensent pour donner une relation globale linéaire [29]. Des résistances de cuivre de fortes valeurs (200 et 2 000 Ω) sont disponibles sous de faibles dimensions avec une bonne linéarité entre 250 et 450 K. Signalons enfin un montage de plusieurs thermistances en parallèle, associées à des résistances fixes : il fournit une relation linéaire à $\pm 0,04$ % entre 300 et 400 K avec des sensibilités de lecture de $10 \Omega.K^{-1}$ (ou $5 V.K^{-1}$). En augmentant le nombre de détecteurs élémentaires du montage, on arrive toujours à diminuer les écarts par rapport à la linéarité, mais on accroît les dimensions de la sonde ainsi que le temps de réponse [30].

4. Exactitude

Dans le tableau 2 sont données les exactitudes maximales atteintes par les capteurs.

5. Temps de réponse

Pour chaque type d'appareil, diminuer le temps de réponse revient généralement à atténuer la sensibilité. On tourne la difficulté en amplifiant le signal à mesurer, mais cela n'est pas sans limite car on amplifie également les bruits parasites d'origines diverses : dans les mesures ultrasensibles, il faut tenir compte du bruit propre à la mesure, qui varie comme $\tau^{-1/2}$, τ étant la constante de temps de l'appareil. Ce bruit se manifeste par une fluctuation apparente de la grandeur mesurée. On n'a pas intérêt à chercher un temps de réponse faible car les phénomènes thermiques sont généralement lents.

À titre d'indication, on peut dire qu'il n'y a pas de problème pour trouver des appareils répondant à un signal rapide (échelon unité), en moins de 1 s. Le temps de réponse de couples thermoélectriques et de thermistances peut être très court selon le montage. Des résistances thermiques de petites dimensions sont plus rares car plus difficiles à monter.

Il faudra cependant faire bien attention à la bande morte du système, qui est en relation directe avec la sensibilité maximale.

Dans le cas des pyromètres optiques mesurant une énergie, le temps de réponse peut dépendre de la température mesurée : par exemple 0,01 s au-dessous de 700 K et 0,1 s au-delà (cellule photoélectrique). Pour garder un temps de réponse τ raisonnable, on est contraint de limiter la sensibilité. Par exemple, un pyromètre à disparition de filament, couplé à un photomultiplicateur, aura les caractéristiques suivantes : vers 1 400 K, $\tau < 1$ s (sensibilité $\pm 0,2$ K) ; vers 1 200 K, $\tau = 4$ s (sensibilité $\pm 0,6$ K) ; vers 1 000 K, $\tau = 6$ s (sensibilité ± 1 K).

Mesure des températures

Chaîne de mesure

par **Jacques ROGEZ**

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrometallurgie de Grenoble

Docteur ès sciences

Directeur de recherche CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) à

l'IM2NP – Institut des Matériaux, de Microélectronique et des Nanosciences de Provence (Marseille)

et **Jean LE COZE**

Ingénieur civil des Mines

Docteur ès sciences

Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Références bibliographiques

- [1] LANDAU (L.) et LIFCHITZ (E.). – *Physique statistique*. Éd. MIR., Moscou (1967).
- [2] ATKINS (P.W.). – *Chaleur et désordre, le deuxième principe de la thermodynamique*. L'univers des sciences. Bibliothèque Pour la Science (1987).
- [3] DE RYCKER (H.). – *Chaleur et entropie, démythification de la notion d'entropie*. Vailant-Cannanne SA Liège (1976).
- [4] Comité International des Poids et Mesures. Comité Consultatif de Thermométrie. 8^e Session. Annexe 14. Édité par le Bureau International des Poids et Mesures (1967).
- [5] *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. ISO/IEC Guide 99:2007.
- [6] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 1362 p., 14 × 22, 127 mémoires, Reinhold Publ. Co., p. 204 (1941).
- [7] MIRKOVICH (V.V.). – *Thermal Diffusivity Measurements of ARMCO Iron by a Novel Method*. Review of Scientific Instruments, 48, 5, 560-565 (1977).
- [8] PORRAL (G.), MATTEUDI (G.) et DAVOINE (F.). – *Application des propriétés conductrices de la zircone stabilisée à la réalisation de sondes thermiques*. Rev. Int. Hautes Tempér. et Réfract., 8, p. 253-60, 14 fig., bibl. (8 réf.) (1971).
- [9] MATTEUDI (G.), PORRAL (G.) et SCHLEY (R.). – *Réalisation industrielle de sondes thermiques*. Rev. Int. Hautes Tempér. et Réfract., 9, p. 341-4, 4 fig., bibl. (7 réf.) (1972).
- [10] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 1362 p., 14 × 22, 127 mémoires, Reinhold Publ. Co., p. 685 (1941).
- [11] DOUCET (Y.). – *Techniques modernes et applications de la cryométrie*. 225 p., Dunod (1959).
- [12] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie) 2383 p., 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 65, Instrument Soc. America (1972).
- [13] Pyro-Contrôle Chauvin Arnoux. Mesure précise de la température des flammes. http://www.pyro-contrôle.com/pet/fiche_technique/cannes_aspi_cam56.pdf
- [14] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie) 2383 p., 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 123, Instrument Soc. America (1972).
- [15] CALVET (E.) et PRAT (H.). – *Microcalorimétrie. Applications physicochimiques et biologiques*. Masson Éd. (1956).
- [16] HUME-ROTHERY (W.), CHRISTIAN (J.W.) et PEARSON (W.B.). – *Metallurgical equilibrium diagrams (Diagrammes d'équilibre en métallurgie)*. The Institute of Physics, 296 p., 15 × 24, 239 fig., bibl. (202 réf.), Chapman and Hall (1953).
- [17] CHEVENARD (P.). – *Analyse dilatométrique des matériaux*. 58 p., 21 × 27, 34 fig., bibl. (49 réf.), Dunod (1929).
- [18] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie) 1362 p., 14 × 22, 127 mémoires, Reinhold Publ. Co., p. 883 (1941).
- [19] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p., 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 111, Instrument Soc. America (1972).
- [20] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p., 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 110, Instrument Soc. America (1972).
- [21] *Sécurité de rupture de thermocouples dans les centralisateurs de mesure*. Mesures, p. 268-80, 8 fig. (Condensé de l'article de R. S. HARMON *Taking the heat of thermocouple failures*. Electronics, p. 97-100, oct. 1969) (mai 1970).
- [22] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p., 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 66, Instrument Soc. America (1972).
- [23] PETIT (Y.). – *La mesure de la température superficielle des cylindres sècheurs des machines à papier*. Mesures, n° 312, p. 699-700, 1 fig. (mai 1963).
- [24] BAKER (H.D.), RYDER (E.A.) et BAKER (M.H.). – *Temperature measurement in engineering*. (La mesure des températures dans l'ingénierie), 2^e vol., 472 p., 15 × 23, John Wiley and sons, p. 240 (1961).
- [25] HUSSON (G.). – *La mesure des températures en aciéries*. Cahiers du CESSID – Metz, 58 p., 32 fig., bibl. (20 réf.). Mise au point des méthodes intermittentes et des mesures continues, avec description pratique de quelques montages (1959).
- [26] CHAUSSAIN (M.). – *Étude sur les couples thermoélectriques platine/platine-rhodié et applications industrielles*. Fonderie n° 77, p. 2 955 (1952).
- [27] *Temperature. Its measurement and control in science and industry*. (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p., 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 82, Instrument Soc. America (1972).

- [28] *Temperature. Its measurement and control in science and industry.* (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p, 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 95, Instrument Soc. America (1972).
- [29] *Temperature. Its measurement and control in science and industry.* (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p, 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 92, Instrument Soc. America (1972).
- [30] SMITH (H.G.) et BURTON (J.S.). – *What price process instrument evaluation ?*. Control Engineering, p. 50 (cité dans Mesures, avr. 1971 p. 29 : évaluation des performances d'instruments de contrôle) (déc. 1970).

- [31] SCHOOLEY (J.F.). – *Temperature. Its measurement and control in science and industry.* (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 1400 p. Éd., American Institute of Physics (NY), p. 711 (1982).
- [32] SCHOOLEY (J.F.). – *Temperature. Its measurement and control in science and industry.* (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie), 1400 p. Éd., American Institute of Physics (NY), p. 715 (1982).
- [33] MARTIN (A.E.). – *Infrared instrumentation and technique*. Elsevier (1966).
- [34] SCHOOLEY (J.F.). – *Temperature. Its measurement and control in science and industry.*

(La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie), 1400 p. Éd., American Institute of Physics (NY), p. 729 (1982).

- [35] *Temperature. Its measurement and control in science and industry.* (La température : sa mesure et sa régulation dans la science et dans l'industrie). 2383 p, 3 vol., 215 mémoires, mémoire n° 140, Instrument Soc. America (1972).
- [36] TANAKA (M.) et OKADA (M.K.). – *Sur l'erreur causée par la conduction thermique du thermomètre*. Procès-verbaux des séances du Comité Consultatif de Thermométrie, Gauthier-Villars, p. 97 (1948).

À lire également dans nos bases

LAISSUS (J.). – *Thermométrie et pyrométrie*. Mesures, p. 82 (oct.1965).

DANLOUX-DUMESNILS (M.). – *Du thermomètre de Florence au thermomètre de Lyon*. Mesures, p. 1023 (sept. 1961).

PAJANI (D.). – *La thermographie. Technologies et applications ; Techniques de l'Ingénieur*. Base documentaire Mesures et Contrôle [R 2741] (Septembre 2001).

GRISCH, GICQUEL et HERVE. – *Mesure de température de flammes*. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle [R 2752] (2009).

AUTRAN (J.M.). – *Thermomètres à résistance métalliques*. Base Archives Analyse/Mesures [R 2570] (1985).

BONNIER (G.) et RONSIN (H.). – *Thermistances CTN et autres thermomètres à semi-conducteurs*. Base Archives Analyse/Mesures [R 2580] (1991).

BONNIER (G.) et DEVIN (E.). – *Couples thermoélectriques – Caractéristiques et mesure de température*. Base Mesures physiques [R 2590] (1997).

AUTRAN (J.-M.) et LACROIX (R.). – *Couples thermoélectriques : caractéristiques générales*. Base Archives Mesures physiques [R 2592] (1986).

DEVIN (E.). – *Couples thermoélectriques – Données numériques d'emploi*. Base Archives Mesures physiques [R 2594] (1999).

LACROIX (R.). – *Couples thermoélectriques : tables de référence*. Base Archives Mesures physiques [R 2596] (1975).

CABANNES (F.). – *Pyrométrie optique*. Base Archives Analyse/Mesures [R 2610] (1990).

PAJANI (D.). – *Thermographie – Principes et mesure*. Base Mesures physiques [R 2740] (2001).

AUDAIRE (L.) et PAJANI (D.). – *Thermographie – Principes et mesure*. Base Mesures physiques [R 2741] (2001).

LEROUX (J.P.). – *Mesure de température par revêtements photoluminescents*. Base Archives Mesures physiques [R 2790] (1989).

BARDON (J.P.). – *Température de surface, Notions fondamentales*. Base Archives Mesures physiques [R 2730] (1981).

BACCOT (M.). – *Thermomètres à liquide dans le verre*. Base Archives Mesures physiques [R 2530] (1969).

JOUANNEAU (J.). – *Pyromètres à bilames*. Base Archives Mesures physiques [R 2540] (1985).

FERDINAND (P.). – *Thermomètres à fibre optique – Procédés de mesure*. Base Mesures physiques [R 2800] (2003).

FERDINAND (P.). – *Thermomètres à fibre optique sans contact : pyromètres*. Base Mesures physiques [R 2801] (2003).

FERDINAND (P.). – *Thermomètres à fibre optique avec contact*. Base Mesures physiques [R 2802] (2003).

FERDINAND (P.). – *Thermomètres à fibre optique*. Base Mesures physiques [R 2803] (2003).

DELISEE (M.). – *Détermination des températures superficielles par cristaux liquides*. Base Mesures physiques [R 2640] (1996).

BISSON (G.). – *Mesure des températures par méthodes repères*. Base Mesures physiques [R 2650] (2001).

BARDON (J.P.) et CASSAGNE (B.). – *Température de surface, Mesure par contact*. Base Archives Mesures physiques [R 2732] (1981).

BOCQUET (B.). – *Radiothermométrie micro-ondes*. Base Mesures physiques [R 3030] (2002).

LE NEINDRE (B.). – *Conductivité thermique des liquides et des gaz*. Base Constantes physico-chimiques K 427] (1998).

BALIAN (A.). – *Compteurs d'énergie thermique – Répartiteurs de frais de chauffage*. Base Archives analyse/mesures [R 3040] (1994).

THUREAU (P.). – *Fluxmètres thermiques*. Base Mesures physiques [R 2900] (1996).

ROUQUEROL (J.) et ELEGANT (L.). – *Application des microcalorimètres aux mesures thermiques*. Base Mesures physiques [R 3010] (1996).

LE COZE (J.) et ROGEZ (J.). – *Étalonnage et vérification des thermomètres*. Base Mesures physiques [R 2520] (1988).

LECORDER (J.-C.) et PETIT (C.). – *Mesure locale et instantanée de la température des fluides*. Base Archives analyse/mesures [R 2760] (1985).

EXERA. – *Appareillages de thermographie industrielle*. Base Mesures physiques [R 2750] (2006).

GREGOIRE (P.) et LEROY (M.). – *Mesures en météorologie*. Base Mesures physiques [R 3050] (2005).

LE COZE (J.) et ROGEZ (J.). – *Mesure des températures – Questions à se poser avant la mesure*. Base Mesures physiques [R 2516] (2009).

BIETTRON (P.). – *Thermomanomètres*. Base Archives analyse/mesures [R 2550] (1989).

Normes et standards

ISO/IEC 17025 2005 Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant
toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés
pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques
et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles
en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais,
espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions
antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier
de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés
de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com