



Date de publication :
10 mars 2010

Mesure des températures - Influence des conditions d'utilisation sur les incertitudes

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

par **Jacques ROGÉZ, Jean LE COZE**

Résumé Quelles sont les composantes principales de l'incertitude d'une mesure thermométrique dans un contexte donné et la part apportée par chacun des éléments séparément ? Comment évaluer l'exactitude de la mesure, fonction non seulement du capteur, mais aussi de son couplage avec le milieu étudié ? Est-ce que l'appareillage thermométrique ne réclame pas trop de maintenance et de remplacement au regard de la justesse de la mesure recherchée ? Autant de questions auxquelles tentent de répondre cet article.

Abstract What are the main components of the uncertainty of a thermometric measurement in a given context, and the role played by each individual element? How is the accuracy of the measurement to be assessed, depending on the sensor and also on its coupling with the studied environment? Does the thermometric equipment require excessive maintenance and replacement in order to achieve the desired measurement? This article attempts to provide the answers to these questions.

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

Influence des conditions d'utilisation sur les incertitudes

par **Jacques ROGEZ**

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

Docteur ès sciences

Chercheur au 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. Défauts fréquents dans le matériel et dans sa mise en œuvre	R 2 519 – 2
2. Erreurs imputables à la perturbation provoquée par la chaîne de mesure elle-même	– 3
3. Erreurs liées à l'environnement de la chaîne de mesure	– 6
4. Normes – interchangeabilité	– 7
5. Étalonnage – exactitude	– 8
Pour en savoir plus	Doc. R 2 517

Lorsqu'on effectue une mesure, elle est accompagnée nécessairement d'une **incertitude**. Il est sain de répondre à la question : *quelles sont les composantes principales de l'incertitude de mesure dans un contexte donné ? C'est une fois que ces causes sont comprises qu'une amélioration, si nécessaire, peut être apportée.*

Contrairement à la sensibilité, la notion d'**exactitude** en thermométrie ne dépend pas uniquement de l'instrument de mesure et en particulier du capteur, mais aussi et parfois essentiellement de la nature du couplage capteur-milieu étudié. Autrement dit, il ne suffit pas de mettre en place un appareil juste pour obtenir une mesure juste. Les montages thermométriques sont de natures très variées, il n'est pas possible de repérer tous les problèmes susceptibles d'être rencontrés. Dans les paragraphes qui vont suivre, on essaiera cependant d'alerter l'expérimentateur sur certaines précautions à prendre pour son installation thermométrique, qui dépendent aussi du but recherché.

Le terme de **sécurité d'emploi**, volontairement vague, cherche à répondre à la préoccupation suivante : *est-ce que l'appareillage thermométrique ne va pas poser de trop gros problèmes de maintenance et de remplacement, alors que l'on désire uniquement éviter les mesures fortement erronées ? En regard du problème de remplacement d'un élément de la chaîne, on peut s'interroger sur l'incertitude qu'apporte chacun des éléments séparément.*

Les appréciations plutôt subjectives décernées aux différents dispositifs thermométriques indiquées dans le fascicule [R 2518] sont claires en elles-mêmes, mais elles recouvrent des réalités assez différentes, plus ou moins superposées et parfois contradictoires. Un capteur est susceptible de se dérégler pour diverses causes accidentelles ou permanentes : le milieu étudié peut créer des

contraintes mécaniques, pneumatiques, chimiques dans les matériaux inhomogènes, thermiques par des fuites avec le milieu extérieur, magnétiques, électromagnétiques ou encore plus simplement électriques.

Les thermomètres numériques, comme toute autre chaîne de mesure, possèdent leurs propres sources d'incertitude à chaque maillon intégré dans la chaîne. Dans le cas d'un doute, reste toujours le recours à un étalonnage global de l'instrument.

Nous avons tous tendance à vérifier d'autant moins souvent un appareil qu'il est plus complexe. Cette attitude est particulièrement dangereuse dans les études thermométriques, parce que les capteurs évoluent notablement au cours du temps. Les phénomènes de vieillissement du dispositif, liés à des pollutions externes, à des transformations internes ou même à des accidents, sont particulièrement graves pour les capteurs de température liés à des régulateurs. Ces phénomènes influent moins sur des capteurs différentiels comparant des températures voisines dans le même environnement, car leurs effets se compensent, au moins en première approximation. Dans le cas de capteurs de mesure absolue, la solution consiste en une comparaison fréquente du capteur en place avec un étalon. Des contrôles réguliers de la dérive du dispositif, fournissant des tables de correction, permettront de définir l'évolution de la justesse des mesures au cours du temps.

1. Défauts fréquents dans le matériel et dans sa mise en œuvre

■ Défauts de montage

Lorsque l'on a choisi et installé la chaîne de mesure, on est souvent confronté à des problèmes dont on n'avait pas pris conscience de prime abord. Les détériorations graves, la plupart du temps apparentes, ne sont pas les plus dangereuses. Par exemple, une inspection fait apparaître la fêlure d'une enveloppe de verre résultant d'une manipulation brutale. Cette même brutalité n'aura pas eu de conséquences visibles sur l'enveloppe métallique d'une résistance qui n'en donnera pas moins des valeurs fausses. De ce point de vue, il serait sans doute préférable d'utiliser des instruments dont la fragilité s'impose à première vue, afin d'éviter l'oubli de certaines précautions de manipulation.

Dans un thermomètre à dilatation de liquide, une erreur peut être due à la non-uniformité de la section du capillaire [R 2530].

La qualité de la fixation des deux éléments dans un bilame peut engendrer des erreurs conséquentes [R 2540].

Pour les couples thermoélectriques, l'absence de jonction froide, la rupture de la chaîne par des fils de Cu, l'absence de fils de compensation jusqu'à la soudure froide ou une jonction avec les fils de compensation dans une zone de température inadéquate sont des erreurs de montage couramment rencontrées.

La chaîne de mesure ou d'acquisition de données doit être homogène. Par exemple, un voltmètre trop peu sensible ne permettra pas de profiter de la sensibilité maximum du capteur.

■ Fautes d'ordre électrique ou électronique

Un appareillage électronique doit être mis sous tension au moins une demi-heure avant toute mesure. S'il n'a pas atteint sa température de fonctionnement, un amplificateur dérive. Un blindage électrique de l'appareil peut entraver la ventilation, occasionner une surchauffe et donc modifier l'étalonnage.

– **Résistances parasites** : dans tout circuit électrique, les problèmes de résistances de contact parasites sont résolus par l'utilisation de contacts en or. Les résistances parasites situées dans un circuit où

l'intensité est nulle à l'équilibre n'affectent pas directement l'exactitude de la mesure, mais peuvent en atténuer la mobilité.

On utilise, pour les résistances de précision, un montage à cinq fils permettant de mesurer les résistances d'isolement. On notera que la valeur d'une résistance d'isolement n'a de sens qu'avec l'indication de la tension sous laquelle elle est mesurée.

Pour s'affranchir des résistances parasites des fils de liaison, il est nécessaire d'utiliser des méthodes potentiométriques, aussi bien pour les couples thermoélectriques que pour les résistances.

À haute température, il n'y a pas de solution aux défauts d'isolement, si ce n'est de sélectionner soigneusement les isolants les mieux adaptés. Pour les sondes à résistance, on choisit une valeur totale faible devant les résistances d'isolement, lesquelles peuvent atteindre 1 M Ω sous quelques volts avec un support en silice (les résistances de platine usuelles font 100 Ω à 0 °C, c'est-à-dire environ 400 Ω à 1 200 K).

– **F.é.m. parasites. Dérive des alimentations** : indépendamment des problèmes de vieillissement, la f.é.m. d'une pile étalon peut évoluer si son temps de stabilisation après installation est trop court. Il en est de même si son débit est exagérément prolongé au cours d'un tarage par exemple. De même, après un contrôle de tension utilisant un voltmètre de résistance trop faible, ce phénomène peut se manifester.

Une alimentation stabilisée de précision ne peut être correctement utilisée qu'après un temps de thermalisation des circuits consécutive à la mise sous tension. Dans le cas d'une utilisation prolongée de ce type d'appareil, il faut connaître précisément sa dérive en température et son vieillissement.

Les parasites électriques sont souvent imputables à des fautes de montage ou à des soudures défectueuses.

Bien des f.é.m. parasites sont d'origine thermoélectrique. On en réduit l'effet en faisant deux mesures successives en inversant les polarités. Par exemple, si l'on cherche à mesurer une tension X et qu'il existe une tension parasite μ , on obtient $V_1 = X + \mu$. Après inversion de polarité, on mesure une autre valeur $V_2 = X - \mu$. Cela permet de calculer X :

$$X = 0,5(V_1 + V_2)$$

Cela suppose que μ ne varie pas pendant le temps nécessaire à l'inversion de polarité. Les méthodes appelées « ponts alternatifs » résolvent bien ce type de problèmes.

Un phénomène d'auto-induction peut apparaître dans les résistances bobinées lorsque la mesure a lieu en courant alternatif. La mesure de résistance est dans ce cas erronée, car c'est l'impédance de l'enroulement qui est mesurée. La fréquence utilisée dans les systèmes de très haute précision peut atteindre 15 Hz mais reste communément dans la gamme 30-100 Hz [33] [34] [36].

■ Fautes d'ordre chimique

Les thermomètres à dilatation de solide ou bilames sont susceptibles de s'oxyder.

Les supports isolants font apparaître un shunt résistif lorsque de la vapeur d'eau s'est déposée ou lorsqu'ils ont subi une métallisation.

Dans une mesure de gradient thermique où les grandeurs mesurées sont nécessairement faibles, une bonne homogénéité chimique des capteurs est recommandée.

■ Fautes d'ordre mécanique

Un écrasement accidentel des fils métalliques (par exemple par écrasement, un effet de trempe, des cycles thermiques répétés ou des variations trop rapides de température des capteurs que l'on déplace d'un milieu à un autre sans attendre l'équilibre), génèrent des contraintes qui ont pour conséquence un gradient de défauts dans le matériau. Placé dans un gradient thermique il génère une erreur de mesure [R 2570].

■ Fautes d'ordre thermique

Dans le tube de transmission d'un manomètre, un point chaud à température variable perturbe le signal de mesure [R 2550].

Dans un thermomètre à dilatation, un gradient thermique important peut apparaître par refroidissement des extrémités [R 2540].

■ Correction à effectuer

Avec les thermomètres à dilatation de liquide dans le verre, il faut effectuer des corrections de colonne émergente, de pression extérieure, de capillarité, de parallaxe, de variation de zéro.

Pour les résistances et thermistances, il faut corriger la lecture des effets de l'échauffement [R 2580].

2. Erreurs imputables à la perturbation provoquée par la chaîne de mesure elle-même

Pour effectuer une mesure, il est nécessaire de créer une interaction entre l'instrument de mesure et le milieu étudié. Dans une mesure de température, le thermomètre échange de l'énergie avec le corps étudié et crée ainsi une perturbation dans le milieu considéré. Autrement dit, la température d'un corps parfaitement isolé est impossible à mesurer. Il faut accepter une incertitude sur l'énergie du système pour pouvoir définir sa température. Cette perturbation thermique, évidente dans toutes les mesures par contact, n'est cependant pas inexistante dans les méthodes sans contact comme la pyrométrie optique. Pour mesurer la température d'un corps noir, il faut en effet pratiquer une ouverture macroscopique dans son enceinte, c'est-à-dire autoriser un échange d'énergie avec le thermomètre par rayonnement.

S'il est impossible d'annuler cette perturbation, il est essentiel de la minimiser car, dans le cas contraire, le résultat de la mesure se rapporterait à l'ensemble milieu + détecteur, supposés en équilibre, mais dans un état énergétique différent de celui du milieu avant l'introduction du détecteur.

De manière pratique, on retiendra qu'il faut généralement :

- favoriser les échanges entre milieu et capteur ;
- réduire le plus possible les échanges entre capteurs et milieux étrangers, en réduisant la conductivité thermique du détecteur vers l'extérieur.

Les perturbations par le capteur peuvent présenter deux aspects.

■ **La capacité thermique du capteur** intervient du fait de l'équilibre thermique, en faussant par sa seule présence la température que ce capteur avait pour mission de déterminer. On peut définir un ordre de grandeur de cette perturbation : soit un solide de capacité thermique M dont la température T est mesurée à l'aide d'un capteur, de température initiale θ et de capacité thermique m .

En supposant qu'il n'y a aucun échange d'énergie thermique avec le milieu extérieur, l'équilibre entre le capteur et le milieu s'écrit :

$$T - T' = (T' - \theta)m/M$$

où T' est la température d'équilibre, et $T - T'$ l'erreur de mesure.

La limite à considérer et les précautions éventuelles à prendre dépendent donc, pour un cas donné, de la précision recherchée, liée essentiellement à la capacité thermique du capteur, elle-même dépendante de son volume. Celui-ci est très variable, depuis quelques litres pour les thermomètres à gaz, quelques cm^3 pour les thermomètres à liquides ou à résistance, jusqu'aux soudures des couples thermoélectriques constitués de fils très fins (\varnothing 0,1 mm).

La perturbation produite par un trou dans le milieu étudié (figure 1) serait théoriquement nulle si l'on pouvait supposer que les isothermes ne sont pas perturbées par la cavité. Cela ne serait possible que s'il y avait identité parfaite entre le matériau du thermomètre et celui du milieu, et si le thermomètre était sans fuite vers l'extérieur.

Le thermomètre indiquerait une valeur moyenne : $T_m = (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n)/n$

On montre en effet que la valeur mesurée T_m est égale à la température qui existerait au centre C en l'absence de trou (figure 1). Pour arriver pratiquement à ce résultat, on cherchera à réaliser au mieux les conditions décrites par les hypothèses ci-dessus : trou petit, bon contact thermique, faible conductivité thermique du détecteur vers le milieu extérieur.

■ **Les pertes par conduction vers l'extérieur** sont annulées si le détecteur, les connexions et l'appareil de mesure sont situés entièrement sur une même surface isotherme. Faute de pouvoir réaliser une telle condition, il est bon de s'en rapprocher autant que possible en plaçant le détecteur et une partie des connexions sur la surface isotherme passant par le point de mesure choisi, avant de s'éloigner de cette surface vers l'appareil de lecture. Cette

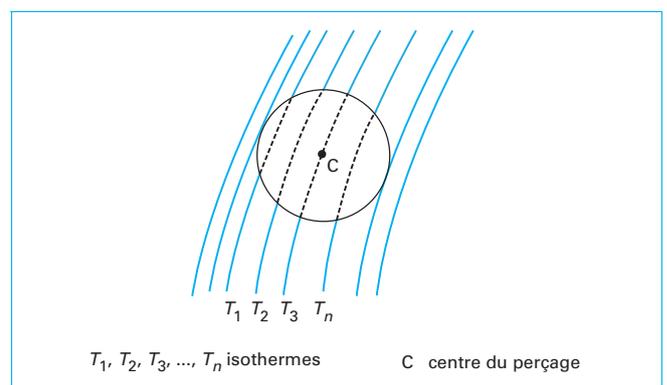


Figure 1 - Perturbation idéale produite par un perçage

précaution est évidemment d'autant plus importante que les échanges thermiques sont plus lents (basse température, fluides sous faibles pressions, etc.). Les gaines d'isolement généralement mauvaises conductrices sont souvent négligées dans le calcul des fuites mais de par leur épaisseur souvent plus importante que celles des matériaux métalliques meilleurs conducteurs, elles transmettent une quantité d'énergie équivalente aux métaux constitutifs de la canne thermométrique [38].

Sur la figure 2 sont représentées schématiquement les perturbations des isothermes par le détecteur dans divers cas de figure. Un alésage orthogonal à la surface (cas de la figure 2 1m-2m-3m) prévu pour placer un capteur ou permettre une visée optique déforme les surfaces isothermes un peu comme le ferait une tige appuyée sur une série de membranes élastiques. La déformation décroît d'une surface à l'autre avec la profondeur. Le phénomène serait peu accentué par les fils d'un couple nu plongé à l'intérieur mais beaucoup plus par la gaine de protection dont il peut être muni, surtout si cette gaine émerge à l'extérieur. La mesure doit être faite assez profondément pour retrouver une zone non perturbée. Si l est la profondeur de l'alésage et r son rayon, suivant le matériau et la température, il faudra un rapport l/r voisin de 10 pour une température supérieure à 800 K dans le cas d'un matériau bon conducteur et supérieur à 20 pour une température inférieure à 800 K dans le cas d'un matériau isolant. Il est assez difficile, avec un montage orthogonal aux isothermes, de pénétrer assez profondément en vue d'une mesure correcte. On essaie alors de placer le capteur dans le plan des isothermes ou tangentiuellement à elles (cas de la figure 2 1b-2b-3b).

On a utilisé le montage des couples thermoélectriques en opposition pour déterminer l'erreur de conduction par les fils métalliques du couple, afin de préciser les profondeurs minimales d'immersion ou d'effectuer les corrections nécessaires [12]. D'une part, soit T la valeur de T_1 qui serait mesurée en l'absence de pertes par conduction. On lirait les tensions $E = E_1 + K\delta E$. En modifiant l'immersion des fils de couple, on lit alors E'_1 et $\delta E'$ reliés par :

$$E = E'_1 + K\delta E'$$

On détermine alors K et E . D'autre part, si l'on place à proximité de T_2 une source de chauffage réglable permettant de rendre

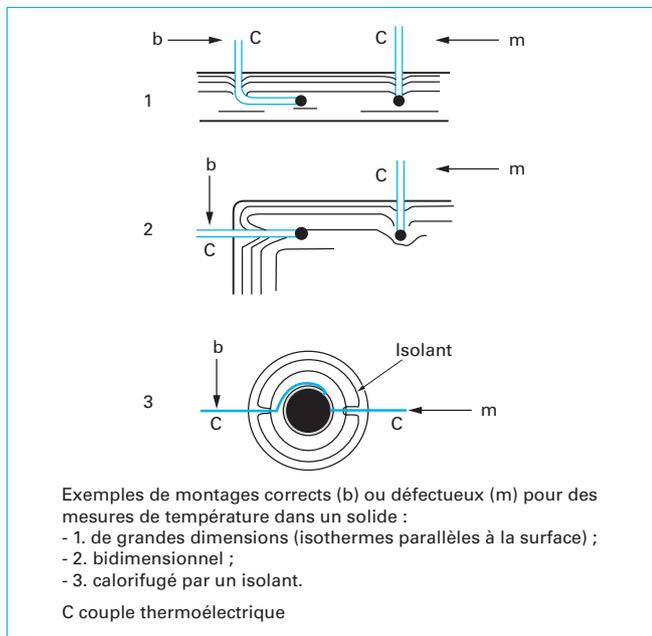


Figure 2 – Perturbation des isothermes par le détecteur

$\delta E = 0$, on annule la perte par conduction et la lecture que l'on effectue est telle que $T_1 = T$. On estime généralement la taille de la zone perturbée par un couple thermoélectrique à environ cinq fois le diamètre du fil.

Enfin on n'oubliera pas l'effet de la résistance thermique de contact entre la surface et le capteur qui perturbe le transfert d'énergie entre le milieu et le capteur.

L'influence propre du capteur (tableau 1) est généralement masquée par la présence de gaines et de protecteurs qui augmentent énormément le temps de réponse. Par exemple, pour un couple thermoélectrique à soudure nue confectionné à partir de fils minces, le temps de réponse est proportionnel au rapport volume/surface et varie à peu près comme le diamètre des fils.

On trouvera la définition précise du temps de réponse et de la constante de temps au § 1 de l'article [R 2517].

La surface d'échange thermique joue un grand rôle au montage. Par exemple, dans un milieu agité, le détecteur monté perpendiculairement au sens de déplacement a une constante de temps 50 % plus faible que dans un montage parallèle à l'écoulement.

L'interposition d'une **gaine protectrice** produit deux effets :

- la gaine seule possède un temps de réponse propre qui peut s'exprimer approximativement par $\tau = e^2/a$ où e est l'épaisseur du tube et a la diffusivité thermique du matériau constitutif. Pour une gaine métallique, généralement mince, τ reste inférieur à 0,1 s. Pour une gaine céramique, τ peut atteindre 2 s pour $e = 1$ mm et 200 s pour $e = 100$ mm. La diffusivité thermique d'un métal se situe entre $1,7 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ pour l'argent et $0,2 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ pour le fer ; pour une céramique, elle sera de l'ordre de $0,1 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$;
- une résistance thermique apparaît entre le capteur et la gaine. Cet effet est d'autant plus marqué que la température est plus basse (absence de rayonnement). On améliore le transfert d'énergie thermique en interposant un milieu bon conducteur à l'intérieur de la gaine (hélium, huile silicone, clinquant d'argent, etc.) et en augmentant la pression au niveau du contact à l'aide d'un ressort qui permet aussi de rattraper les différences de dilatation entre protecteur et détecteur.

Si l'on admet, en première approximation, que l'on peut faire la somme des divers temps de réponse (lorsqu'ils sont du même ordre de grandeur), on prendra comme règle générale :

- pour une enveloppe mince (épaisseur < 1 mm) en silice, porcelaine ou acier : multiplier τ (temps de réponse du capteur nu) par 2, 3 ou 4 ;
- pour une enveloppe épaisse : multiplier τ par 20, 30 ou 40 ;
- si l'élément sensible est appliqué contre l'enveloppe, diviser la valeur totale par 2 ;
- cumuler les valeurs en fonction du nombre d'enveloppes.

On se reportera au tableau 2 pour des valeurs numériques plus précises.

Lorsque la température mesurée est variable dans le temps il faut tenir compte d'une erreur dynamique qui sera une fonction du temps de réponse propre de la chaîne de mesure défini dans le paragraphe 1 de l'article [R 2517]. Le temps de réponse dépend de l'élément sensible (capacité thermique, volume), et du temps de réponse des appareils de mesure.

Les mesures par voie optique ne font intervenir généralement que le temps de réponse de l'appareil de mesure. Cependant, pour les appareils mesurant une énergie, la vitesse de réponse de l'élément sensible est fonction de la quantité d'énergie reçue.

Le temps de réponse global importe seul. Le temps de réponse du thermomètre doit être petit par rapport à la vitesse d'évolution de la température du phénomène observé. Les temps de réponse les plus courts sont obtenus avec des capteurs de petite taille, de diffusivité thermique élevée et présentant relativement à leur dimensions une grande surface d'échange.

Tableau 1 – Influence des dimensions du capteur et de sa nature sur la constante de temps

Capteur et milieu étudié	Dimensions (mm)		Constante de temps τ (s)
	Diamètre du bulbe	Longueur du bulbe	
Thermomètre à mercure (enveloppe de verre) :			
– dans l'eau fortement agitée	4,5 9 13	25 52 40	2,1 4,8 8,7
– dans l'air calme.....	8 16		400 800
Couple thermoélectrique dans l'air calme à 373 K	Diamètre des fils 0,8 1,6 3,2		55 210 300
Couple thermoélectrique enrobé , dans l'eau chaude :	Diamètre de l'élément		
– soudure en contact avec la gaine extérieure	0,25 0,5 1,0		0,003 0,015 0,070
– soudure noyée dans le réfractaire.....	0,5 1,0 2,0		0,035 0,1 0,3
Thermomètre à résistance métallique dans l'eau agitée à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$:			
– gaine cupronickel remplie d'air	Longueur : Largeur : Hauteur :	80 10 2	11
– gaine Pyrex ou quartz remplie d'air.....	Diamètre : Longueur :	7 33	3 à 6
– gaine céramique	Diamètre : Longueur :	2 12	0,5
Couples thermoélectrique pour mesures superficielles jusqu'à 673 K Contact par une pastille d'argent	Diamètre de la pastille d'argent 1 2 5		1 2 4
Film métallique déposé sur un isolant (résistance ou couple thermoélectrique)	Épaisseur : quelques μm Surface : quelques mm^2		Quelques dizaines de μs
Film de platine dans un gaz (montage en anémomètre)	Longueur : 4 mm Diamètre : 1 à 2 μm		

En régime transitoire, on sera tenté de considérer un peu hâtivement que l'indication du thermomètre est stable bien avant que l'équilibre thermique ne soit atteint.

En régime dynamique, une « erreur de traînée » se manifeste. Lorsque la température du milieu varie linéairement avec le temps, on montre que l'écart entre les températures du capteur et du milieu est à tout instant égal au produit de la vitesse de chauffage ou de refroidissement par la constante de temps.

Dans un système réglé, où la température fluctue autour d'une température moyenne, un temps de réponse trop important du capteur engendre un déphasage et un affaiblissement de l'amplitude de la température de l'élément sensible par rapport à la température du milieu. Le détecteur est donc « optimiste » (il indique une stabilité du milieu meilleure qu'elle n'est en réalité) ; si le système de régulation ne comporte pas des actions de réglage intégrale et dérivée, le système risque d'entrer en oscillation entretenues.

Tableau 2 – Influence de certaines conditions de montage sur la constante de temps τ (s) de thermomètres à résistance et de couples thermoélectriques

Thermomètre à résistance	dans l'eau agitée à 0,3 m.s ⁻¹	dans l'air agité à :			
		1 m.s ⁻¹	5 m.s ⁻¹	25 m.s ⁻¹	
– Résistance nue	0,1	5,6	4,1	2,6 (à 10 m.s ⁻¹)	
– Gaine en acier 18-8 Ø = 15 mm ; épaisseur = 0,1 mm					
clinquant en argent	7,5	55	40	16	
clinquant en Inconel.....	32	81	65	42	
– Gaine en laiton Ø = 15 mm ; épaisseur = 0,6 mm					
clinquant en argent	6	38	29	13	
clinquant en Inconel.....	30	67	55	38	
– Gaine en aluminium Ø = 15 mm ; épaisseur = 1 mm					
clinquant en argent	5	30	25	12	
Couple thermoélectrique	dans l'eau agitée à 0,3 m.s ⁻¹	dans l'air agité à :			
		0,3 m.s ⁻¹	1 m.s ⁻¹	5 m.s ⁻¹	25 m.s ⁻¹
Fils de diamètre 0,9 mm					
– nus	< 1	12	8	3	
– gaine en laiton Ø = 16 mm ; épaisseur = 7,5 mm					
soudure isolée de la gaine	76	362	283	171	78
soudure brasée sur la gaine	3	282	144	77	30
Couple commercial dans protecteur en acier Ø = 15 mm ; épaisseur = 3 mm					
fils de diamètre 2 mm	57		220	136	73
Ø (mm) diamètre extérieur					

3. Erreurs liées à l'environnement de la chaîne de mesure

La température d'un corps n'est pas directement accessible ; on l'obtient en graduant la variation d'une grandeur physique, sensible avant tout à des variations de l'énergie d'agitation thermique. Cependant, les grandeurs sélectionnées subissent des modifications non négligeables sous l'effet de grandeurs d'influence autres que la température : par exemple, variation de résistance par tension mécanique à température constante, variation de force électromotrice d'un couple thermoélectrique dans un champ magnétique à température constante, variation d'émissivité d'une surface par oxydation à température constante, champ électromagnétique, humidité importante.

Un champ électrique, magnétique ou électromagnétique peut générer des f.é.m. parasites. Un champ thermique est plus pernicieux. Les piles, résistances étalons, ponts de mesure sont sensibles à la température ambiante et à ses variations. La solution consiste à utiliser des enceintes thermostatées.

L'étalonnage d'un appareil dans un thermostat parfait garantit des mesures ultérieures correctes lorsque celles-ci sont réalisées dans des conditions comparables. Les conditions de mesure sont rarement aussi idéales que lors de l'étalonnage.

Pour les mesures au pyromètre optique, une ambiance lumineuse perturbe les mesures précises. Un détecteur ou un fluxmètre

doit, s'il est appelé à travailler dans un domaine spectral limité, ne recueillir que les seules radiations de ce même domaine spectral, d'où l'utilité des fenêtres ou filtres à radiation pour le préserver des rayonnements parasites extérieurs.

Le temps de réponse dépend du milieu étudié (nature, mode de transfert de l'énergie thermique), du couplage détecteur-milieu (surface d'échange, nature et dimensions des gaines). Dans le tableau 3 sont donnés des ordres de grandeur de temps de réponse pour divers systèmes thermométriques, en fonction des conditions de mesure. Quelques données numériques concernant l'influence du milieu sont reportées dans le tableau 4.

Pour un détecteur de faible inertie, le temps de réponse dans un gaz est au moins dix à vingt fois supérieur à ce qu'il serait dans un liquide peu visqueux tel que l'eau. Dans un liquide visqueux comme une huile, τ est cinq à dix fois plus grand que dans un liquide de meilleure mobilité.

Il n'existe pas de valeurs numériques exploitables dans le cas de milieux solides. Le temps de réponse sera d'autant plus petit que les contacts et le conducteur thermique seront meilleurs.

Pour un détecteur de faible inertie, dans un fluide agité à la vitesse v , T varie à peu près comme $1/v^{1/2}$ avec cependant une vitesse limite.

Lorsque la température mesurée dépasse 1 100 K, le rayonnement devient prépondérant, le régime s'établit plus rapidement. Par exemple, pour un couple thermoélectrique nu dans l'air calme :

- à 500 K : $T = 6$ min ;
- à 750 K : $T = 1$ min ;
- à 1 300 K : $T = 15$ s.

Tableau 3 – Constantes de temps de systèmes thermométriques : ordres de grandeur

Milieu étudié	Couples thermoélectriques nus ou enrobés Résistances spéciales Thermistances	Autres détecteurs de contact	Détecteurs dans une gaine
– Liquides à faible viscosité agités ($> 0,3 \text{ m.s}^{-1}$) – Métaux fondus – Vapeur haute pression – Milieux haute température ($> 1\,100 \text{ K}$)	0,1 à 1 s	1 à 10 s	3 s à 2 min
– Liquides visqueux – Liquides peu agités – Vapeur moyenne pression – Gaz agités (10 m.s^{-1})	0,5 à 10 s	5 s à 1 min	10 s à 10 min
– Gaz peu agités à pression atmosphérique : au-dessous de 600 K au-dessus de 1 100 K	1 à 5 min 10 s à 2 min	5 à 10 min	2 à 30 min 1 à 5 min

■ **Influence du temps** : dans les situations courantes, il faut ajouter à la notion de fidélité intrinsèque d'un appareillage neuf celle de dérive de l'instrument, produite par un vieillissement du capteur sous l'influence de températures élevées ou de cycles thermiques. Ce phénomène souvent irréversible (pollution de couples thermoélectriques) peut parfois être presque réversible (déplacement du zéro d'un thermomètre à enveloppe de verre). Dans le fascicule [R 2518], tableau 2 de ce fascicule, apparaissent des valeurs montrant le comportement de quelques capteurs au cours du temps, regroupées sous l'appellation de *fidélité*. Ces indications sont très fragmentaires, car les données expérimentales restent rares, pour la simple raison que les conditions d'utilisation influent énormément. Il faut donc les considérer comme des ordres de grandeur à manipuler avec précaution.

4. Normes – interchangeabilité

À la notion de « justesse », on peut rattacher les tolérances d'**interchangeabilité** des capteurs imposées par différentes normes françaises ou étrangères pour les systèmes thermométriques démontables, tels que résistances, couples thermoélectriques... Ces tolérances sont données sous la forme d'une erreur relative ou absolue caractérisant la précision intrinsèque du capteur neuf et donc son degré d'interchangeabilité. Les normes ISO donnent, selon le type de thermomètre, une exactitude certifiée. Par exemple, pour un thermomètre à dilatation de liquide dans le verre, l'erreur est inférieure à une division de l'échelle [R2530]. Un fil de thermocouple n'est pas nécessairement étalonné dans les mêmes conditions que celles d'utilisation... Bien entendu, les appareillages de mesure électroniques possèdent aussi leurs propres normes.

Les tolérances des constructeurs sont en général assez larges et, par un étalonnage global, on arrive à améliorer, si le besoin s'en fait sentir, les performances d'un ensemble. À travers un accord avec un constructeur, un appareil peut être sélectionné dans une série et étalonné avec plus de rigueur, en fonction de conditions d'utilisation précises et plus restreintes. Dans ce genre de démarche, il est nécessaire de bien poser le problème. C'est la raison pour laquelle les constructeurs proposent des questionnaires très détaillés. Il faut éviter les incompréhensions, voire même les polémiques, comme le montrent certaines études de tests effectuées aux États-Unis sur des thermomètres industriels à résistance de platine ou en Grande-Bretagne sur des instruments de contrôle [31] [32]. Les désagréments résultant du fait qu'un appareillage ne satisfait pas les tolérances annoncées sont souvent résolus lorsqu'on a su poser clairement ses exigences, car cela aide aussi le constructeur à préciser ses propres conditions d'essai.

Tableau 4 – Influence de la nature et de l'agitation du milieu fluide sur la constante de temps

Détecteur	Nature du fluide	Vitesse de l'agitation (m.s^{-1})	Constante de temps τ (s)
Thermomètre à mercure (à enveloppe de verre)	eau	0	10
		0,1	2,9
		1	2,3
	huile	0	45
		0,01	13
		0,1	6
		1	2,2
	air	0	190
		0,1	128
1		58	
10		40	
Thermomètre à tension de vapeur	eau	0,01	6
		0,1	3
		1	2,2
air	0,1	144	
	2	48	
	6	19	
Thermomètre à résistance	eau	0	20
		0,3	8
	air	1	5
	gaz carbonique 800 K	0	450
Couple thermoélectrique enrobé (diamètre 1 mm)	azote 500 K	3	3
		10	1,5
		100	0,5
eau 373 K		0,1	
	Thermistance	Pression réduite d'air à température ambiante 100 Torr (13 000 Pa) 25 Torr (3 000 Pa)	30
360			
Thermopile chauffée par rayonnement (lunette à rayonnement)	dans l'air		0,07
	dans le vide		1 à 5

Tableau 5 – Ensembles thermométriques de précision pour l'étalonnage par comparaison

Thermomètre à résistance de platine (1) de 14 K à 1 200 K (2)	Couple thermoélectrique platine rhodié 10 %/platine (630 °C à 1 064 °C) (3)	Pyromètre à disparition de filament au-delà de 1 064 °C
<ul style="list-style-type: none"> – Pont de Wheatstone et dérivés, essentiellement montage de Mueller (4) – Potentiomètres (comparateurs de tensions continues) (5) – Comparateurs de tensions alternatives (6) – Comparateurs de courants continus (7) 	Potentiomètres (5)	Égalisation des luminances du filament et de la plage visée : <ul style="list-style-type: none"> – en absorbant une partie du rayonnement à l'aide d'un coin optique ; la luminance du filament reste constante ; seule méthode de mesure absolue ; – en modifiant le courant du filament et en mesurant la tension aux bornes du filament par une méthode potentiométrique (5) ; méthode plus pratique, mais moins précise que la précédente.
(1) Montage de la résistance à 4 conducteurs, pour supprimer l'influence des résistances de liaison. Les plots et curseurs sont étudiés pour réduire les résistances de contact. Élimination des f.é.m. parasites par inversion du sens du courant. (2) Les résistances de platine spécialement montées parviennent à des performances élevées : sensibilité 10^{-4} K, reproductibilité 10^{-4} K, justesse entre deux sondes 10^{-2} K, alors que les tolérances courantes d'interchangeabilité varient de $\pm 0,5$ à ± 5 K entre 450 et 1 100 K (doc., Comptoir Lyon-Alemand Louyot). (3) Les fils thermoélectriques sont les mêmes que ceux de la qualité ordinaire, mais leur montage est plus soigné et l'étalonnage plus serré. (4) Le pont de Mueller permet une très haute précision. Dans les méthodes potentiométriques, on sait stabiliser des courants à mieux que 10^{-5} %, à l'aide d'amplificateurs opérationnels. (5) On compare une f.é.m. inconnue à une f.é.m. de référence. Dans le cas des résistances, on compare la tension aux bornes de la résistance à celle d'une résistance étalon parcourue par le même courant (qui doit être très bien stabilisé). Dans le cas des couples, la f.é.m. thermoélectrique est opposée à une tension étalon (courant nul dans le couple). Montage insensible aux variations de résistance des fils de jonction, mais sensible aux f.é.m. parasites dont l'influence est supprimée par inversion de polarités. Lorsque l'inversion est automatique, on parle parfois de ponts à commutation [33]. (6) Appelés très souvent ponts alternatifs, bien que le principe de la mesure soit plutôt de type potentiométrique. L'avantage essentiel est de supprimer l'erreur des f.é.m. thermoélectriques parasites, la résistance des fils de liaison étant elle-même sans effet. La fréquence comprise entre 3 et 100 Hz produit des phénomènes parasites d'auto-induction dans la résistance thermométrique ; des valeurs très basses, jusqu'à 15 Hz, ont été expérimentées [33] [34] [36]. (7) [37]		

5. Étalonnage – exactitude

Actuellement, on acquiert assez facilement une chaîne de mesure de très bonne qualité. On peut aussi souvent se contenter d'une bonne reproductibilité ou fidélité du système de mesure. Parfois, on recherche une exactitude supérieure à celle proposée par le matériel commercialisé courant. Dans ce cas, on s'assure d'abord que les conditions de la mesure permettent bien l'emploi d'une méthode de mesure plus élaborée donc délicate, de mise en service longue, coûteuse et sujette à de nouvelles causes d'erreur parfois très subtiles. Pour garantir les mesures avec cet instrument, on peut envisager des étalonnages réguliers que l'on soignera d'autant plus que la précision absolue recherchée sera grande.

Lorsqu'on assemble soi-même des éléments disparates, il est préférable d'étalonner la chaîne entière une fois constituée.

Dans tous les cas, on étalonnera toute la chaîne dans des conditions les plus semblables possibles aux conditions d'utilisation : par exemple dans la chaîne radiométrique, on étalonnera dans le même milieu de transmission des rayonnements que celui de la mesure [R 2740].

La fréquence d'étalonnage sera déterminée par l'utilisateur en fonction des conditions d'utilisation. Par commodité, après un étalonnage, on peut aussi définir son propre étalon secondaire stable, bien adapté à la mesure, et y recourir régulièrement pour détecter une anomalie ou une dérive de la chaîne de mesure au cours du temps. Si une anomalie est détectée, on met alors en œuvre l'opération d'étalonnage plus contraignante.

La fréquence d'étalonnage dépend aussi de la précision et des conditions d'utilisation, vieillissement, détérioration... thermocouple maltraité mécaniquement, optique sale, exposition à des températures élevées (vieillessement et pollutions chimiques qui modifie la nature), cyclages thermiques fréquents (mécanique avec les gaines par ex.). Si le matériel est dûment employé l'étalonnage évoluera peu dans le temps.

Ne pas oublier que l'opération d'étalonnage est coûteuse en temps et argent.

Les méthodes d'étalonnage sont celles des métrologistes et, à l'image des spécialistes de la mesure des températures, il faudra être capable d'entretenir cette exactitude au cours du temps en pratiquant l'étalonnage fréquent des détecteurs et des chaînes de lecture : c'est-à-dire soit posséder ses propres moyens de vérification, soit faire appel à un centre d'étalonnage officiel. Pour avoir un aperçu de ces méthodes, on consultera l'article *Étalonnage et vérification des thermomètres* [R 2520] dans le présent traité.

Des installations de haute précision sont disponibles dans le commerce. Leur acquisition ne pose pas de problèmes particuliers, sinon le coût de l'opération. Des dispositifs comportant des cellules de mesure de tailles diverses sont commercialisés. De pas oublier qu'il est aussi important dans le choix d'un cryostat ou d'un four de connaître le gradient spatial que la précision dans le temps et la précision de la régulation. La réponse d'un capteur inhomogène sera en effet différente selon le champ de température.

Dans l'étalonnage par comparaison, suivant la gamme de température envisagée, on choisira les instruments standards : la résistance de platine, le couple thermoélectrique Pt-Rh10 % /Pt, le pyromètre à disparition de filament. Dans chacun de ces instruments, la mesure s'effectue par une méthode de zéro soit électrique, soit optique. Dans le tableau 5 sont portées quelques indications essentielles, que l'on complètera par la lecture des articles spécifiques à ces capteurs.

Certains constructeurs sont en mesure de pratiquer de telles vérifications. Si vous êtes à la recherche d'un laboratoire accrédité susceptible de réaliser certains essais, vous pouvez consulter le site du Cofrac (Comité français d'accréditation) <http://www.cofrac.fr>. La norme internationale ISO 17025 établit les exigences générales de compétence pour effectuer des essais et/ou des étalonnages, y compris l'échantillonnage. Elle couvre les essais et les étalonnages effectués au moyen de méthodes normalisées, de méthodes non normalisées et de méthodes élaborées par les laboratoires.

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 zirconie 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 sécheurs 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-onde.* 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).

LECORDIER (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