



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Réf. : **R2516 V2**

Mesure des températures - Questions à se poser avant la mesure

Date de publication :
10 mars 2009

Date de dernière validation :
25 juin 2018

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

par **Jacques ROGÉZ, Jean LE COZE**

Résumé La mesure de température requiert une réflexion en amont, permettant de déterminer une chaîne de mesure. Ce choix de la chaîne de mesure se fait à partir de deux données : tout d'abord, la mise en évidence du problème que la mesure de température tente de résoudre ; puis en fonction des conditions et des contraintes constatées, le choix des instruments adaptés à cette mesure. Cet article rappelle en quelques définitions les notions de température et d'énergie thermique, mais aussi les diverses formes de transfert de cette énergie, indispensables à la compréhension du procédé. Est ensuite fourni un guide complet des principales questions qu'il est nécessaire de se poser avant une mesure, pour une bonne utilisation des instruments et la garantie d'un résultat satisfaisant.

Abstract Temperature measurement requires an upstream reflection in order to determine a measurement chain. The choice of a measurement chain is based upon two sets of data: the identification of the issue that the temperature measurement attempts to address and the choice of the instruments adapted to this measurement according to the observed conditions and constraints. This article recalls, with a couple of definitions, the notions of temperature and thermal energy which are essential to the understanding of the process. It then provides an exhaustive list of the questions which have to be asked before proceeding to a measurement in order to ensure the sound usage of the instruments and a satisfactory result.

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**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Mesure des températures

Questions à se poser avant la 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'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. Température et énergie thermique	R 2 516v2 - 2
1.1 Relation température-énergie	— 2
1.2 Température et équilibre thermique	— 2
2. Diverses formes de transfert de l'énergie thermique	— 2
2.1 Conduction	— 3
2.2 Rayonnement	— 3
2.3 Convection	— 4
3. La température : grandeur mesurable	— 5
4. Position du problème de la mesure de température	— 5
Pour en savoir plus	Doc. R 2 516v2

Avant de passer à la mesure de température elle-même, il est bon de se poser un certain nombre de questions et d'y répondre au mieux. Le choix d'une chaîne de mesure comprend deux étapes : d'abord bien cerner le problème que la mesure de la température permettra de résoudre en définissant les conditions de cette mesure. Ensuite, choisir l'instrument qui permettra le meilleur compromis parmi les diverses contraintes. Après le rappel de quelques définitions succinctes mais indispensables à la compréhension du fonctionnement des instruments de mesure de la température et de leur bonne utilisation, cet article fournira un guide des principales questions qu'il faut se poser avant la mesure.

1. Température et énergie thermique

1.1 Relation température-énergie

La métrologie des températures, à l'évidence une des plus utiles qui soit, est une illustration extraordinaire de la nécessité de compréhension fondamentale rationnelle des phénomènes qui sont souvent d'abord appréhendés par nos sens. Communément, la notion de « température » nous apparaît avec celle de chaud et de froid. Les premiers « thermoscopes » étaient d'ailleurs gradués en domaines « très chaud, chaud, tempéré, froid et très froid » [1] [2] [7].

En **thermodynamique**, la température fut introduite en 1824 avec la notion de « machine thermique parfaite » décrite par un cycle de Carnot, où un rapport de températures est défini par un rapport d'énergies. La thermodynamique abstraite, que l'on peut déduire des principes, décrit les phénomènes mais ne les explique pas ; la structure de la matière elle-même peut être ignorée.

La **physique statistique** a une démarche différente et fait apparaître certaines grandeurs, telles que l'énergie et l'entropie, de manière plus concrète. En physique statistique, la température thermodynamique T n'intervient que sous la forme du produit kT (k constante de Boltzmann). C'est un paramètre d'essence purement mathématique, permettant de décrire la distribution de l'énergie thermique parmi les différents degrés de liberté associés au système étudié [3]. Le produit kT a la dimension d'une énergie ; par conséquent, si l'on pose que k est sans dimension et égal à 1, la mesure de la température sera une énergie. Cette démarche aboutit au même résultat que celle des physiciens du XVIII^e siècle qui graduaient la température en « degrés de chaleur », c'est-à-dire que kT est pris comme mesure de la température. Les physiciens écrivent de cette manière que 1 eV correspond à 11 605 K. Une autre approche possible est de postuler que l'on peut définir la température d'un corps. C'est le « principe zéro » de la thermodynamique formulé en 1931 [4].

L'**énergie**, qui est une notion somme toute difficile à concevoir, revêt différentes formes élémentaires décrites dans des domaines scientifiques spécifiques : mécanique, électricité, chimie, thermique, magnétisme, etc. La conversion de l'énergie d'une forme à une autre est décrite dans les domaines de la science qui couplent les domaines d'investigation élémentaires, par exemple : l'électrochimie, la thermodynamique, la thermochimie, l'électromagnétisme... La quantité globale d'énergie est toujours conservée (premier principe de la thermodynamique). Les domaines élémentaires peuvent être décrits à partir d'un même schéma, à savoir une grandeur intensive, une grandeur extensive et un champ spécifique à ce domaine.

La **température est une grandeur intensive**, c'est-à-dire qu'elle traduit un état du système étudié au même titre qu'une tension électrique, une altitude, un potentiel chimique, etc. On peut comparer les valeurs d'une grandeur intensive de deux systèmes, mais on ne peut pas en faire la somme. La grandeur intensive est un potentiel d'où dérive un champ, thermique, électrique, de gravité, chimique... À la grandeur intensive est associée une grandeur extensive qui, selon l'expression de De Ricker [5], est la « substance » de l'énergie. Elle est, en thermique, l'**entropie** ; en électricité, la charge ; en mécanique, la masse ou en chimie, le nombre de moles. Le produit des deux grandeurs associées est une énergie. On définit la force comme le produit de la grandeur extensive par le champ. En thermique, on appréhende directement par les sens la grandeur intensive (la température) et très mal la grandeur extensive (l'entropie), alors qu'en mécanique ou en électricité c'est la force et la grandeur extensive (masse ou charge électrique) qui apparaissent tout d'abord à nos sens comme les grandeurs tangibles. On trouvera peut-être ici la raison de la difficulté à définir la température par rapport aux autres grandeurs thermiques moins intuitives.

1.2 Température et équilibre thermique

Tout système soumis à des conditions extérieures constantes et uniformes évolue vers un **état d'équilibre** qu'il ne peut plus ensuite quitter spontanément. Ses **variables d'état** demeurent alors constantes au cours du temps. Deux corps sont en équilibre lorsque l'énergie qu'ils échangent est globalement nulle. Pour la mesure de température, les deux conditions suivantes en découlent.

■ Lorsque l'on mesure la température d'un corps, on doit supposer et, s'il y a lieu, vérifier que sa température est uniforme. De manière pratique, les variations de température à l'intérieur du corps doivent être petites à l'échelle des dimensions du capteur ou très lentes vis-à-vis de son temps de réponse. Un thermomètre introduit dans un milieu thermiquement très hétérogène fournira une indication qui ne pourra pas toujours être traduite en température sans de grandes précautions. Il faut donc, en premier lieu, **réaliser un équilibre thermique entre capteur et milieu étudié** dans le cas très courant des capteurs par contact.

■ Dans une chaîne de mesure, une fraction d'énergie est prélevée sur le système et transformée en énergie mécanique, électrique, chimique... Tout le long de la chaîne, plusieurs formes distinctes d'énergie peuvent être rencontrées. Si elle est bien conçue, la chaîne de mesure prélève un minimum d'énergie qu'elle amplifie jusqu'à un niveau suffisant pour mettre en action un organe de lecture comme une aiguille, un afficheur numérique ou une plume d'enregistreur. **La mesure doit donc déstabiliser le moins possible l'équilibre du système.** Cette condition est nécessaire aussi bien pour les mesures par contact que pour les mesures utilisant un rayonnement.

2. Diverses formes de transfert de l'énergie thermique

L'énergie thermique tire son origine principalement de la vibration des atomes et des électrons. Elle est transmise d'un point à un autre de l'espace de diverses manières.

■ Les atomes interagissent avec leurs proches voisins et peuvent ainsi propager l'énergie par un phénomène de **conduction**. Dans le cas des solides où les atomes sont organisés en réseaux, la vibration collective ainsi engendrée est traduite par la notion de « **phonon** » qui est la particule transportant l'énergie de conduction. La conduction atomique est d'autant plus faible que les forces de liaison entre atomes sont plus faibles. Par exemple, la conduction à travers un gaz est plus faible que celle au travers d'un liquide ou d'un solide. Dans le cas des métaux, où les électrons sont délocalisés, une part de l'énergie thermique est transférée par conduction à travers le « gaz d'électrons ».

■ De plus, tout corps est source de rayonnement et cela d'autant plus que sa température est plus élevée. Le support de transmission de l'énergie est alors le **photon** : il s'agit d'un transfert par **rayonnement**.

■ La **convection** est un transport d'énergie thermique par un fluide en mouvement qui vient ensuite la céder par conduction à une paroi dont la température est différente de celle du fluide.

Dans la pratique, ces trois formes de transfert de l'énergie thermique (conduction, rayonnement, convection) sont présentes simultanément. À ce titre, la distinction par exemple entre fluxmètres par conduction et fluxmètres par rayonnement est arbitraire. On peut cependant, en première approximation, selon la nature du milieu étudié et la gamme de température de travail, considérer (si possible après un calcul justificatif) que l'un des modes de transfert est prépondérant, c'est-à-dire qu'il véhicule la part la plus importante de l'énergie mise en jeu.

2.1 Conduction

Soit un milieu matériel présentant un gradient thermique dans une direction donnée $\partial T / \partial x$. L'équation de Fourier exprime qu'il y a proportionnalité entre le flux d'énergie thermique Φ traversant une unité de surface orthogonale à cette direction et le gradient à un instant donné. Le coefficient de proportionnalité λ (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) est la **conductivité thermique** du matériau dans la direction considérée :

$$\Phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

La forme de l'équation de transfert implique un **phénomène de diffusion** dans le transport de l'énergie. Si l'énergie se propageait directement sans dispersion au sein de l'échantillon, l'expression du flux thermique ne dépendrait pas du gradient local mais de la simple différence de température entre les extrémités de l'échantillon. En conséquence, la conductivité thermique dépend de la **nature** et de la **concentration** en éléments susceptibles de diffuser l'énergie thermique. Dans les solides, les défauts cristallins, les joints de grains, les impuretés et, plus macroscopiquement, la microstructure (présence de phases diverses, porosité, précipités, inclusions, composites, fibres) modifient notablement la conduction thermique. Dans les milieux anisotropes comme le graphite, la conductivité peut être très différente selon la direction cristallographique considérée.

La conductivité thermique d'un alliage métallique n'obéit généralement pas à une loi d'additivité des conductivités thermiques des constituants. Les traces d'impuretés la diminuent notablement. La présence de pores peut diviser par dix la conductivité d'un matériau. Pour obtenir des valeurs précises sur un matériau industriel complexe du point de vue chimique et structural, il est peu prudent d'extrapoler les valeurs de conductivité mesurées sur des matériaux purs. En général, une mesure sur un échantillon du matériau réel s'impose.

■ La conductivité thermique varie avec la température

Pour les **matériaux cristallins non métalliques** (absence d'électrons de conduction), la conductivité thermique passe par un maximum qui se situe entre quelques kelvins et 200 à 300 K, selon les matériaux considérés, puis décroît en $1/T$ au-delà de ce maximum. C'est la conductivité thermique de réseau, influencée par les défauts et les joints de grains, qui explique cette variation.

Pour les **matériaux métalliques**, on observe la même évolution aux températures inférieures à 200 K. Cette évolution est principalement imputable à un processus de diffusion par les défauts. Le gaz d'électrons, caractéristique des métaux, impose une évolution de la conductivité thermique proportionnelle à la température au-delà de la température ambiante. Le coefficient de proportionnalité est généralement négatif (exception, par exemple, pour le nickel), il en résulte que la conductivité thermique décroît lorsque T augmente jusqu'au point de fusion.

La conductivité des **milieux non cristallins** est moins bien connue que celle des milieux présentant un ordre à longue distance ; elle croît généralement avec la température.

Parmi les **solides**, à 300 K, les éléments les plus conducteurs sont métalliques hormis le diamant : l'argent et le cuivre ($400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Le fer fait partie des métaux purs les moins conducteurs ($70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). L'aluminium a une conductivité de $240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Certaines céramiques massives ont une conductivité comparable à celle du fer (magnésie : $75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; alumine : $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Toujours à 300 K, la plupart des céramiques (zircone par exemple) et les solides amorphes à base de silice présentent une conductivité beaucoup plus faible, de l'ordre de $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. À un ordre de grandeur inférieur, on trouve les solides d'origine organique (Altuglas $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

La conductivité thermique des **liquides** est plus faible que celle du solide correspondant ; par exemple, le cuivre liquide : $\lambda = 13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 1 350 K, l'aluminium liquide : $\lambda = 92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

à 1 000 K. La conductivité thermique de l'eau est de $0,57 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 274 K et de $0,68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 373 K.

Citons encore, à température ambiante, l'alcool éthylique ($0,018 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), la glycérine ($0,288 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), l'éther ($0,141 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et signalons l'exception notable que constitue l'hélium liquide (^4He) dont la conductivité est de l'ordre de $0,019 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour la variété He I et qui atteint $5 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour l'hélium superfluide He II au-dessous de 2 K, traduisant ainsi le caractère supraconducteur thermique de cet état.

La conductivité thermique des **gaz** est généralement très faible : à 300 K, on a les valeurs suivantes :

- air : $\lambda = 0,018 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- azote $\lambda = 0,024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- oxygène $\lambda = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- monoxyde de carbone $\lambda = 0,014 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- hydrogène $\lambda = 0,142 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- hélium $\lambda = 0,129 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Lorsque le gradient thermique évolue dans le temps, la loi de propagation est régie par l'équation dite « **de conduction de l'énergie thermique** ». En géométrie monodimensionnelle selon une direction x , l'équation, simplifiée en admettant constant le paramètre $a = \lambda / \rho \cdot c_p$ dans le domaine de température considéré, s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}$$

avec λ conductivité thermique,

ρ masse volumique,

c_p capacité thermique massique à pression constante.

Cette équation est obtenue en écrivant, à l'instant t , le bilan thermique dans un élément de volume.

a est la **diffusivité thermique** du matériau selon la direction x et s'exprime en $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Elle traduit l'aptitude du matériau à transférer l'énergie et à l'emmagasiner. Dans la pratique, la plupart des problèmes thermiques ne sont pas stationnaires et c'est la diffusivité qui intervient dans les calculs. Pour 300 K, donnons quelques ordres de grandeur :

- argent : $a = 1,7 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- hélium (1 atm) : $a = 1,5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- aluminium : $a = 0,86 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- plomb : $a = 0,25 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- platine : $a = 0,25 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- fer : $a = 0,20 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- alumine : $a = 0,1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- magnésie : $a = 0,1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- mercure : $a = 0,044 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- zircone : $a = 0,007 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.2 Rayonnement

Ce paragraphe ne contient que des généralités sur le rayonnement de solides. Pour plus de détails, on se reportera à l'article spécialisé : *Pyrométrie optique* [R 2 610] des Techniques de l'Ingénieur, base Archives Analyse/Mesures et à l'article *Thermographie. Principes et mesure* [R 2 740] dans la base documentaire Mesures physiques. Pour le rayonnement des gaz, on se reportera à l'article [R 2 750]. Quelques définitions et relations importantes de la théorie du rayonnement thermique qui aideront à la compréhension de termes utilisés par la suite, sont rappelées ici.

L'émission totale d'une source est mesurée par la puissance rayonnée sur tout le spectre de fréquence, c'est-à-dire par la quantité d'énergie qu'elle rayonne par unité de temps à travers l'espace qui l'entoure. Elle s'exprime en watts. L'énergie dW émise par une surface dS dépend de la direction de l'émission S_x et de l'angle solide considéré $d\Omega$ (figure 1). On définit la **luminance énergétique totale** L_e de la source dans la direction S_x par :

$$dW = L_e \cos \alpha \, dS \, d\Omega$$

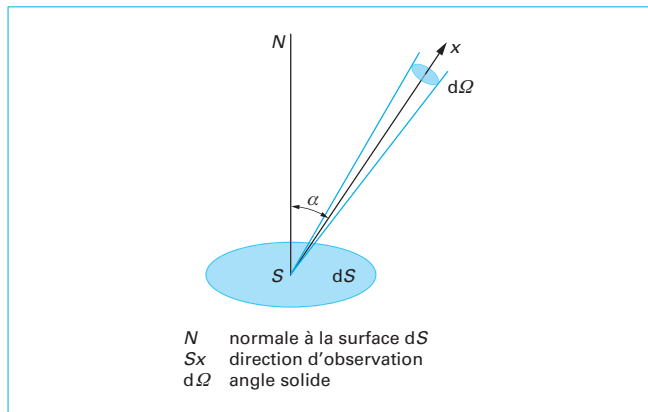


Figure 1 – Rayonnement d'une surface dS

L_e ne dépend que de la nature et de la température de la source. Cette luminance peut être décomposée sur tout le spectre en une somme de luminances énergétiques monochromatiques L_λ (l'indice λ désigne la longueur d'onde considérée).

L'énergie reçue par un corps est soit **réfléchi**e selon les lois de la réflexion spéculaire, soit **diffusée**, c'est-à-dire qu'elle est renvoyée dans toutes les directions, soit **transmise**, c'est-à-dire qu'elle pénètre le corps en subissant une atténuation plus ou moins forte dans la traversée de ce corps. Le rapport entre l'énergie spectrale absorbée et l'énergie spectrale incidente est l'**absorptivité spectrale**. Celle-ci est indépendante de l'énergie incidente et reste inférieure à 1. Elle dépend de la direction, de l'angle solide du rayonnement incident, de la longueur d'onde et de l'état de surface.

On montre que, pour une même direction et une même longueur d'onde, à une température donnée, le rapport entre la luminance spectrale énergétique et l'absorptivité spectrale en un point de la surface d'un corps est constant. Ce rapport est indépendant de la nature du corps, du point choisi et de la direction étudiée. Il ne dépend que de la température et de la longueur d'onde choisie (**loi de Kirchhoff**).

D'où l'intérêt de définir, pour le rayonnement thermique, un corps de référence comme le corps dont l'absorptivité est égale à 1 pour toutes les longueurs d'onde et toutes les incidences. Ce corps, appelé « **corps noir** », absorberait toutes les radiations qu'il reçoit. L'application des lois de la thermodynamique permet de montrer que l'énergie totale W rayonnée par unité de surface du corps noir dans toutes les directions et sur toutes les longueurs d'onde par unité de temps est proportionnelle à la puissance quatrième de la température (**loi de Stefan**) :

$$W = \sigma T^4$$

Le coefficient de proportionnalité σ est appelé « constante de Stefan-Boltzmann » et est égal à $5,67 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$. La répartition de cette énergie en fonction de la longueur d'onde est établie par la **formule de Planck**. À une température donnée, l'énergie émise est maximale pour une longueur d'onde spécifique. La **loi de Wien** prévoit le déplacement, avec la température, de la longueur d'onde correspondant à ce maximum.

Pour un corps réel, la luminance spectrale énergétique est plus faible que celle du corps noir. Le rapport entre ces deux luminances est l'**émissivité spectrale directionnelle** du corps considéré. Elle est toujours inférieure à 1. Si l'émissivité spectrale est indépendante de la direction, l'élément de surface qui émet l'énergie est alors qualifié de « monochromatiquement diffus ». Si elle est indépendante de la longueur d'onde, le corps est dit « directionnellement gris ». Si les deux propriétés sont réunies, le

corps est qualifié de « diffusionnellement gris » ou simplement de « gris ». Dans la pratique, cette dernière propriété est le plus souvent admise lors des échanges par rayonnement entre deux surfaces dont les émissivités totales et les températures thermodynamiques sont respectivement ε_1 et ε_2 , T_1 et T_2 . L'énergie échangée est alors proportionnelle à :

$$w = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Dans le cas encore plus particulier du corps noir où $\varepsilon_2 = 1$ et dans le cas d'un petit écart de température, cette quantité s'écrit, en première approximation $w = 4 \sigma \varepsilon_1 T_m (T_1 - T_2)$, T_m étant une température intermédiaire entre T_1 et T_2 peu différente de $(T_1 + T_2)/2$. La quantité $h_r = 4 \sigma \varepsilon_1 T_m$ est habituellement désignée sous le nom de « coefficient de rayonnement ».

De manière générale, l'émissivité est, comme l'absorptivité, extrêmement sensible à l'état de surface ; outre qu'elle augmente lorsque l'on s'éloigne du poli optique, toute modification physico-chimique, tout dépôt additif la modifie dans de larges proportions. Ainsi, la valeur de l'émissivité hémisphérique totale relative au fer à 300 K est de 0,15 dans le cas d'un poli mécanique, 0,05 dans le cas d'un poli électrolytique, 0,43 dans le cas d'un usinage par simple tournage. Par ailleurs, une couche d'huile de 25 μm d'épaisseur déposée sur la face polie électrolytiquement suffit à multiplier l'émissivité par 5 ; une couche d'huile de 100 μm d'épaisseur conduirait à la valeur de 0,72 qui est sensiblement celle de l'huile.

2.3 Convection

Le fluide concerné peut être un liquide, un gaz ou un solide fluide sous forme de petites particules. Un calcul exact nécessite la résolution de systèmes d'équations aux dérivées partielles non linéaires et couplées que les mécaniciens des fluides traitent par des méthodes numériques dans les cas complexes ou nécessitant une précision des résultats élevée. Dans les cas géométriquement simples, la pratique courante est d'employer des formules établies empiriquement, que nous allons exposer très succinctement.

Si l'on désigne par Φ le flux thermique par unité de surface de contact et par $(T_1 - T_2)$ l'écart entre les températures moyennes de la paroi d'échange et du fluide au contact, le coefficient d'échange de convection h_c (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) se définit au moyen de la relation :

$$\Phi = h_c (T_1 - T_2)$$

On distingue la convection naturelle de la convection forcée.

Convection naturelle : le mouvement du fluide est dû aux variations de sa masse volumique, consécutives aux échanges d'énergie thermique entre le fluide et la paroi. Si le régime est laminaire, le coefficient h_c est donné par l'expression :

$$h_c = A' (T_1 - T_2)$$

où A' est un coefficient empirique dépendant de la forme, des dimensions de la surface, de son orientation et de la nature du fluide. A' est communément compris entre 1 et 10 en unités SI.

Dans des cas de mouvement intense naturel, la convection peut être turbulente et l'expression précédente n'est plus valable.

Convection forcée : le mouvement du fluide est ici imposé. On distingue deux régimes d'écoulement.

- Dans l'écoulement laminaire, les filets du fluide sont parallèles entre eux et à la paroi considérée. L'énergie thermique est alors transférée par conduction pure dans la masse du fluide et entre la paroi et le filet directement adjacent. Mais le flux d'énergie

thermique est augmenté par rapport à une conduction pure dans un milieu fixe, du fait de la circulation du fluide.

- Dans le régime turbulent qui se définit par opposition au régime laminaire, s'ajoute l'agitation par turbulence des molécules à une échelle beaucoup plus étendue que l'agitation moléculaire de la théorie cinétique. En mécanique des fluides, on caractérise le fluide par des nombres sans dimension (nombre de Prandtl, de Reynolds, etc.). Ces nombres contiennent des informations sur le fluide telles que conductivité et capacité thermiques, coefficient de dilatation, vitesse, masse volumique, viscosité, et des informations sur le contenant. Les coefficients de convection sont des produits plus ou moins complexes de ces nombres sans dimension, affectés d'un exposant.

3. La température : grandeur mesurable

La température ne devient mesurable que si l'on définit une unité et une référence. Les degrés de température uniquement repérables et rattachés à des échelles différentes (Fahrenheit, Réaumur, Celsius) ont été finalement remplacés, lors des diverses conférences internationales du Bureau international des poids et mesures (BIPM), par le kelvin (K) et le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$), symboles d'une grandeur mesurable [6].

La définition de la température est fondée sur les lois thermodynamiques et sur la convention d'assigner la valeur 273,15 K au point triple de l'eau. La représentation utile de ces températures thermodynamiques est fournie par l'approximation de l'**échelle internationale de température de 1990 (EIT-90)** dans laquelle on fixe la température d'un certain nombre de phénomènes physico-chimiques (points d'ébullition, de congélation, etc.), de façon à faire coïncider au mieux, c'est-à-dire dans les limites actuelles de l'expérimentation, les températures thermodynamique et pratique. L'EIT-90 est graduée en kelvins ou en degrés Celsius. Les intervalles de température se notent en kelvins.

Pour obtenir cette graduation, il est nécessaire de posséder au moins un appareil de mesure dont le comportement suit une loi simple. Dans l'EIT-90, les instruments d'interpolation mettent en jeu divers phénomènes physiques :

- de 0,65 K à 5,0 K : pression de vapeur saturante de ^3He et ^4He ;
- de 3,0 K à 24,556 K : thermomètre à gaz hélium ; formules d'interpolation spécifiées entre trois points fixes conventionnels ;
- de 13,803 K à 961,78 $^{\circ}\text{C}$: thermomètre à résistance de platine ; formules d'interpolation spécifiées entre des points fixes conventionnels ;
- au-delà de 961,78 $^{\circ}\text{C}$: loi du rayonnement de Planck.

Pour plus de détails, on consultera l'article *Échelle internationale de température : EIT-90* [R 2 510] dans le présent traité.

4. Position du problème de la mesure de température

La sophistication des instruments proposés dans le commerce tend bien souvent, et malheureusement, à aggraver le défaut d'analyse préliminaire du problème. Les chaînes de mesure modernes où un afficheur numérique fournit une indication avec cinq ou six chiffres peut mettre par exemple en confiance l'expérimentateur non averti. Ces chaînes sont généralement très bien conçues et possèdent souvent un jeu de filtres qui stabilisent l'indication. Dans certains cas, cet amortissement est très utile,

mais inconsidérément utilisé il ne donne que l'illusion d'une grande stabilité et d'une grande exactitude de la grandeur mesurée. Il est donc indispensable de préciser au mieux les conditions caractéristiques de la mesure envisagée. On se posera les questions suivantes :

■ La mesure de la température est-elle vraiment nécessaire ?

Pourquoi a-t-on besoin d'une mesure de température et, corrélairement, dans quelle mesure cette opération est-elle nécessaire ?

Si l'objectif principal d'une mesure est de quantifier de façon indirecte une propriété d'un produit donné, il est plus souhaitable de **mesurer directement cette propriété**. Cela est rarement possible dans la pratique industrielle. Cependant, il est important de réfléchir à la façon d'adapter au mieux les moyens de mesure aux impératifs de production. Mis à part certaines études de laboratoire où l'on étudie l'évolution d'un phénomène en fonction de la température, il n'est pas toujours évident que cette grandeur soit indispensable en elle-même : elle intervient souvent comme paramètre de réglage d'une fabrication, dans un ensemble de contrôle ou d'alarme. De ce fait, qu'il s'agisse de régler une fabrication ou, à la limite, une température, il faut se demander s'il est indispensable de passer par l'intermédiaire d'un système thermométrique. Dans certains cas, on peut gagner en simplicité ou en efficacité en mesurant une autre grandeur, plus directement liée à l'opération en cours.

Exemples : lors de la cuisson du sucre, on obtient en fonction de la température atteinte une diversité de produits que le confiseur met à profit dans son travail. C'est souvent en prélevant un échantillon en cours de cuisson, en le trempant et en examinant sa consistance, que l'on est sûr d'avoir atteint le résultat escompté.

L'exemple du fondeur en métallurgie est classique : l'expérience intégrant un grand nombre de paramètres, parfois non mesurables simultanément, permet au métallurgiste chevronné de déterminer avec grande précision le moment opportun de couler le métal. La mesure de la température, qui, d'ailleurs, présente des hétérogénéités non négligeables dans ce cas particulier, n'est effectuée que localement vis-à-vis du volume généralement mis en jeu et n'est interprétable dans le processus de transformation qu'après une série de tests.

Dans certaines entreprises, on gradue délibérément les thermomètres dans une échelle arbitraire (par exemple de 0 à 100). Dans le cas de simples contrôles de procédés, cette démarche est tout à fait acceptable.

En définitive, avant d'installer un thermomètre, il faut être certain que l'efficacité maximale sera obtenue par une mesure ou un contrôle de la température.

■ Où effectuer la mesure ?

Ce problème est semblable à celui de l'échantillonnage, bien connu des laboratoires d'analyse et de contrôle : il est inutile de mettre en œuvre des méthodes ultra-précises sur un échantillon non représentatif. Par exemple, l'exploration préalable à l'aide d'un appareillage simplifié permet d'éviter des tentatives de mesures à 0,1 K près dans un milieu que l'on a supposé stable et uniforme, alors qu'à l'évidence il fluctue de plusieurs degrés.

Les milieux d'intérêt courant n'étant pas isothermes, sauf dans quelques cas spéciaux proches de l'idéalité, un seul capteur placé au hasard ne fournira que des indications plus dangereuses qu'utiles. Cependant, à moins de multiplier les instruments de mesure, c'est-à-dire d'augmenter l'encombrement, le coût et la complexité d'utilisation, il faudra se contenter de quelques capteurs disposés aux points clés de la fabrication.

Il serait plus rigoureux d'étudier les **gradients de température** et de choisir ensuite les zones les plus représentatives de la distribution de température. Cette démarche peut s'avérer trop lourde, trop chère et d'une efficacité médiocre. Des considérations simples

sur la géométrie du milieu étudié et une analyse des transferts thermiques permettent d'ailleurs de simplifier le problème. Des mesures de moyennes de températures sont également susceptibles de fournir des réponses approchées tout à fait satisfaisantes.

Il ne faut pas oublier que **le détecteur perturbe le champ de température** au point de mesure. Par exemple, un perçage à l'intérieur d'un solide perturbe les isothermes. On constate que l'utilisation de détecteurs nus améliore considérablement les contacts thermiques, mais favorise d'autant plus les contacts électriques parasites. Si la température est stable, la perturbation créée par le détecteur peut être notable lorsque les variations d'un point à un autre ne sont pas négligeables. On verra dans les paragraphes suivants que, moyennant un choix judicieux de la nature du détecteur et des gaines et de leur disposition dans le champ thermique, cet inconvénient peut être évité.

La zone de mesure est-elle facilement accessible ? Par exemple, cœur d'un réacteur nucléaire, électrodes de bougies d'allumage ou soupapes d'un moteur, pièces en traitement dans un four, cylindres en rotation de papeterie ou de laminier, acier en coulée continue, plastiques en extrusion, verre fondu, gaz, flammes, etc. Dans certains cas, seule la surface de la pièce sera accessible. On se demandera alors si la température de surface même mesurée correctement est représentative de la température au cœur.

Le point de mesure n'est-il pas trop éloigné des indicateurs ? Bien évidemment, plus la distance augmente, plus il est difficile d'obtenir une exactitude correcte, car des parasites électriques, des résistances de ligne, des corrections d'espaces nuisibles, des absorptions par rayonnement apparaissent.

La chaîne de mesure doit-elle être mobile ? Sera-t-elle montée en place ou sera-t-elle destinée à la mesure dans diverses conditions ?

Le milieu de mesure peut être **agressif** : agressivité chimique (corrosion et destruction des gaines et capteurs), mécanique (chocs, vibrations, pressions importantes), thermique (chocs thermiques, cyclages répétés), électromagnétique, rayonnement nucléaire. Il faut prévoir des gaines et des protections en conséquence et se poser la question des mesures continues ou intermittentes. Un entretien périodique de la chaîne de mesure est d'autant plus nécessaire.

Les conditions de la mesure réelle doivent se rapprocher le plus possible de celles des mesures effectuées en métrologie, bien que la réalité industrielle ne le permette pas complètement. Les mesures par rayonnement doivent se rapprocher des conditions de corps noir.

Les profondeurs d'immersion des thermomètres de contact doivent être respectées au mieux.

Dans le tableau 1 sont résumées les questions complémentaires qu'il faut se poser pour répondre à la question « où ? ».

■ À quel instant effectuer la mesure ?

Trois aspects sont à considérer :

Les points de mesure restent-ils représentatifs au cours du temps ? Par exemple, une variation de la température moyenne de travail d'un four modifie son champ thermique. Si, à un instant donné, le capteur est situé à l'endroit le plus chaud, il ne l'est plus nécessairement pour une température différente. L'information fournie par le capteur aura une signification différente vis-à-vis de la température du point le plus chaud par exemple.

Le capteur est-il en équilibre thermique avec la zone de travail ou présente-t-il un retard ? Ce retard est-il suffisamment faible pour que la mesure garde un sens ? Le paramètre essentiel est alors la vitesse de variation de la température comparée au temps de réponse de l'ensemble capteur + milieu étudié. On n'oubliera pas que, dans les constantes de temps du détecteur, entrent en jeu celles des gaines et enveloppes qui l'isolent du milieu de mesure.

Une surveillance continue est-elle nécessaire ou bien des mesures espacées dans le temps suffisent-elles ? Il n'est pas tou-

jours possible d'effectuer des mesures permanentes à cause du capteur qui, soit se détruit lors de la mesure (cas des repères thermométriques, des sondes utilisées dans les bains liquides), soit vieillit rapidement (cas particuliers des mesures aux températures supérieures à 1 000 K et dans les milieux agressifs). Il s'agit, dans ce dernier cas, de préserver le capteur en l'exposant le moins longtemps possible au contact du milieu étudié. Une exactitude élevée (par exemple 0,1 %) est souvent incompatible avec une surveillance continue. Les contrôles continus sont pilotés par des ordinateurs reliés aux capteurs nécessairement analogiques par des convertisseurs analogique-numérique qui présentent souvent une part importante dans le coût de la chaîne de mesure.

■ Quelle exactitude rechercher ?

On se reportera aux procès-verbaux du Comité des poids et mesures [6], et aux articles *Echelle internationale de température : EIT 90* [R 2 510] et *Étalonnage et vérification des thermomètres* [R 2 520], dans la base documentaire Mesures physiques, pour se faire une idée des reproductibilités et des exactitudes maximales accessibles dans la métrologie des températures et dans la pratique courante.

Il est toujours très difficile à l'utilisateur de définir l'exactitude dont il a réellement besoin ou qu'il croit nécessaire. Au lieu de dégrossir le problème par des moyens simples, on cède souvent à la tentation de se procurer un matériel dont la précision nominale serait grande dans certaines conditions bien déterminées. Puis, on oublie plus ou moins les impératifs de mise en œuvre et le travail se fait dans de mauvaises conditions. On n'oubliera pas qu'un appareil de grande exactitude est fragile et délicat à employer, et que le même appareil détérioré fournit des mesures erronées.

La nécessité industrielle la plus fréquente étant celle d'une bonne **reproductibilité** des indications en vue d'une fabrication donnée, les appareillages de classe 0,5 à 1 permettent de résoudre sainement la majorité des problèmes. En effet, dans le domaine d'exactitude des appareils courants, les installations de mesure se mettent en œuvre rapidement à l'aide de matériels éprouvés. Lorsque l'exactitude demandée requiert un appareillage plus sophistiqué, une étude méthodique des erreurs systématiques et aléatoires apparaît indispensable.

■ Dans quelle gamme de température se situe la mesure ?

Deux notions complémentaires doivent être distinguées : le **niveau moyen** de la mesure et l'**intervalle de température** autour de cette moyenne.

Le niveau moyen influe sur le choix de la méthode thermométrique et sur la durée de vie de l'appareillage. Comme nous le verrons dans l'article [R 2 517], il existe, sauf aux températures extrêmes, un grand choix de capteurs possibles, qui sera alors guidé par les exigences de la mesure dans l'espace et dans le temps, par la sensibilité et la mobilité de la chaîne de mesure complète.

La mobilité est définie comme la plus petite variation de température que l'on souhaite détecter. L'intervalle de température autour de la moyenne influe sur la plus petite variation accessible en raison de la gamme de mesure, de la linéarité du phénomène thermométrique et de la modification de fidélité du capteur par cyclage thermique. En règle générale, pour balayer un grand domaine de température, on a intérêt à disposer de plusieurs thermomètres de conceptions différentes, travaillant chacun dans des conditions constantes pour des intervalles de températures faibles.

■ Quel budget pour la mesure et sa maintenance ?

La figure 2 expose l'attitude à adopter au moment du choix d'un appareillage thermométrique, l'idée principale étant qu'il **faut commencer par dégrossir les problèmes par des méthodes d'exactitude courante** ($\pm 1\%$ par exemple).

Un instrument se contente de réagir à un phénomène physique. C'est l'opérateur qui seul effectue la mesure et interprète les

Tableau 1 – Conditions caractéristiques d’une mesure et critères de choix d’un capteur

Quelle gamme de températures ?	Niveau moyen et largeur de l’intervalle	La même exactitude dans tout l’intervalle ; ou bien, régulation fine d’une valeur qu’il n’est pas nécessaire de connaître précisément
Pourquoi ?	Lecture Régulation..... Sécurité Contrôle de fabrication.....	– Mesure ponctuelle ou indication moyenne (dans le temps, l’espace) – Réglage d’une température ou d’une autre grandeur – Détection d’un point chaud ou froid – Mesure absolue ou reproductibilité de conditions thermiques
Où ?	Nature du milieu Propriétés des matériaux constitutifs État thermique État de mouvement Dimensions du milieu et de l’environnement Nature de l’environnement	– Solide, liquide, gaz (vitesse d’agitation) – Pulvérulent – Opaque, transparent – Propriétés corrosives – Usinabilité, fragilité, soudabilité – Conductivités électrique et thermique – Possibilité de perçage ou mesure superficielle – Oxydabilité, réactivité – Matériau isotherme ou variations importantes de température – Statique – Mobile par rapport au détecteur et (ou) à l’instrument de lecture – Mouvement périodique : amplitude, fréquence, accélération – Vibrations, chocs – Mesures ponctuelles – Accessibilité – Poussières, condensation, radiations, gradients thermiques, vapeurs corrosives – Potentiels électriques, parasites divers – Vibrations du bâtiment
Quand ?	Stabilité thermique Simultanéité de plusieurs mesures Importance de l’instant de mesure Mesures continues ou espacées	– Vitesse de variation de température – Oscillations ou variation monotone – Contrôles en différents points – Réglage d’une température en fonction d’autres grandeurs – Mesure de la température atteinte à l’heure H – Ou mesure de l’heure à laquelle la température T est atteinte – Enregistrement, alarme – Présence d’un opérateur
Critères de choix d’un capteur	Reproductibilité d’une mesure Stabilité Sensibilité Temps de réponse Durée de vie Prix d’achat et de maintenance Interchangeabilité (remplacement d’un détecteur) Possibilité d’enregistrement ou de contrôle automatique Facilité de lecture (linéarité, transmission à distance) Simplicité de mise en œuvre (fragilité, personnel spécialisé) Possibilité de dépassement du domaine nominal de température	

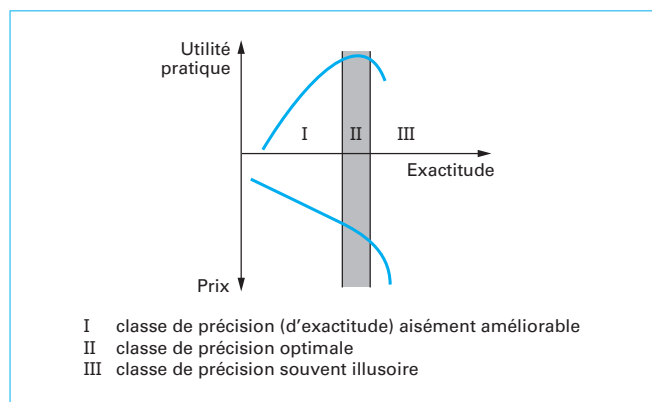


Figure 2 – Utilité pratique, prix et exactitude (précision) d'un dispositif thermométrique

réactions du capteur. L'objectif fondamental d'un ensemble de mesure étant d'apporter une aide au contrôle des opérations en cours et d'améliorer l'efficacité de la production, c'est donc la réflexion précédant et suivant la mesure qui est essentielle. Le travail de l'ingénieur ou de l'opérateur sera de poser correctement les questions préliminaires en analysant les conditions caractéristiques, de choisir le type de mesure puis l'appareillage, de mettre en place correctement les instruments et d'interpréter et critiquer les valeurs obtenues. Seul un personnel qualifié pourra résoudre ces difficultés de manière satisfaisante. On peut citer, par exemple, la mesure difficile des températures de gaz et de flammes.

La mise en place et la formation du personnel est la part la plus importante du budget consacré à la mesure. La maintenance de l'appareillage nécessite aussi une qualification poussée. L'étalonnage du capteur thermométrique est une opération délicate, qui nécessite une grande vigilance dans les opérations à effectuer. Le type d'étalonnage à prévoir dans le budget de la mesure dépend

de l'exactitude recherchée et du vieillissement des capteurs. Pour plus de détails, on se reportera à l'article déjà cité sur l'étalonnage.

Le prix du détecteur et de son remplacement ainsi que celui des instruments de lecture apparaissent parfois faibles devant le **coût de la formation** de personnels capables d'effectuer les mesures dans de bonnes conditions. Rappelons que les appareils les plus chers sont susceptibles de performances métrologiques remarquables, qui ne peuvent être obtenues que si les conditions d'utilisation correspondent à celles de la métrologie.

En résumé, il sera souvent préférable de « mettre en œuvre un thermomètre médiocre mais bien installé, souvent plus précis que le meilleur thermomètre du monde mal utilisé ». Dans la grande majorité des cas industriels, lorsque le problème a été bien défini, le choix du thermomètre est sans ambiguïté, surtout si l'on a bien réfléchi à la question « pourquoi ? ». Dans certains cas simples, il reste encore la possibilité d'imposer une condition d'exactitude de la mesure, permettant de choisir entre plusieurs méthodes. Dans d'autres cas, il faudra transiger avec l'exactitude de la belle méthode standard afin d'obtenir une mesure adaptée à la situation. Dans un milieu que l'on sait variable dans l'espace et le temps, l'exactitude globale nécessite, en plus de l'exactitude de détection de température, celle de la localisation du point de mesure et enfin de l'instant de la mesure et de la constante de temps du montage.

On se reportera au tableau 1 où sont résumées un certain nombre de conditions caractéristiques d'une mesure et quelques premiers critères essentiels au choix d'une chaîne de mesure.

Nous proposons la démarche suivante : laisser pour un temps l'idée d'exactitude, analyser les modes opératoires et les conditions caractéristiques en se rappelant que la façon d'utiliser un instrument importe plus que ses qualités intrinsèques. Ce n'est qu'en fin de réflexion que l'on quantifiera l'exactitude obtenue. Le passage à une précision plus élevée sera alors envisagé, si nécessaire.

Mesure des températures

Questions à se poser avant la 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'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

Sources bibliographiques

- [1] LAISSUS (J.). – *Thermométrie et pyrométrie. Voyage dans le passé*. Mesures, p. 82, oct. 1965.
- [2] DANLOUX-DUMESNILS (M.). – *Du thermomètre de Florence au thermomètre de Lyon*. Mesures, p. 1023, sept. 1961.
- [3] LANDAU (L.) et LIFCHITZ (E.). – *Physique statistique*. Éd. MIR., Moscou, 1^{re} édition, 1967, Ellipses (1994).
- [4] ATKINS (P.W.). – *Chaleur et désordre, le deuxième principe de la thermodynamique*. L'univers des sciences. Bibliothèque Pour la Science. Belin (1999).
- [5] DE RYCKER (H.). – *Chaleur et entropie, démythification de la notion d'entropie*. Vaillant-Cannanne SA Liège (1976).
- [6] Comité international des poids et mesures. Comité consultatif de thermométrie (CCT) –
- 8^e Session – Annexe 14. Édité par le Bureau international des poids et mesures BIPM (1967).
<http://www.bipm.org/>
- [7] Association Metrodiff. Historique : évolution des thermomètres,
<http://www.metrodiff.org/commun/thermo3.rtf>

À lire également dans nos bases

- CABANNES (F.). – *Pyrométrie optique*. [R 2 610] Base documentaire Archives Analyse/mesures (1990).
- PAJANI (D.). – *Thermographie – Principes et mesure*. [R 2 740] Base documentaire Mesures physiques (2001).
- MOUTET (A.), CRABOL (J.) et NADAUD (L.). – *Températures des gaz et des flammes*. [R 2 750] Base documentaire Archives Analyse/mesures (1974).
- MOSER (A.). – *Échelles thermométriques*. [R 2 510_10_1983] Base documentaire Archives Analyse/mesures (1983).
- SADLI (M.). – *L'échelle internationale de température : EIT-90*. [R 2 510] Base documentaire Mesures physiques (2006).
- ROGEZ et LE COZE (J.). – *Étalonnage et vérification des thermomètres*. [R 2 520] Base documentaire Mesures physiques (1988).

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