



Mesure des températures - Chaîne de mesure

Date de publication :
10 mars 2010

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

par **Jacques ROGEZ, Jean LE COZE**

Résumé Le choix d'un instrument de mesure est complexe. Cet article a pour but de servir de guide à son choix, en répondant aux questions essentielles et en étudiant les diverses possibilités de mesure. Une chaîne thermométrique comprend le capteur, la zone de transmission et l'appareil de lecture. Sont exposés ici les capteurs les plus répandus et leurs méthodes d'utilisation, celles entre autres liées à la localisation de la mesure dans l'espace et dans le temps, et celles de corps en mouvement.

Abstract Choosing a measurement instrument is complex. The aim of this article is to assist in this choice, by answering essential questions and studying the various measurement possibilities. A thermometric chain comprises the sensor, the transmission zone and the reading device. This article presents the most widely used sensors and their methods of use, including measurement methods in space and time as well as those of bodies in motion.

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

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

1. Terminologie relative aux qualités d'une chaîne de mesure ..	R 2 517 – 2
2. Description des principaux capteurs	— 3
2.1 Capteurs les plus répandus.....	— 3
2.2 Capteurs pour applications particulières.....	— 3
3. Méthodes d'utilisation des capteurs.....	— 4
3.1 Méthodes liées à la localisation de la mesure dans l'espace.....	— 4
3.1.1 La mesure ponctuelle a ses limites.....	— 4
3.1.2 Mesures effectuant une moyenne dans l'espace.....	— 4
3.1.3 Détection d'un point chaud ou froid.....	— 7
3.1.4 Mesure d'une différence de températures simultanées ou d'un gradient et mesure de flux thermique	— 8
3.2 Méthodes de mesure liées à la localisation de la mesure dans le temps.....	— 11
3.2.1 Différents types de courbes.....	— 11
3.2.2 Température moyenne dans le temps.....	— 13
3.2.3 Températures minimales et maximales	— 13
3.3 Surveillance continue d'un grand nombre de températures.....	— 13
3.4 Mesure de la température de corps en mouvement.....	— 14
3.4.1 Température de solides en mouvement	— 14
3.4.2 Mesure de la température dans un liquide.....	— 16
3.4.3 Mesure de la température dans un gaz	— 19
Pour en savoir plus.....	Doc. R 2 517

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

Le choix d'un instrument de mesure n'est pas toujours facile. Il faut avant toute chose se poser les bonnes questions, prendre connaissance des diverses possibilités de mesure et répondre raisonnablement à ces questions. Dans ce choix intervient aussi l'influence des conditions particulières de la mesure envisagée sur la précision de la mesure.

Cet article a pour but de guider dans cette démarche l'expérimentateur en thermométrie, car la mesure de température s'avère en effet très diverse selon les situations rencontrées.

Dans le premier chapitre [R 2516v2] sont rappelées quelques notions fondamentales nécessaires et sont posées les questions essentielles avant le choix.

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

Une chaîne thermométrique comprend trois parties qui sont parfois difficilement dissociables :

- le **capteur** transforme l'énergie thermique puisée au sein du milieu étudié en énergie électrique ou mécanique ;
- la **zone de transmission** conditionne et souvent amplifie le signal ;
- l'appareil de **lecture** ou d'**enregistrement** est pratiquement toujours de nature électronique à cause de la facilité de traitement du signal qu'assure cette technologie. Actuellement, le signal est digitalisé, ce qui rend la lecture encore plus directe.

Quelques exemples :

- dans un thermomètre à dilatation de liquide, le capteur est représenté par le bulbe contenant le liquide qui se dilate, la zone de transmission est représentée par le tube capillaire contenant le liquide, l'appareil de lecture est une simple graduation ;
- dans un thermomanomètre la zone où le gaz se dilate représente le capteur, la zone de transmission est le tube contenant le gaz qui est en connexion avec le manomètre constituant l'appareil de lecture ;
- dans le cas d'un couple thermoélectrique, la distinction entre les trois parties est simple : les soudures chaude et froide constituent le capteur qui est relié par les cordons de liaison à l'amplificateur ou au voltmètre.

En pyrométrie, l'atmosphère situé sur le trajet du rayon fait partie de la chaîne de transmission et engendrera des corrections à effectuer.

La dissociation et le remplacement de chacune des parties distinctes est souvent possible. Cependant dans certains cas, la chaîne est indissociable comme dans le thermomètre à dilatation de liquide ou les cônes fusibles par exemple.

1. Terminologie relative aux qualités d'une chaîne de mesure

■ La **fidélité** est la qualité première de tout appareil de mesure. Un appareil non fidèle n'est pas un appareil de mesure. La fidélité est l'aptitude à donner de manière reproductible dans des conditions d'utilisation définies, des réponses très voisines lors de l'application répétée d'un même signal d'entrée. Indépendamment de la justesse, l'**erreur de fidélité** décrit la dispersion des mesures d'une même température au cours d'une série d'expériences. Elle résulte de différentes erreurs, liées à la mobilité, aux hystérésis, à la lecture ou même aux bruits de fond lorsque la sensibilité est trop élevée. Si les grandeurs d'influence liées aux conditions de la mesure sont mal maîtrisées, on sera contraint de considérer leurs effets comme faisant partie de l'erreur de fidélité.

■ La **sensibilité** d'une chaîne de mesure est le quotient de l'accroissement de sa réponse G par l'accroissement correspondant du signal d'entrée, dans notre cas la température. Elle se mesure par la dérivée dG/dT , c'est-à-dire par la pente de la réponse. Les unités de la sensibilité seront $M.K^{-1}$ où M est l'unité de la grandeur affectée par la température que le dispositif de mesure appréhende. M représentera des ohms, des volts, des mètres, des

pascals, etc. Pour une plus grande facilité dans le stockage des données, on emploie, lorsque c'est possible, les **sensibilités réduites** définies par $1/G.(dG/dT)$ ou $1/G_0.(dG/dT)$ où G et G_0 sont les valeurs des grandeurs mesurées respectivement à T ou à T_0 , température de référence. Ces sensibilités réduites s'expriment alors en K^{-1} . La sensibilité réduite peut avoir une signification physique. Par exemple, lorsque G est une longueur, elle représente un coefficient de dilatation ; si G est une résistance, elle représente un coefficient de température d'une résistance. Enfin, il convient de ne pas confondre sensibilité et **seuil de mobilité** : ce dernier est la plus petite variation du signal d'entrée qui provoque une variation perceptible de la réponse de la chaîne de mesure.

■ L'**exactitude** de mesure est la différence entre le résultat d'un mesurage et la valeur réputée vraie de la grandeur mesurée, fournie par exemple par un étalonnage. L'**erreur de justesse** est la composante systématique de l'erreur de l'instrument de mesure. L'emploi du terme « **exactitude** » au lieu du terme « **précision** » est conseillé selon les normes ISO [7] et la norme AFNOR NF X 07-001 (déc. 1994). La précision englobe toutes les sources d'erreur (fidélité, justesse).

■ Selon le *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* publié par l'ISO (identique à la norme NF X 07-001) [7], le **temps de réponse** d'une chaîne de mesure est l'intervalle de temps compris entre le moment où le signal d'entrée subit un changement brusque spécifié et le moment où le signal de sortie atteint, dans les limites spécifiées, sa valeur finale en régime établi et s'y maintient. Dans la grande majorité des cas, on peut

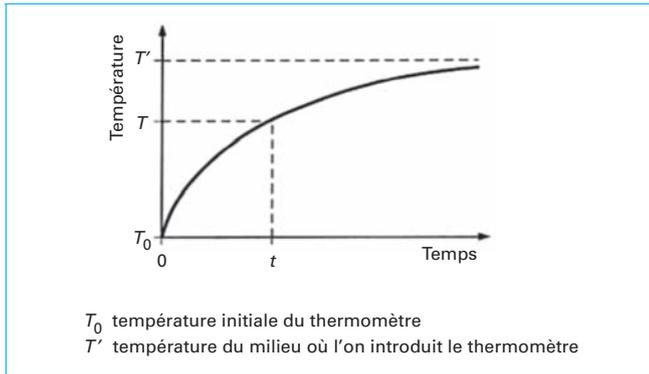


Figure 1 – Réponse d'un thermomètre plongé rapidement dans un milieu à une température différente

choisir des éléments de la chaîne de mesure dont le temps de réponse est négligeable devant celui du capteur. Le temps de réponse sera alors celui du capteur. Comme le calcul qui suit le montre, la constante de temps n'est pas uniquement une caractéristique du capteur, mais de l'ensemble capteur + milieu étudié : l'énergie échangée entre un détecteur de surface S , initialement à la température T , et le milieu à température fixe T' peu différente de T est transférée au détecteur et modifie sa température selon la relation écrite pour une unité de temps dt :

$$KS(T' - T)dt = CdT$$

K est un coefficient global de transfert thermique dépendant des modes de transfert d'énergie thermique et C est la capacité thermique du détecteur. La loi de variation de T avec le temps est régie par la solution de l'équation précédente :

$$T - T_0 = (T' - T_0)(1 - \exp(-t/\tau))$$

où T_0 est la température initiale (figure 1), et τ la **constante de temps** définie par $\tau = C/KS$. La constante τ dépend des caractéristiques dimensionnelles (à travers S) et thermiques (à travers C) du capteur ainsi que de l'interaction milieu-capteur (à travers K). À travers C et K , τ dépend de la température. Formellement, T n'est atteinte qu'au bout d'un temps infini correspondant à la mise en équilibre thermique du milieu et du capteur. Dans la pratique, on détermine et on utilise τ obtenu par la mesure du temps où :

$$(T - T_0) / (T' - T_0) = 1 - 1/e \approx 0,632$$

Il est bien entendu que le **temps de réponse** ainsi défini n'est utile qu'à titre de comparaison. Seuls les **temps de mise en équilibre**, à la précision de la mesure près, sont utiles à l'expérimentateur. La précision $(T - T_0)/(T' - T_0) = 0,999$ ne sera par exemple atteinte qu'à $t_{99,9} = 6,9 \tau$.

Pour plus de précisions on se reportera à l'article [R 2570], *Vocabulaire des mesures*.

2. Description des principaux capteurs

La chaîne de mesure thermométrique est construite autour de l'élément sensible central pour que le signal primaire soit facilement exploitable, fidèle dans le temps et vis-à-vis de perturbations, et représentatif. Les évolutions avec la température de bon nombre de propriétés physico-chimiques sont utilisées pour repérer la

grandeur « température ». Il est préférable que la propriété choisie varie rapidement avec la température et/ou soit facilement mesurable avec une grande précision, par mesure électrique par exemple. *A priori* toute grandeur évoluant avec la température peut être utilisée, en particulier dans des méthodes très spécifiques adaptées. Il s'ensuit une certaine diversité de langage dans l'appellation des instruments correspondants : thermomètres, pyromètres, thermomanomètres, thermistances, couples thermoélectriques, etc.

Dans l'énumération qui suit les références aux articles spécialisés du présent traité sont mentionnés entre parenthèses. On y trouvera les caractéristiques très détaillées des détecteurs utilisés ainsi que les montages qui y sont afférents.

2.1 Capteurs les plus répandus

Un certain nombre de capteurs se sont progressivement imposés en raison de leur mise en œuvre relativement simple qui a facilité le développement de la majorité des capteurs usuels :

- La **résistance électrique** est la grandeur mesurée dans les thermomètres à résistance métallique et les thermistances ([R 2570], [R 2580]). Ces dernières présentent l'avantage d'une grande résistance compatible avec les résistances d'entrée des amplificateurs électroniques bas niveau.

- L'**effet thermoélectrique** est à la base d'une très importante catégorie de capteurs, les couples thermoélectriques (de [R 2590] à [R 2596]). Ils sont actuellement souvent commercialisés sous forme d'une chaîne intégrée comportant la soudure froide et l'électronique de conversion. Ils délivrent directement la température sur un afficheur.

- En **pyrométrie** c'est le phénomène de **rayonnement** des corps qui est analysé et traduit en température sur la base de la théorie thermodynamique du rayonnement. Le pyromètre à radiation totale analyse l'ensemble du spectre émis. Le pyromètre à disparition de filament compare l'émission du corps dont on mesure la température avec celle d'un filament chauffé et étalonné. Certains récepteurs, comme le pyromètre bichromatique, sélectionnent une ou plusieurs gammes de longueurs d'onde ([R 2610], [R 2611], [R 2740], [R 2741], [R 2790]). La pyrométrie est principalement utilisée dans la mesure des températures de surface [R 2730].

- La **dilatation d'une phase liquide** est mise en œuvre dans les thermomètres à liquide dans le verre ou le métal [R 2530].

- La **dilatation de solides** montés en différentiel est utilisée dans les thermomètres à bilames [R 2540].

- Les thermomanomètres sont basés sur la **dilatation de phase gazeuse ou l'équilibre liquide-vapeur** selon l'équation d'état [R 2550].

2.2 Capteurs pour applications particulières

Dans certains cas spécifiques, on met en œuvre des phénomènes physico-chimiques plus particuliers pour représenter les variations de température.

- La **transmission, la photoluminescence, l'absorption, la fluorescence, la biréfringence optique** sont fonctions de la température. Ces propriétés sont mises à profit avec les capteurs à fibres optiques ([R 2800], [R 2801], [R 2802], [R 2803]).

- L'évolution de la **caractéristique d'une jonction** avec la température dans une diode (AsGa) ou un transistor (Si) est utilisée dans les thermomètres à semi-conducteurs. On mesure la variation, en fonction de la température, de la chute de tension dans les jonctions traversées par un courant constant. Les champs magnétiques sont sans effet. La méthode est intéressante entre 1 et 300 K [R 2580].

- Dans les thermomètres à quartz, on utilise la variation de **fréquence de résonance d'un cristal piézoélectrique** en fonction de la température, que l'on traduit en variation de tension. On peut employer ce dispositif entre 230 et 520 K.

■ Le thermomètre capacitif est basé sur l'évolution en température de la **permittivité d'un isolant** suivant une loi complexe qui passe par un maximum correspondant à une plage d'insensibilité. Cette méthode semble surtout intéressante aux très basses températures (< 5 K), en présence de champs magnétiques élevés, car cette méthode y est insensible. Plusieurs domaines discontinus d'application sont envisageables entre 0,02 et 300 K.

■ Diverses **transitions de phase** sont utilisées : elles sont mises en évidence par la différence de transmission optique des phases dans les thermomètres à cristaux liquides [R 2640], par le changement de coloration ou par le changement rapide de viscosité avec les méthodes repères [R 2650].

■ Dans les thermomètres à **susceptibilité paramagnétique**, une variation de température se traduit par une évolution en $1/T$ de la susceptibilité d'un sel paramagnétique. La mesure s'effectue par couplage inductif.

■ Les **thermomètres à inductance** sont constitués d'alliages magnétiques CoFeV, trempés à partir de l'état liquide qui présentent une transformation paramagnétique-ferromagnétique réversible et étalée sur un large domaine de température. On peut les utiliser comme inducteurs dans un système électrique oscillant et traduire ainsi la température en fréquence. Cette méthode, qui s'applique entre 1 et 400 K, est à rapprocher de la mesure par variation de susceptibilité paramagnétique.

■ À des températures inférieures à 10^{-5} K, on étudie la **susceptibilité du système de spins nucléaires**.

3. Méthodes d'utilisation des capteurs

En fonction de l'information thermométrique que l'on désire acquérir on choisira la méthode de mesure la plus appropriée.

3.1 Méthodes liées à la localisation de la mesure dans l'espace

Dans ce paragraphe, on supposera que le champ thermique du milieu étudié est **stationnaire dans le temps**. L'échantillon peut présenter des gradients thermiques et, dans ce cas, être le siège de flux. La mesure de ces flux sera abordée en fin du paragraphe 3.1.4.

Pratiquement, on recherche soit une mesure aussi ponctuelle que possible en agissant en conséquence sur le capteur, soit une température moyenne sans se soucier, le plus souvent, de la nature physique de cette moyenne.

Chaque fois qu'une signification précise de la mesure de température est exigée, il faut procéder à son homogénéisation dans tout le volume à étudier. On prendra garde aux grandes difficultés rencontrées dans les enceintes sous faible pression où seuls conduction et rayonnement interviennent ; de même aux températures inférieures à 100 K, l'homogénéité est difficilement atteinte car le transfert d'énergie par rayonnement devient négligeable. Dans le cas d'un fluide, une agitation vigoureuse annulera les gradients thermiques par destruction des couches de composition, de densité et de viscosité différentes.

Notons qu'une distribution de température dans l'espace a généralement des effets plus graves sur les performances des instruments qu'une dérive lente de température au cours du temps.

Ce paragraphe a pour but de décrire diverses possibilités de mesure et combinaisons de mesures en plusieurs points d'un milieu donné. On ne décrira pas les solutions particulières qu'il faut adopter en fonction des caractéristiques physiques ou chimiques du milieu étudié. Pour une mesure de température de surface, on se reportera à l'article *Température de surface. Mesure par contact* [R 2732].

Tableau 1 – Taille minimale de sondes thermométriques selon leur nature

Nature	Taille (mm)
Couple thermoélectrique	0,05
Sonde à résistance	1
Thermistance	0,1
Sonde à dilatation (solide, liquide ou gaz)	5
Pyromètre (taille de la plage observable)	0,01

De manière générale, lorsque l'on rencontre un montage complexe mettant en jeu plusieurs détecteurs, il est bon de réfléchir précisément à la signification de la mesure, en écrivant les équations mises en jeu dans la mesure. Pour les montages de couples thermoélectriques par exemple, on se reportera avantagement aux règles simples décrites dans l'article *Couples thermoélectriques. Caractéristiques et mesure de température* [R 2590] pour éviter toute déconvenue.

3.1.1 La mesure ponctuelle a ses limites

On pense souvent réaliser une mesure ponctuelle mais malheureusement la réalité est tout autre. Tous les détecteurs, même les plus ponctuels, donnent, du fait de leurs dimensions, une température intermédiaire entre toutes celles qui les influencent. Cela est d'autant plus vrai que les gaines et enveloppes qui les entourent sont plus importantes.

Pour effectuer une mesure ponctuelle, les dimensions du détecteur doivent être petites vis-à-vis de celles du milieu étudié et, plus précisément, vis-à-vis des distances moyennes entre surfaces isothermes dont l'écart en température est celui de l'exactitude recherchée dans la mesure. Il n'est pas nécessaire d'employer systématiquement les détecteurs de dimensions les plus réduites disponibles dans le commerce, car, au-dessous d'une certaine taille, et pour des impératifs de fabrication, leur coût augmente en raison inverse de leur dimension.

Dans le tableau 1 sont donnés des ordres de grandeur des encombrements minimaux de divers types de détecteurs.

Le **détecteur miniature** présente de nombreux avantages, notamment lorsque l'accès au point de mesure ou le perçage d'un logement de grande dimension sont difficiles. Les petits détecteurs ont un temps de réponse faible, ils perturbent peu le champ de température et minimisent la conduction thermique vers l'extérieur. Dans certains cas particuliers, les techniques par dépôt de films minces résistifs ou thermoélectriques sont bien adaptées à des mesures localisées.

Lorsque l'échantillon étudié est de taille comparable à celle du plus petit détecteur disponible, la seule méthode acceptable est de créer un volume isotherme pour équilibrer thermiquement l'échantillon et le détecteur. Ce volume dépend des conditions de transfert thermique par conduction, convection ou rayonnement pour établir l'équilibre.

3.1.2 Mesures effectuant une moyenne dans l'espace

3.1.2.1 Notion de température moyenne

Théoriquement, la mesure de température moyenne T_m ne peut se résoudre que par un grand nombre de mesures ponctuelles destinées à établir la forme des isothermes et leur répartition dans le milieu. La taille des détecteurs sera d'autant plus faible et leur nombre d'autant plus élevé que les gradients locaux sont plus importants. Il est du plus haut intérêt de connaître, par un modèle mathématique lorsque c'est possible, la distribution des

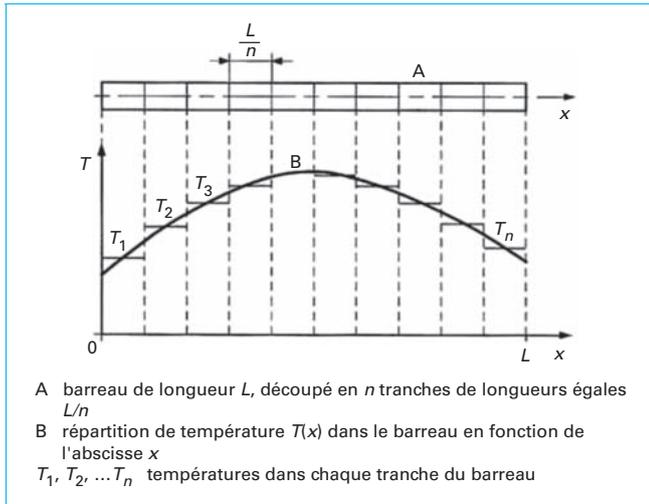


Figure 2 – Schématisation d'un barreau à température variable le long de l'axe

températures afin de disposer les détecteurs judicieusement dans des plans isothermes. Mais lorsque la répartition des températures est connue, l'utilité de T_m semble beaucoup plus restreinte : elle permet d'annoncer, par exemple, qu'une partie de l'espace testé est homogène en température à $T_m \pm \delta T$.

Dans certains cas, on recherchera volontairement une valeur moyenne de la température du milieu testé. La température moyenne d'un fluide circulant dans une canalisation, par exemple, est de plus grande utilité pratique que la connaissance précise du gradient entre le centre et les parois de la conduite. La mesure d'un flux thermique à l'aide d'une pile thermoélectrique est une autre application des mesures de températures moyennes (§ 3.1.4). Enfin, on cherchera parfois à mesurer une température moyenne sans se soucier de la signification physique de cette moyenne, en étant simplement attentif à son évolution dans le temps.

Pour préciser la notion de température moyenne, considérons, selon le schéma de la figure 2 un cylindre de longueur L dont la température $T(x)$ varie en fonction de l'abscisse x . La **température moyenne** est donnée par :

$$T_m = \frac{1}{L} \int_0^L T(x) dx$$

■ Supposons qu'un capteur de grande dimension soit disposé tout le long de l'axe x . La loi de variation avec la température de la grandeur mesurée G est :

$$G(T) = G_0 g(T - T_0)$$

Le capteur fournira, dans notre cas particulier, la grandeur intégrale \bar{G} :

$$\bar{G} = G_0 \int_0^L g(T(x) - T_0) dx$$

Sa conversion en température sera \bar{T} :

$$\bar{G}(\bar{T}) = G_0 g(\bar{T} - T_0)$$

■ On emploie communément, pour la mesure, des montages thermométriques qui discrétisent l'information le long de l'axe des abscisses. Cela revient, pour simplifier, à découper le barreau en n tranches d'épaisseurs L/n égales entre elles. Dans chaque tranche,

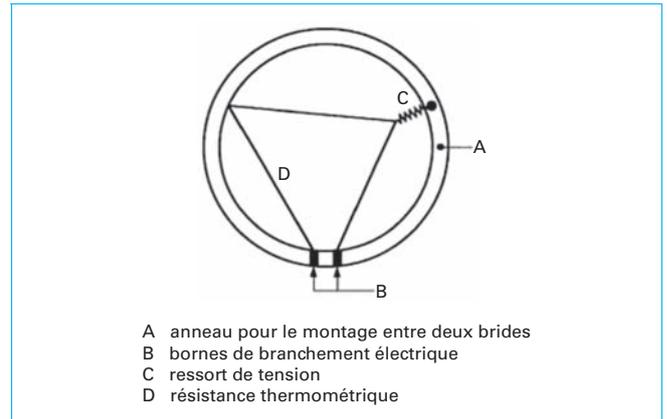


Figure 3 – Montage d'une résistance thermométrique dans une conduite circulaire

la température est supposée constante : T_1, T_2, \dots, T_n . On ne mesurera alors qu'une grandeur intermédiaire G^* avec la définition suivante :

$$G^* = \frac{G(T_1) + G(T_2) + \dots + G(T_n)}{n}$$

Cette grandeur ne fournira après conversion qu'une **température intermédiaire T^*** .

De manière générale T_m, \bar{T} et T^* sont différentes, car la relation $G(T)$ n'est pas linéaire (loi physique de variation avec la température de la longueur, la résistance, la f.é.m., etc.). Pratiquement, si les variations extrêmes de température dans le milieu étudié sont réduites à quelques dizaines de degrés, on fait peu d'erreur en supposant que $g(T - T_0)$ est linéaire et que les trois températures sont égales. En revanche, si les écarts sont plus élevés, les trois températures sont différentes et on ne sait pas laquelle choisir ; cela n'est pas trop gênant si l'on accepte que la température moyenne d'un milieu très anisotherme ne présente pas d'intérêt particulier.

3.1.2.2 Méthodes de mesure donnant la grandeur intégrale

En choisissant des détecteurs de grandes dimensions (thermomètres de plusieurs dizaines de centimètres, voire de plusieurs mètres, thermomètres à résistance de platine, thermistances), on aboutit à une mesure directe de \bar{G} .

Divers montages sont possibles : par exemple, un détecteur filiforme enroulé en hélice autour d'un cylindre ou en spirale dans un plan. Sur la figure 3 est représenté un montage classique pour une mesure de température moyenne à l'intérieur d'une conduite cylindrique. Les thermomètres à résistance métallique sont disponibles sous forme de fils. Le platine n'est pas trop recommandable, en raison de son prix et des difficultés de mise en place sans introduction de contraintes mécaniques excessives.

Les thermistances existent sous forme de câbles en longueurs de plusieurs mètres que l'on peut raccorder bout à bout.

Les thermomanomètres peuvent être fournis avec des bulbes fins et allongés.

Les techniques de dépôt de films minces permettent d'obtenir des résistances ou des couples dont la partie sensible peut atteindre plusieurs centimètres, voire plusieurs dizaines de centimètres.

Considérons par exemple le cas particulier d'une résistance étalée sur une longueur L . On mesure, selon la figure 2, la résistance totale :

$$R = \int_0^L R(T(x)) dx$$

ou, en suivant la définition de la moyenne de la résistance par unité de longueur :

$$\bar{R} = \frac{1}{L} \int_0^L R(T(x)) dx$$

Si la loi résistance-température est linéaire dans l'intervalle de température considéré :

$$R(T) = R_0(1 - \alpha(T - T_0))$$

la résistance moyenne \bar{R} devient :

$$\bar{R} = \frac{R_0}{L} \int_0^L (1 - \alpha T(x) + \alpha T_0) dx = R_0(1 - \alpha(T_m - T_0))$$

La mesure \bar{T} obtenue à partir de \bar{R} est donc égale à T_m . Il est bien évident que si la loi $R(T)$ n'est pas linéaire, \bar{T} est différent de T_m .

Ce type de calcul est également valable pour tous les détecteurs susceptibles de grands développements tels que thermomètres à dilatation de gaz ou de métal, mais il ne s'applique pas aux couples thermoélectriques.

Dans le cas des thermistances où :

$$R = R_0 \exp\left(b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

les températures T et T_m sont généralement différentes, car l'intervalle pour lequel on peut assimiler cette fonction à une droite ne peut dépasser quelques degrés, le coefficient b lui-même ne restant constant que dans un intervalle de 30 à 40 K.

3.1.2.3 Méthodes de mesure donnant la grandeur intermédiaire

On traitera dans ce paragraphe de détecteurs dont la mesure est par définition localisée dans l'espace : typiquement, les couples thermoélectriques de montage classique dont la mesure est localisée au volume de la soudure chaude. Deux techniques particulières mettent en jeu des couples thermoélectriques où la soudure chaude présente une étendue notable : les dépôts de films minces et le contact de deux pièces massives propres, considéré comme jonction thermoélectrique.

■ Montage en série de couples thermoélectriques

D'après le schéma de la figure 4, on constate que les f.é.m. des couples s'ajoutent. La f.é.m. totale divisée par le nombre de couples est traduite en température. Ce type de mesure fournit la température intermédiaire T^* . Tous les couples doivent être identiques et les soldures de référence à la même température T_r . La f.é.m. augmentant avec le nombre de couples, la pleine échelle des appareillages de mesure de tension devra être différente de celle utilisée pour un couple unique. Comme dans toute mesure potentiométrique et particulièrement dans ce montage, il faut être vigilant à ce que le courant dans le galvanomètre soit nul. Le montage en série présente un grave danger : si un couple se met en court-circuit, il est difficile de s'en rendre compte et la mesure est faussée.

■ Montage en parallèle de couples thermoélectriques

Considérons le montage en parallèle de n couples thermoélectriques. On montre aisément que la tension mesurée vaut :

$$E^* = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) / n$$

mais cela n'est exact qu'à deux conditions :

- les résistances des n couples doivent être égales ;
- la mesure doit être effectuée par la méthode de zéro.

Il faut remarquer que, même lorsque l'intensité globale est nulle, un courant circule dans chaque branche.

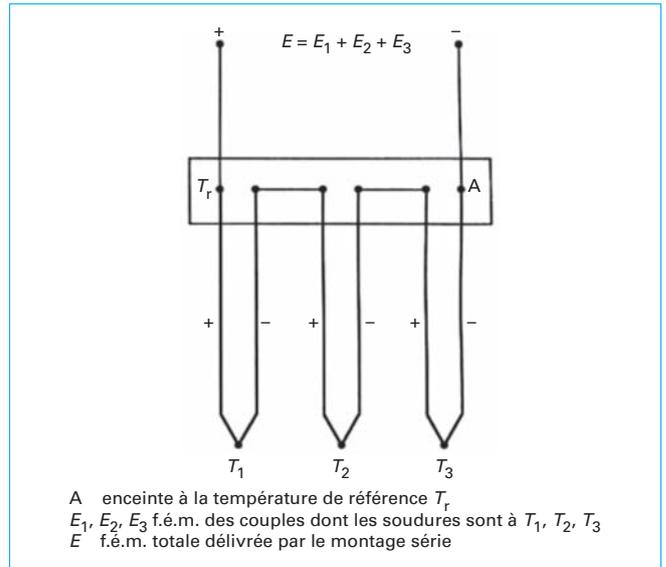


Figure 4 - Montage en série de couples thermoélectriques

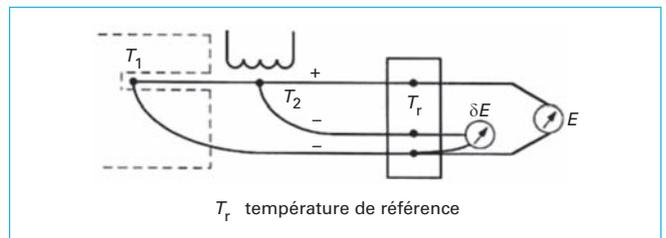


Figure 5 - Montage en opposition de couples thermoélectriques

Le montage parallèle permet donc d'obtenir T^* directement, avec l'avantage que la f.é.m., E^* , mesurée est du même ordre de grandeur que la f.é.m. d'un couple seul, c'est-à-dire que l'appareillage de mesure ne change pas. On utilise parfois la variante à un fil commun (figure 5) qui permet de faire une économie de fil thermoélectrique. Ce montage présente cependant l'inconvénient de produire un court-circuit thermique par le fil commun entre les deux points à T_1 et T_2 , donc de perturber fortement la grandeur à mesurer.

Si un couple se coupe, on ne s'en aperçoit pas mais la mesure reste correcte.

Si l'un des couples se met en court-circuit, on risque de ne pas s'en rendre compte, surtout si le nombre de couples est élevé, et la mesure est faussée.

Dans un montage de deux résistances en parallèle, la résistance équivalente est :

$$R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

ne correspond à aucune des mesures moyennes définies précédemment. On obtient en fait une moyenne harmonique des résistances, différente de la moyenne arithmétique du type G^* sauf si $R_1 = R_2$. Les montages de ce type sont utilisés pour linéariser des thermistances.

■ Remarque sur les couples thermoélectriques [8]

On utilise parfois le schéma de la figure 6 pour mesurer la température d'un milieu métallique. Il s'agit d'un couple intrinsèque [9]. Les deux fils thermoélectriques différents F_1 et F_2 sont ici soudés

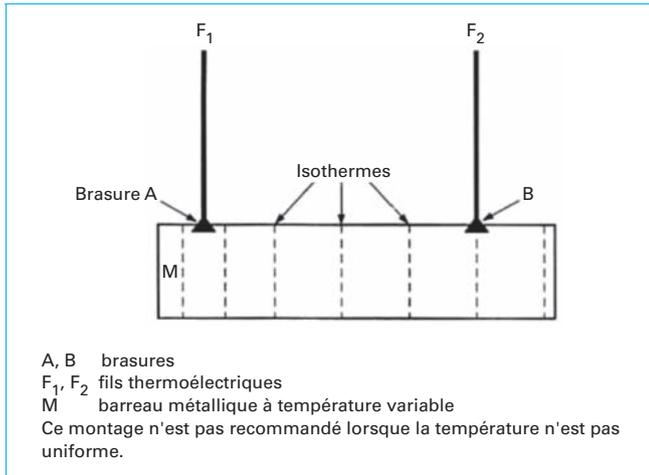


Figure 6 – Montage de fils thermoélectriques pour la mesure d'une température moyenne

sur le barreau aux points A et B. Le montage, tel qu'il est dessiné, présente un premier défaut tendant à maximiser les pertes par conduction le long des fils. On y remédie en enroulant sur quelques spires les fils F_1 et F_2 isolés autour du barreau dans les deux plans isothermes correspondants. La température mesurée de cette manière est tout à fait correcte si la température est uniforme. Lorsqu'elle varie entre A et B, il en est tout autrement, car il faut tenir compte de l'effet Thomson entre A et B. Supposons que le potentiel du métal M soit positif par rapport à F_1 et négatif par rapport à F_2 . La température T_i que l'on mesure est comprise entre T_A et T_B . Si F_1 est de même nature que le métal, $T_i = T_B$. Si le métal est positif ou négatif vis-à-vis de F_1 et F_2 , T_i est une température quelconque.

3.1.3 Détection d'un point chaud ou froid

L'objectif essentiel de la détection des points chauds ne relève pas de la mesure mais de la sécurité, le problème se présentant par exemple dans un produit en stock (fermentation) ou dans un local (détection d'incendie). Les solutions mises en œuvre sont à peu près les mêmes que celles décrites lors de l'étude des moyens de températures.

Du strict point de vue des détecteurs d'incendie, il existe d'autres catégories de solutions dont il ne sera pas question ici ; nous ne faisons qu'effleurer le problème sous l'angle de la mesure de températures.

3.1.3.1 Détecteurs utilisables

La recherche de points chauds met en œuvre soit des détecteurs sensibles à la seule température locale (couples thermoélectriques, bilames ou simplement fusibles sous forme de cannes ou de quadrillage dans la zone à protéger), soit des systèmes de grand développement faisant intervenir la dilatation des gaz ou les variations de résistance électrique. Les thermistances, dont la résistance décroît exponentiellement lorsque la température augmente, sont particulièrement bien adaptées à ce type de surveillance, à condition de les faire travailler dans le domaine où leur résistance est à variation rapide. Il existe également des résistances de type semi-conducteur à coefficient positif (de la température ambiante à 373 K) susceptibles de servir, comme les thermistances, à la protection des moteurs ou autres circuits électriques.

Signalons encore des interrupteurs thermiques utilisant le point de Curie (entre 263 et 379 K), des alliages à mémoire de forme utilisés comme interrupteurs ou détecteurs thermiques, certains verres métalliques présentant une rupture lors de la recristallisation

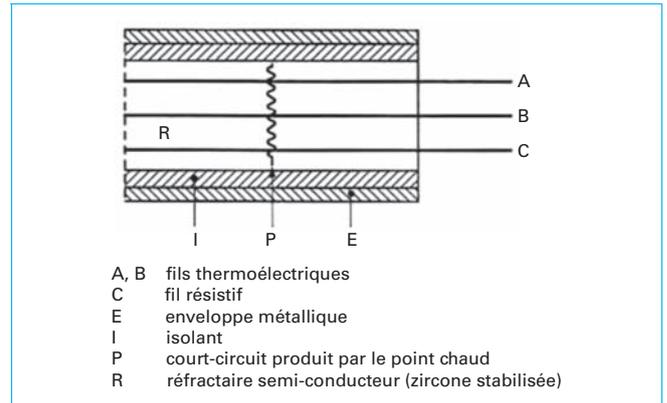


Figure 7 – Sonde permettant de localiser en point chaud et de déterminer sa température [11] [12]

intervenant à une température caractéristique permettant de détecter par exemple une rupture de la chaîne du froid.

Dans les réacteurs sous pression, le contrôle des températures locales est indispensable pour éviter des accidents d'explosion par fluage du métal.

Les montages électroniques, particulièrement les circuits intégrés, doivent subir des contrôles de points chauds, d'autant plus délicats que les constructions sont de plus en plus compactes. Il s'agit plutôt, dans ce cas, de mesures de températures ponctuelles à l'aide de détecteurs adaptés aux mesures en surface.

3.1.3.2 Surveillance de zones étendues

La surveillance par des détecteurs de grandes dimensions ne permet pas une grande sensibilité pour la mise en évidence d'un pic de température très localisé (cas le plus dangereux pour les incendies), car l'indication de l'appareil consiste en une valeur moyenne sur laquelle une variation trop locale peut n'avoir qu'une influence faible. On est cependant réduit à des solutions de ce type dans la surveillance des tas de matière importants (plusieurs milliers de m^3), et l'on se contente d'un nombre limité de détecteurs d'assez grand développement. En effet, une surveillance serrée à l'aide de détecteurs isolés peut conduire à un ensemble très lourd de connexions et appareillages de contrôle, lorsque la zone à protéger est étendue. Le problème essentiel consiste donc à placer les détecteurs aux bons endroits, c'est-à-dire ceux les plus susceptibles de s'échauffer (le cœur de la meule de paille) ou de réagir à l'échauffement (le plafond de la salle où se rassemblent les gaz chauds).

Outre les détecteurs depuis longtemps employés tels les résistances en spirales ou en plaquettes, les bilames, les thermostats à dilatation et les relais thermiques, la thermographie infrarouge permet une surveillance de températures sur des surfaces même très étendues [R 2741].

Remarque : signalons, enfin, une réalisation très astucieuse permettant la détection et la localisation de points chauds à des températures de 800 K et plus [10] [11]. L'élément de mesure figure 7, de longueur 1,5 m et de diamètre 35 mm, est constitué de 3 fils A, B, C enrobés dans un réfractaire semi-conducteur R, dont la résistivité diminue très rapidement lorsque la température augmente. L'élément de mesure est protégé par une gaine isolante et une enveloppe métallique. Un échauffement en P produit un court-circuit : entre A et B, on mesure une f.é.m. thermoélectrique qui donne la température à ± 15 K au-delà de 800 K ; entre A et C, on mesure une résistance qui permet de localiser P à ± 1 cm au-delà de 900 K.

3.1.4 Mesure d'une différence de températures simultanées ou d'un gradient et mesure de flux thermique

La mesure des différences de températures est à la base de nombreuses techniques : cryoscopie, régulation de fours et de thermostats, mesures de flux, mesures d'énergie rayonnante et de débits gazeux. La précision obtenue sur la mesure d'une différence de températures est très largement supérieure à celle de la mesure absolue de la température. Un facteur dix entre les deux précisions est tout à fait ordinaire. Qu'il s'agisse d'un gradient $\Delta T/\Delta x$ ou d'une différence de température ΔT , les dispositifs employés sont les mêmes, à la seule différence que la localisation dans l'espace des points de mesure Δx est primordiale dans la mesure d'un gradient.

3.1.4.1 Différences de températures simultanées

On peut toujours, bien entendu, mesurer les températures séparément et effectuer la différence ensuite. Cela peut se réaliser automatiquement, sans difficultés spéciales. Il est également possible d'obtenir des mesures directes de la différence par combinaison de détecteurs élémentaires formant un détecteur global différentiel. Il sera surtout question ici de ce deuxième aspect, bien que dans certains cas la distinction ne soit pas bien claire entre les deux types de méthodes.

Ce sont bien sûr les mesures électriques qui sont les plus souples dans ce domaine.

Citons cependant les thermomanomètres à compensation d'espace nuisible qui effectuent en réalité une mesure différentielle et, parmi les méthodes peu courantes, les mesures interférométriques qui permettent une grande sensibilité mais sont d'emploi limité [12]. Il serait injuste d'oublier les thermomètres différentiels à air de Leslie et Matthiesen et le thermoscope de Rumford [1], d'autant plus que ce type d'appareil a servi à mettre en évidence l'effet Peltier dans les couples de métaux soudés.

– *Avantage apparent des mesures différentielles* : si l'on mesure deux températures avec un appareil et que l'on fait la différence, les erreurs s'accumulent, alors qu'une seule mesure à l'aide d'un détecteur différentiel conduit à des erreurs amoindries.

– *Objection* : le principe du détecteur différentiel introduit une erreur du même ordre de grandeur (manque de linéarité des lois empiriques).

■ Emploi d'un couple thermoélectrique unique

Par définition, le couple fait une mesure différentielle exprimée par une f.é.m. entre soudure chaude et soudure froide de référence. On peut donc se contenter **d'un seul couple**, dont les soudures seront à T_1 et à T_2 . Il faut cependant prendre des précautions pour traduire la f.é.m. lue en $\Delta T = T_2 - T_1$, car elle n'est pas fonction linéaire de la température. Par exemple, le couple Pt-Rh 10 %/Pt possède une sensibilité de $5,7 \mu V.K^{-1}$ à 300 K et $12 \mu V.K^{-1}$ vers 1 600 K. Il faut donc, en plus, mesurer T_1 ou T_2 . Cette dernière mesure n'a pas besoin d'être très précise, car le pouvoir thermoélectrique ne varie pas beaucoup sur un intervalle de quelques dizaines de degrés.

■ Emploi de plusieurs thermocouples en série

Lorsque l'on a affaire à une différence de température de quelques degrés, la f.é.m. différentielle d'un seul couple est de l'ordre de quelques microvolts. Le montage de **plusieurs thermocouples en série** délivre une tension totale plus élevée, proportionnelle au nombre de couples, ce qui simplifie les problèmes de mesure électrique. Les montages pratiquement utilisés sont ceux de la figure 8 : montage compact dont le rôle est d'amplifier la tension à mesurer (figure 8a), montage étalé (fluxmètre, pile thermoélectrique) servant de plus à faire une moyenne dans l'espace (figure 8b). On effectue couramment des installations de ce type avec plusieurs dizaines de couples et on dépasse la centaine à l'aide de procédés spéciaux de fabrication.

Augmenter le nombre de détecteurs engendre quelques inconvénients : les défauts d'isolement entre couples sont d'autant plus

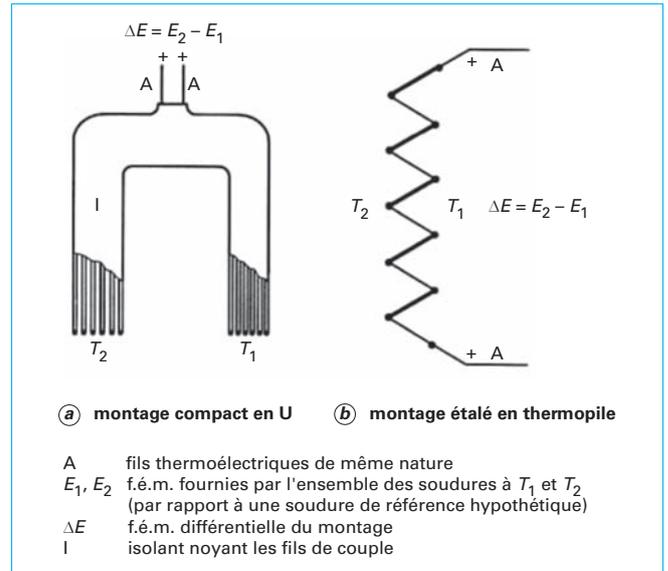


Figure 8 – Mesure d'une faible différence de températures à l'aide de couples thermoélectriques montés en série (pas de jonction de référence)

probables que leur nombre est plus élevé, au moins pour le montage compact en U. De même, dans un tel détecteur, les dimensions, le temps de réponse et la conduction thermique par les fils entre les deux zones mesurées peuvent être considérablement augmentés.

Le montage étalé pose le même problème de conduction thermique de façon encore plus évidente, mais il a des avantages qui le rendent très utile en cryométrie de précision [13] ; on l'utilise également comme récepteur d'énergie rayonnante dans certains pyromètres à rayonnement total et, plus généralement, comme pile thermoélectrique.

En résumé, le montage de plusieurs couples en série pour effectuer une mesure différentielle se heurte aux problèmes conjugués de la mesure différentielle par un seul couple, et du montage en série.

■ Thermocouples avec soudures froides montées en opposition

Le montage de **couples thermoélectriques avec soudures froides montées en opposition** de la figure 9 est à préférer aux précédents lorsqu'il s'agit de mesurer des différences ΔT importantes, en raison de la non-linéarité de la relation f.é.m.-température. Il coûte cher en fils thermoélectriques mais offre la possibilité de mesurer T_1 et T_2 .

Comme il a déjà été remarqué, le montage simplifié de la figure 5 présente l'inconvénient d'établir un couplage thermique direct entre T_1 et T_2 par l'intermédiaire du fil commun. Il n'est donc pas recommandé pour une mesure de différence de températures.

Rien n'interdit de remplacer, dans la figure 9, chacun des couples par un montage série, afin d'obtenir une f.é.m. différentielle plus grande. L'intérêt pratique est quasi nul indépendamment de l'incidence sur le prix. En effet, une soudure froide est utile lorsque ΔT est grand mais alors il n'est plus nécessaire d'amplifier ΔT par un montage série ; étant entendu que si ΔT est faible, la soudure froide n'est plus indispensable (figure 8a).

■ Résistances métalliques

Les sondes à résistance présentent généralement une sensibilité plus élevée que les couples ; la mesure se fait au pont de Wheatstone, avec différentes variantes suivant la précision et les valeurs de ΔT . Dans le pont de la figure 10, qui a l'avantage de diminuer

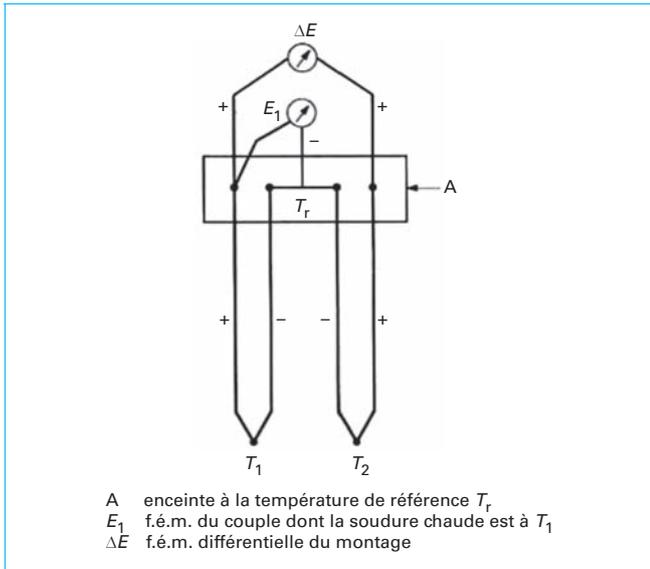


Figure 9 – Montage en opposition de couples thermoélectriques avec soudures froides

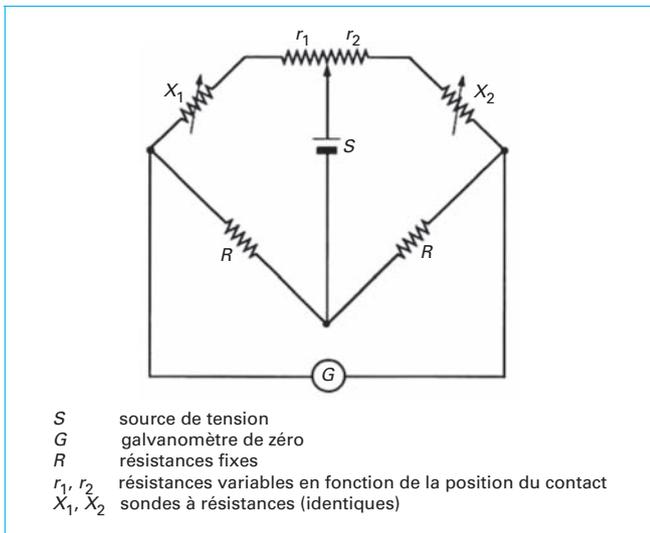


Figure 10 – Pont de Wheatstone pour la mesure de différences de températures

l'influence des résistances parasites des contacts mobiles, on obtient à l'équilibre :

$$X_1 - X_2 = r_2 - r_1 + (r_{l2} - r_{l1})$$

en tenant compte des résistances r_{l1} et r_{l2} des fils de jonctions entre les sondes de résistances X_1 à T_1 et X_2 à T_2 . On peut toujours s'arranger pour que r_{l1} et r_{l2} soient identiques à une température donnée mais si T_1 et T_2 sont sensiblement différentes, r_{l1} et r_{l2} ne sont pas nulles car les fils des deux sondes traversent des champs thermiques différents.

Pour des mesures précises, on pourra utiliser le montage à quatre fils de la figure 11 qui effectue une compensation de la résistance des conducteurs de liaison (comparable à la compensation d'espace nuisible des thermomanomètres). Il ne faut pas confondre

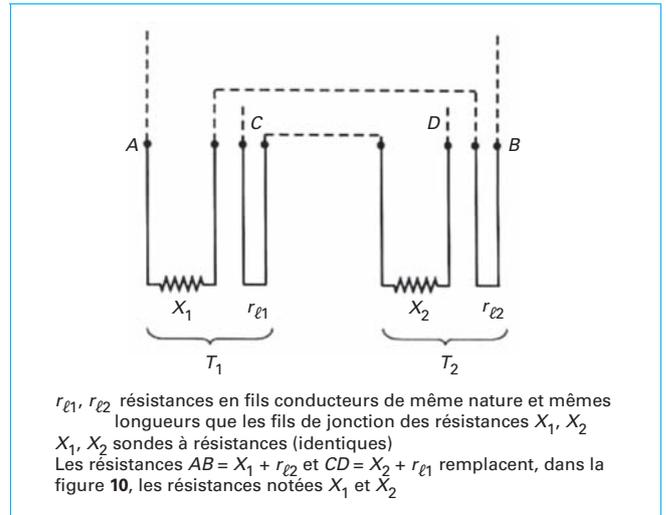


Figure 11 – Montage compensateur à quatre fils pour la mesure de différences de températures à l'aide de thermomètres à résistance

ce dispositif avec le montage à quatre conducteurs utilisé pour les mesures de haute précision des résistances étalons.

Finalement, lorsqu'on s'est arrangé pour que les résistances de ligne se compensent, on voit que la lecture de $r_2 - r_1$ (figure 10) donne la différence des résistances entre les deux sondes.

Les remarques faites au sujet des couples sont valables pour les résistances : si l'on veut traduire la différence de résistances en différence de températures, il faudra connaître l'ordre de grandeur des valeurs absolues, car les relations résistance-température ne sont pas linéaires. On recommande parfois l'emploi de résistances de cuivre dont la loi est bien linéaire, mais elles ne sont pas utilisables au-delà de 400 K à cause de leur oxydabilité.

■ Thermistances

Les thermistances ont deux avantages : coefficient de température élevé donc grande sensibilité et influence négligeable des fils de liaison parce que les résistances sont élevées (plusieurs kΩ) ; et deux inconvénients : la loi $R(T)$ n'est pas linéaire [$R = A \exp(b/T)$] ; les tolérances usuelles indiquées par les constructeurs sont assez élevées : ± 5 % sur la résistance nominale et ± 10 % sur l'indice de sensibilité. Moyennant des précautions particulières, on atteint cependant une interchangeabilité très acceptable.

L'ensemble de ces propriétés caractéristiques fait que les thermistances ne sont surtout utilisées, en montage différentiel, que dans les systèmes destinés à la régulation entre des milieux que l'on cherche à maintenir à un même niveau de température, d'ailleurs susceptible de varier dans le temps : on tire profit de l'excellente sensibilité sans être gêné par l'absence de linéarité, le manque d'interchangeabilité des sondes n'étant plus un handicap (cf. nota ci-après). Cependant, pour des mesures véritables de ΔT , on cherche à linéariser la réponse des détecteurs.

Nota : le pont de Wheatstone de la figure 12 permet d'équilibrer à une température T_0 donnée les deux thermistances X_1^0 et X_2^0 en jouant sur R : $X_1^0 / X_2^0 = r / R$. Lorsque les températures sont T_1 et T_2 , on a : $X_1 / X_2 = rR'$ à l'équilibre du pont. On en tire :

$$1/T_1 - 1/T_2 = 1/b \log (R/R')$$

en supposant que le coefficient b est le même pour les deux sondes de même fabrication. La première conclusion est que l'obtention de la différence $(T_2 - T_1)$ n'est pas simple ; la deuxième conclusion est que, si on laisse $R = R'$ (le déséquilibre du pont commandant un système régulateur), à l'équilibre du pont on aura $T_1 = T_2$, c'est-à-dire l'équilibre thermique. Cette affirmation repose sur l'identité des coefficients b [de $R = A \exp(b/T)$] des deux thermistances, ce qui ne pose pas trop de problèmes.

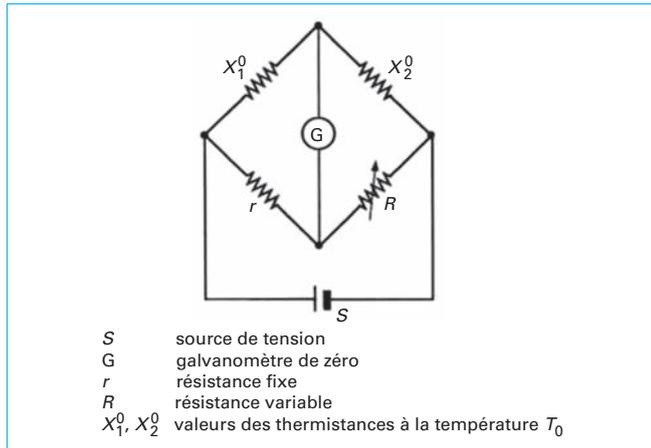


Figure 12 – Pont de Wheatstone simple pour la régulation à l'aide de thermistances

3.1.4.2 Gradients de température

■ Problème de mesure des gradients

La mesure des gradients de température est un cas particulier de la mesure des différences simultanées en deux points : on fait une mesure en A et B et on calcule le gradient $\Delta T/\Delta L$ si l'on connaît la distance ΔL des deux surfaces isothermes passant par A et B (figure 13) ; cela nécessite la localisation géométrique précise du lieu de la mesure. À vrai dire, la connaissance des orientations des isothermes est déjà une condition nécessaire à l'obtention de mesures correctes, puisqu'il faut disposer les détecteurs suivant ces isothermes pour minimiser les erreurs de conduction thermique.

Avec un couple thermoélectrique, il est tentant d'adopter la disposition de la figure 13a, la plus simple, mais aussi la plus mauvaise, parce que l'élément E_2 fait un court-circuit thermique entre A et B et que les éléments E_1 participent à des échanges complexes avec l'extérieur : la perturbation par le détecteur est donc énorme.

La disposition de la figure 13b est correcte : les fils du couple au voisinage des jonctions s'alignent suivant les surfaces isothermes sur une distance suffisante (7 cm d'après les normes d'étalonnage des couples).

Il n'est pas toujours facile de déterminer les isothermes, l'exploration méthodique étant très laborieuse (on simplifie beaucoup en s'aidant des considérations de symétrie les plus évidentes). Les procédés de mesure doivent être les plus ponctuels possible, susceptibles de n'être influencés que par une couche très mince quasi isotherme. On cherche, de plus, à fixer le détecteur dans un montage symétrique, où la surface isotherme étudiée soit équidistante des deux isothermes extrêmes touchant le détecteur. Ce n'est pas toujours faisable, si la répartition de température est complexe ; mais il n'est pas non plus possible, si tel est le cas, d'arriver simplement à déterminer la distribution des températures.

Une méthode telle que la **thermographie** est moins coûteuse pour dégrossir le travail. La thermométrie par ultrasons permet également d'atteindre la répartition des isothermes dans différents milieux [14]. Dans le cas des milieux transparents, la thermographie micro-onde permet des mesures de gradients au sein même du matériau (article *Radiométrie et thermographie micro-ondes* [R 3030]). Cette technique est très proche de la thermographie infrarouge. Elle s'en différencie par les longueurs d'onde utilisées : 3 à 30 cm au lieu du micromètre. La plupart des matériaux absorbent le rayonnement infrarouge et seules des températures de surface sont accessibles par cette technique. Certains milieux, tels que tissus vivants, matériaux hydratés ou agroalimentaires, textiles, certains matériaux de construction présentent une absorption aux micro-ondes très faible. Une analyse du bruit thermique proportionnel à T au-delà de 100 K

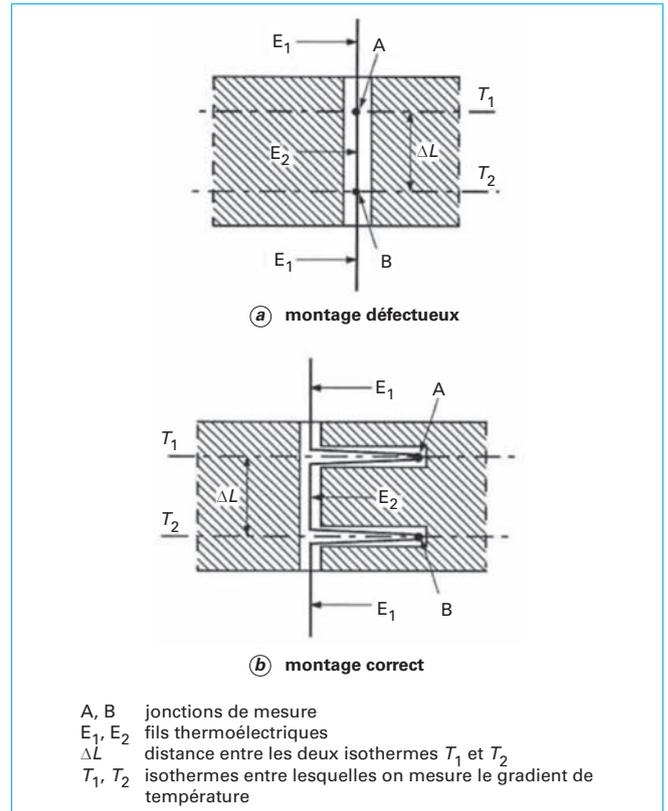


Figure 13 – Montage d'un couple thermoélectrique pour la mesure de gradients

permet, par exemple, de détecter des gradients de quelques degrés à plusieurs centimètres de profondeur.

■ Utilité des mesures de gradients

La mesure des gradients permet de calculer un flux de chaleur ΔQ lorsque la conductivité thermique λ du milieu est connue ou d'obtenir λ , caractéristique du milieu, à partir de ΔQ et du gradient de température, l'obtention de ΔQ impliquant des mesures calorimétriques.

La connaissance des gradients intervient dans la mesure des températures des gaz à l'aide de pyromètres à aspiration [15] ou dans celle des surfaces rayonnantes par calorfluxmètres [R 2752].

Une dernière application mérite d'être citée ici, bien qu'elle mette en jeu la détection de différences de températures plutôt que de gradients : la régulation d'un four à plusieurs zones thermiques différentes. Il s'agit, par exemple, d'une zone centrale (celle ayant la plus grande inertie) programmée en température et de zones latérales réglées par rapport à la zone centrale à l'aide de détecteurs différentiels et de sources thermiques indépendantes [16].

3.1.4.3 Mesure de flux thermiques

Dès qu'une différence de températures se manifeste entre deux points d'un système, un flux d'énergie thermique apparaît. Ce flux peut se présenter sous forme de conduction, convection ou rayonnement. Dans la pratique, ces trois modes de transfert sont présents et, par exemple, considérer les fluxmètres en conduction sans rayonnement semble quelque peu simpliste. Cependant, en première approximation et si possible après un calcul justificatif, on peut considérer que l'un des modes de transfert est prépondérant, selon la nature du milieu étudié et la gamme de températures considérée.

Le flux d'énergie thermique est lié à la différence de températures par un coefficient de transfert. La mesure directe de ce coefficient nécessite, entre autres, la mesure d'un flux thermique. On trouvera donc, dans la description de ces méthodes de mesure, des indications et précautions à prendre pour mesurer correctement un flux (article *Conductivité thermique des liquides et des gaz* [K 427]). Bien que la mesure de la diffusivité thermique n'impose pas celle d'un flux thermique, il est nécessaire de maîtriser au mieux cette grandeur.

Notons que la mesure de l'énergie thermique par un compteur tel qu'elle est décrite dans l'article *Compteurs d'énergie thermique. Répartiteurs de frais de chauffage* [R 3040] peut être considérée comme une mesure de flux global dans le milieu étudié. On mesure la différence de température d'un fluide caloporteur dont les variations d'enthalpie sont bien connues, entre la sortie et l'entrée d'une conduite noyée dans le milieu testé. Le produit de cette différence par le débit du fluide fournit une mesure de l'énergie échangée par la surface de la conduite.

■ Mesures de flux thermiques de conduction

Dans ce type d'appareillage, les détecteurs sont généralement des couples thermoélectriques, des résistances ou des thermistances. Dans l'article *Fluxmètres thermiques* [R 2900] consacré à ces mesures, l'auteur distingue trois types principaux de fluxmètres.

Le principe des **fluxmètres à gradients** est basé sur la mesure d'un gradient thermique engendré dans un milieu conducteur par la propagation de l'énergie thermique. L'élément sensible du calorimètre isotherme est un fluxmètre de ce type. Dans cette catégorie d'appareils, on mesure très précisément le flux thermique échangé entre la cellule laboratoire, siège d'une réaction physico-chimique et un thermostat [17].

Dans les **fluxmètres à inertie**, une pastille conductrice, de petites dimensions et de température uniforme, reçoit un flux thermique au contact de son environnement. L'analyse de la variation de sa température dans le temps permet de mesurer le flux incident.

Le principe des **fluxmètres à dissipation ou compensation de puissance** consiste à mesurer l'énergie dissipée dans une résistance chauffante destinée à compenser le flux incident à mesurer. Divers montages sont proposés dans l'article *Fluxmètres thermiques* [R 2900]. Les calorimètres DSC (*differential scanning calorimetry*) à compensation de puissance utilisent ce principe (article *Application des microcalorimètres aux mesures thermiques* [R 3010]).

■ Mesures de flux rayonnés

Dans ce type de fluxmètres, c'est l'énergie transmise par rayonnement qui est analysée. La gamme de longueur d'onde du rayonnement électromagnétique, support de l'énergie, change avec la température moyenne ; par conséquent, le type de détecteurs change aussi. La pyrométrie optique, la thermographie infrarouge ou micro-onde, de même qu'une bonne part des techniques de mesure de températures de surface, sont basées sur une analyse d'un flux radiatif. On trouvera dans les articles spécialisés du présent traité les caractéristiques des détecteurs utilisés ainsi que les montages qui y sont afférents.

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.

3.2 Méthodes de mesure liées à la localisation de la mesure dans le temps

Pour éviter de masquer la variation réelle de température d'un milieu étudié, le système de mesure doit répondre suffisamment rapidement. Cette variation peut être une fluctuation autour d'une valeur moyenne (cas d'un système réglé), une évolution lente monotone ou périodique, enfin un régime transitoire rapide. Dans ce dernier cas, des méthodes spéciales doivent être mises en œuvre.

Dans certains cas, on cherchera au contraire à amortir le signal reçu pour mesurer une température moyenne en augmentant volontairement le temps de réponse du capteur.

3.2.1 Différents types de courbes

■ Courbe directe : $T(t)$

Les analyses thermiques au refroidissement de deux corps subissant une transformation sont représentées figure **14a**. La courbe en trait plein correspond par exemple à la solidification d'un alliage entre les températures notées T_1 et T_2 . La courbe en pointillés est celle d'un corps pur (transformation à température constante notée T_1). Pour simplifier la discussion, on supposera que le refroidissement a lieu dans un four dont la température décroît linéairement en fonction du temps.

Avant le début de la réaction, l'échantillon et le four sont à la même température. Dès que la réaction démarre (en T_1), l'échantillon s'écarte de la loi linéaire, à cause du dégagement de l'énergie de réaction. En T_2 la réaction est terminée, la température de l'échantillon tend à rattraper celle du four (T_2 à T_3) ; la pente est alors très importante.

Les arrondis au voisinage de T_1 et T_2 , qui sont la conséquence entre autres du temps de réponse du détecteur de température, compliquent la détermination précise du début et de la fin de la réaction.

■ Courbe dérivée

On obtient une *courbe de différences* en mesurant, à intervalles fixes $(\Delta t)_0$, l'abaissement de température ΔT et en portant ΔT en fonction de la température ou du temps correspondant par exemple au milieu de l'intervalle. Pour l'analyse thermique, les courbes de différences sont assez imprécises à cause de la valeur finie de $(\Delta t)_0$.

Une courbe dérivée est obtenue pour $(\Delta t)_0$ infiniment petit au sens mathématique. Lorsque l'on dispose d'une courbe directe, il suffit de mesurer la pente de la tangente dT/dt au point de coordonnées T et t . On porte dT/dt en fonction de T (figure **14b**) ou en fonction de t (figure **14c**). On peut obtenir la dérivée automatiquement par différents systèmes électroniques mettant en jeu une constante de temps RC (résistance et capacité).

La courbe **14b** est obtenue sur un enregistreur à deux entrées X - Y et la courbe **14c** sur un enregistreur $Y(t)$. Un enregistreur double voie $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ permet de tracer simultanément $T(t)$ et dT/dt .

Il ne faut pas croire qu'une dérivation électronique soit toujours plus précise que l'opération manuelle à partir de la courbe directe. Les imprécisions d'appréciation peuvent être comparables dans les deux cas et la constante de temps du dérivateur peut être gênante car elle a pour effet d'amortir le système, donc de transformer les ruptures de pente en des arrondis. En particulier, au voisinage d'un point d'inflexion, où la pente passe par un extrémum, la précision est faible dans les deux cas. Pour un prix modeste, le dérivateur électronique a les avantages de reproductibilité, rapidité et facilité d'emploi.

Dans le cas général où la grandeur mesurée (résistance, f.é.m.) n'est pas fonction linéaire de T , on se souviendra qu'un dérivateur donne la dérivée de la grandeur d'entrée et non pas celle de la température.

Nota : on utilise parfois une *courbe inverse* obtenue en mesurant le temps Δt nécessaire à une variation fixée $(\Delta T)_0$ de température. Au NBS (National Bureau of Standards, maintenant NIST), cette méthode a été mise en œuvre pour l'étalonnage d'un grand nombre de couples thermoélectriques par comparaison à un étalon : la lecture est déclenchée chaque fois que la f.é.m. de l'étalon a varié de 0,5 mV. Une méthode semi-automatique a également été utilisée au NPL (National Physical Laboratory) [18].

À la limite où $(\Delta T)_0$ tend vers zéro, on obtiendra la courbe représentant l'inverse de la dérivée soit dt/dT . Ces courbes ont un aspect différent des courbes dérivées, mais leurs caractéristiques fondamentales sont tout à fait comparables.

Le développement des techniques micro-informatiques d'acquisition de données permet de résoudre facilement et avec une grande précision ce problème. On utilise alors, avant dérivation des courbes brutes, des techniques de lissage numérique qui amoindrissent

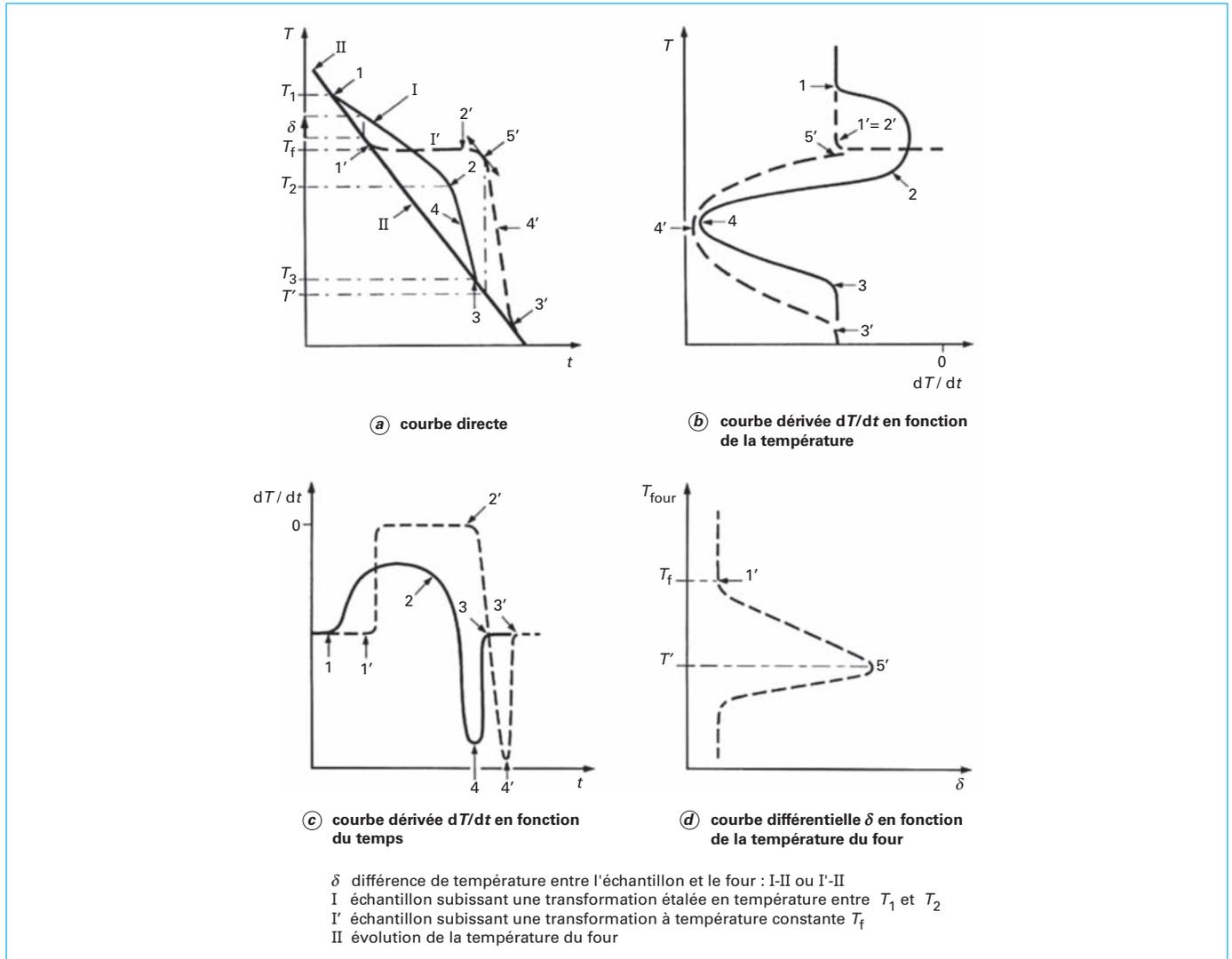


Figure 14 – Analyse thermique absolue, dérivée et différentielle

artificiellement le bruit de fond en apportant toutefois une constante de temps numérique supplémentaire, fonction croissante du filtrage ainsi effectué.

■ Courbe différentielle

Dans l'analyse thermique différentielle (article *Application des microcalorimètres aux mesures thermiques* [R 3010]), on utilise deux détecteurs en opposition : le premier dans l'échantillon, le deuxième dans un témoin ne subissant pas de transformation, qui suit donc la température du four. La température différentielle δ (figure 14a) peut être enregistrée en fonction du temps ou de la température de l'échantillon ou enfin de la température du témoin.

Cette dernière situation est celle de l'analyse dilatométrique différentielle (dilatomètre de Chevenard) où le témoin sert de détecteur de température, par l'intermédiaire de sa loi allongement-température [19]. Pour illustrer cela, sur la figure 14d, on a porté δ en fonction de la température du four, dans le cas particulier d'une transformation à température constante (courbe I en pointillés de la figure 14a). Le maximum de la courbe ne correspond pas au point de transformation : c'est la température T' du témoin où δ

est maximale, c'est-à-dire un peu après la fin de la transformation [c'est le point où la tangente à la courbe directe est parallèle à la courbe $T(t)$ du four]. La température de réaction est celle où δ commence à croître (T_f sur la figure 14d).

Dans le cas d'une réaction étalée en température, la courbe δ a la même forme que celle présentée : la température de début de transformation serait celle notée T_f ; la température de fin de transformation serait supérieure à T_f ; elle serait comprise entre T_f et T' (figure 14d).

■ Comparaison des différents types de courbes

En analyse thermique, on voit d'après les figures 14 que le maximum d'indication est obtenu sur la courbe directe. Les courbes dérivées, inverses ou différentielles ne peuvent suffire ; elles sont un complément permettant un gain de sensibilité dans la détermination des points singuliers.

Il est bon de garder à l'esprit que toute augmentation de sensibilité amplifie les variations accidentelles, de telle sorte que l'examen de la courbe peut suggérer des arrêts qui n'existent pas dans le phénomène étudié. La méthode différentielle par exemple, d'un

usage assez délicat, ne devra être utilisée que dans l'étude de phénomènes trop peu accentués pour être décelés nettement sur une courbe directe ou dérivée.

Les courbes dérivées ou différentielles sont plus spectaculaires que la courbe directe, mais il est généralement incorrect de dire qu'elles sont plus précises : elles peuvent difficilement donner plus de détails ou de précisions que ceux obtenus à partir de l'examen attentif de la courbe directe (on se reportera par exemple à la référence [18]). Le problème fondamental est, en réalité, de ne pas augmenter excessivement la sensibilité d'un appareil si l'on veut garder une vue saine du phénomène.

L'obtention des dérivées de température présente un grand intérêt dans les systèmes réglés (à action dérivée) ou dans certaines techniques de mesure des températures rapidement variables [20]. On notera également que certains types de détecteurs de température sont susceptibles de mesurer directement la dérivée de la température : thermomètres à effet pyroélectrique [21] ou à effet capacitif [22].

3.2.2 Température moyenne dans le temps

On utilise parfois des appareils à grande constante de temps (plusieurs minutes) pour éviter de brouiller la mesure par l'intervention de variations de température plus ou moins aléatoires risquant de masquer l'allure générale.

Lorsque la constante de temps de l'appareillage de mesure est grande, c'est-à-dire lorsque le système est très amorti, on enregistre des segments de droite et il faut un signal d'entrée dépassant un certain seuil (bande morte) pour que la plume de l'enregistreur se déplace. Le déplacement par bonds de la plume est l'indice d'un suramortissement (on amortit souvent pour éviter les parasites électriques).

Un système simple de deux détecteurs de temps de réponse très différents en montage différentiel fournit un signal utilisable comme grandeur dérivée. Le premier thermomètre, de forte inertie, donne une température moyenne et reste toujours en retard sur le deuxième, dont la constante de temps est très faible. L'écart entre les deux détecteurs est grossièrement proportionnel à la dérivée de la température du milieu par rapport au temps. On remarquera que ce processus est tout à fait voisin de celui qui se passe en analyse thermique, lorsque l'échantillon subit une transformation.

3.2.3 Températures minimales et maximales

Assez fréquemment, la mesure de température a pour but essentiel la seule détermination d'un minimum ou d'un maximum, par exemple pour contrôler que le milieu étudié reste entre certaines limites acceptables ou pour déclencher une alarme ou une régulation.

Les méthodes de mesures susceptibles d'enregistrement résolvent le problème en donnant, de plus, les instants du minimum et du maximum. Une solution de ce type est parfois luxueuse en comparaison du problème à résoudre ; elle présente l'avantage, avec des enregistrements multivoies, de permettre la surveillance d'un grand nombre de détecteurs et, de ce fait, elle peut devenir plus économique qu'un montage de thermomètres indépendants dont la lecture est moins commode, à cause de la dispersion, dans l'espace, des différents points de mesure.

Les thermomètres à liquide dans le verre présentent plusieurs versions parfaitement adaptées aux mesures de minima et de maxima. Sans entrer dans les détails, citons :

- le thermomètre médical (à maximum) ;
- le thermomètre à minimum de Rutherford ;
- le thermomètre de Six à minimum et maximum ;
- les thermomètres à contacts, utiles en régulation.

Les **thermomomètres** et les **thermomètres à dilatation de solides** peuvent être équipés d'index ou de contacts de minimum et de maximum, le principe de fonctionnement de ces appareils étant

tout à fait comparable à celui des thermomètres à dilatation de liquides.

Les **repères thermométriques** irréversibles, à changement de couleur (peintures, étiquettes adhésives) ou de forme (cônes de Seger) fournissent une indication approchée des températures maximales atteintes.

À titre d'exemple, on trouve sur le marché des étiquettes adhésives permettant des mesures entre 310 et 873 K. Une étiquette comporte par exemple 8 pastilles virant au noir pour une température critique fixée, ces températures pouvant être espacées de 5 en 5 K avec une précision de $\pm 1\%$ et un temps de réponse inférieur à 1 s.

3.3 Surveillance continue d'un grand nombre de températures

Dans les installations importantes, les températures (ainsi que d'autres grandeurs) sont à surveiller de façon permanente, en de nombreux points éloignés les uns des autres et parfois d'accès difficile. C'est le cas par exemple des réacteurs nucléaires, des diesels de navires, des essais aéronautiques, etc.

■ Choix des points de mesure

Il est indispensable de choisir judicieusement les points de mesure en analysant les conditions caractéristiques et de ne pas multiplier inutilement les détecteurs. Cependant il ne faut pas, par souci d'économie, faire jouer plusieurs rôles au même thermomètre, en particulier ceux de mesurer et simultanément d'actionner un régulateur : le détecteur de mesure doit être situé dans la zone de travail, le détecteur de régulation à proximité des sources de chauffage. Souvent, la mesure sera faussée si l'on place un enregistreur et un régulateur en parallèle sur le même thermomètre. Le fait de *séparer les fonctions* permet de corriger manuellement si l'ensemble de régulation tombe en panne, ou de continuer à régler si la mesure est défaillante.

Dans des conditions d'environnement sévères, les endroits d'accès difficile peuvent être atteints à l'aide de couples thermoélectriques enrobés, de faible diamètre, dont la longueur peut aller jusqu'à 100 m, ou de thermomanomètres sous enveloppe métallique dont les capillaires de liaison ont jusqu'à 50 m de long.

■ Transmission du signal

La multiplicité des points de mesure n'implique pas nécessairement la multiplicité des lieux de lecture. En particulier, avec les méthodes électriques, on peut grouper les appareils de mesure alors que les détecteurs sont dispersés à des distances variables.

L'utilisation d'émetteurs de télé mesure résout certains problèmes particuliers de transmission à longue distance (100 m). De même, dans certains cas, la transmission par fibres optiques peut s'imposer, en raison de son insensibilité aux parasites électriques par exemple. Cette technologie est actuellement en plein développement (article *Capteurs de température à fibres optiques* [R 2800]).

Les transmetteurs électriques sont presque toujours utilisés pour la centralisation des mesures de température car, dans la plupart des cas, il est possible de convertir le signal thermométrique en signal électrique.

Parmi les modes de transmission électriques, on distingue deux grands types de liaisons : les liaisons parallèles et les liaisons en série. Généralement, elles mettent en jeu l'informatique pour leur gestion.

Les liaisons parallèles sont réservées aux communications relativement courtes entre un grand nombre d'appareils, avec un débit d'informations élevé ; par exemple : IEEE 488/IEC 625-1 Mbaud sur une ligne connectée à 15 appareils sur 20 m au maximum. Leur mise en œuvre est plus onéreuse que les liaisons en série, elles nécessitent un grand nombre de câbles.

Les liaisons en série sont numériques ou analogiques. Le standard classique RS 232 C permet un débit d'environ 20 kbauds sur 15 m. On peut prévoir des liaisons plus longues si l'on accepte

une limitation de débit. La variante RS 423 A permet un débit de 100 kbauds sur 1 200 m. Pour couvrir de grandes distances, la liaison en série analogique (ou boucle de courant 0-20 mA, 4-20 mA) est la mieux adaptée. Ses capacités sont typiquement 9 600 bauds sur 200 m, 600 bauds sur 3 000 m. Elle présente une bonne immunité aux parasites.

Il faut aussi mentionner la possibilité de se connecter à un réseau local (de type Éthernet : développement des liaisons par fibres optiques), à une ligne téléphonique par l'intermédiaire d'un modem, ou plus simplement en utilisant comme support une ligne d'alimentation électrique 50 Hz.

■ **Afficheurs et enregistreurs**

La chaîne de mesure comporte un certain nombre d'appareils d'affichage et d'enregistrement, à commutation manuelle ou automatique (*multiplexeurs, scrutateurs*), contrôlant plusieurs dizaines de détecteurs et, au besoin, capables d'actionner des alarmes ou des actions de coupure, de régulation, etc.

Sur un oscilloscope, on peut faire apparaître des rayons vecteurs de longueurs proportionnelles à la température contrôlée. Grâce à la rémanence de l'écran, on obtient un panorama complet et permanent des températures à surveiller. Au lieu d'une image en coordonnées polaires, on peut aussi faire apparaître les températures en coordonnées cartésiennes, ce qui est plus parlant quand on veut suivre les températures le long d'un circuit donné.

L'informatique permet une acquisition, un stockage et un traitement des informations. Elle permet, après traitement du signal, une visualisation claire et facilement modifiable des anomalies du système en surveillance et du système de surveillance lui-même. Les opérations manuelles éventuelles passent alors par un simple clavier d'ordinateur.

■ **Sécurité de rupture des couples thermoélectriques**

Dans les ensembles complexes, les détecteurs ne doivent pas avoir de points communs et ceux qui sont essentiels doivent être équipés de sécurités indiquant la rupture de l'élément sensible.

Les deux conditions sont en partie liées : en effet, si un ensemble de couples a un fil commun, la rupture de l'un d'entre eux n'est pas facilement détectée ; on risque de continuer à lire une f.é.m. apparemment correcte, alors que les conditions réelles sont devenues désastreuses. Les sécurités de ruptures sont souvent intégrées dans les transmetteurs (par exemple l'indication de lecture passe à une valeur maximale ou minimale), mais d'autres solutions sont possibles [23].

Un montage commode évitant les points communs entre couples est représenté figure 15 : on peut ainsi associer une jonction de référence commune à plusieurs dizaines de couples, en économisant les fils de matériaux précieux et les câbles de compensation (si l'appareil de lecture est un galvanomètre, il faut que toutes les voies aient la même résistance et que cette résistance soit celle prévue lors de l'étalonnage, l'ajustage pouvant se faire par un jeu de résistances de tarage).

En **conclusion**, les moyens d'enregistrement actuels sont très diversifiés : enregistreurs classiques à plusieurs directions (4 ou 5 au maximum) ou à une seule direction mais couplée à un commutateur automatique ; imprimantes donnant un enregistrement discontinu ; support magnétique (jusqu'à 500 voies en parallèle), pour un dépouillement ultérieur. À noter qu'un dispositif automatique de commutation peut être programmé pour effectuer des séquences diverses : 1 2 3 4 5 1 2... ou 1 2 3 1 4 5 1..., le deuxième exemple correspondant au cas où la température de la voie 1 est primordiale. À côté de tous ces ensembles élaborés, on n'oubliera pas les services que peuvent rendre les peintures et repères thermométriques. Dans tous les cas, il ne faut pas perdre de vue que, *in fine*, c'est l'opérateur, dernier maillon indispensable de la chaîne de mesure, qui interprète l'indication de l'instrument et c'est donc par lui qu'elle prend une signification.

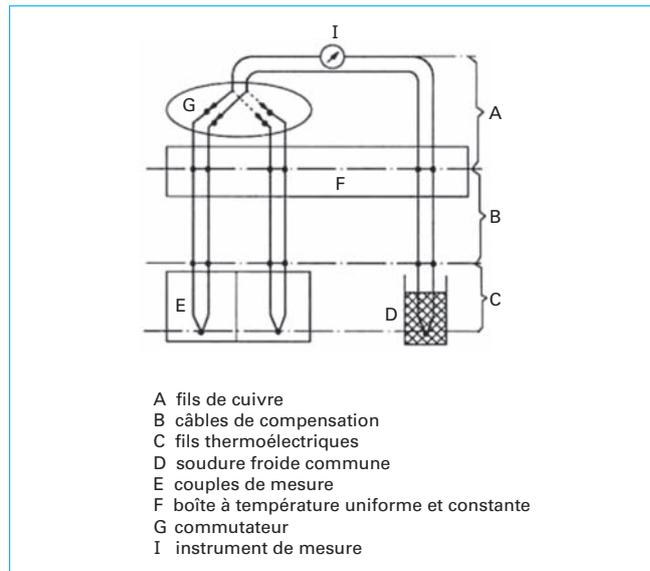


Figure 15 – Montage de plusieurs couples thermoélectriques avec soudure froide commune

3.4 Mesure de la température de corps en mouvement

Il est souvent difficile de scinder les divers aspects d'un problème pratique en éléments simples, à cause des couplages toujours présents. Pour la clarté de l'exposé, sont examinés distinctement la mesure de la température dans un solide en mouvement et dans un fluide (liquide ou gaz) généralement soumis à une convection, naturelle ou forcée.

3.4.1 Température de solides en mouvement

Ce paragraphe traite, sous forme d'exemples, de la mesure de la température de solides mobiles par rapport à l'observateur. Dans la plupart des cas, il s'agit de mesurer une température de surface. On consultera à ce sujet les articles du présent traité. Les méthodes de choix sont alors la pyrométrie optique, la thermographie infrarouge et les techniques utilisant les fibres optiques lorsqu'elles sont applicables. Jusqu'à quelques centaines de degrés Celsius, les crayons et pastilles à changement de couleur sont utilisés. Lorsqu'une mesure à cœur est indispensable, il faut faire appel aux détecteurs travaillant par contact. Les problèmes de liaison sont alors difficiles à résoudre, en fonction de la nature du mouvement et du domaine de température. Dans certains cas, on cherche à contrôler indirectement la température moyenne en surveillant une propriété du système : résistance, dilatation, magnétisme. Les solutions adoptées, rarement parfaites, sont toujours des compromis correspondant à chaque cas d'espèce.

■ **Mouvement continu de translation**

La situation type est celle d'une chaîne de traitement thermique : four à défilement, séchoir tubulaire, bande sur chemin de roulement, fil en cours d'étirage, etc.

– **Exemple 1** : dans un four à défilement où les pièces (ou le produit en vrac) passent d'une zone à l'autre en continu, on se contente, la plupart du temps, de prises de températures en divers points : à proximité des éléments chauffants pour en surveiller le fonctionnement, à la sortie du four pour contrôler l'homogénéité thermique des produits, au point le plus chaud pour déterminer la température maximale atteinte. Ce qui importe avant tout est la reproductibilité du traitement, vérifiée par des méthodes propres à

la fabrication envisagée ; il n'est donc pas essentiel de mesurer la température des pièces elles-mêmes. Dans certains cas, on peut obtenir cette température en utilisant un système de mesure complet, thermostaté, mobile dans le four en même temps que les produits : détecteur couplé à un émetteur radio (par exemple, Leeds et Northrup, Jumo Régulation, etc.) ou à un enregistreur magnétique.

– **Exemple 2** : la température d'une bande défilant sur un chemin de roulement sera contrôlée par des méthodes optiques, essentiellement la pyrométrie à rayonnement total ou à récepteurs sélectifs. Le passage devant la lunette de zones d'émissivités différentes (état de surface, rebonds de la feuille, etc.) rend la lecture erratique et l'on cherche souvent à atténuer la sensibilité en amortissant les appareils d'affichage, c'est-à-dire en augmentant la constante de temps. On obtient ainsi une température moyenne. Certains systèmes automatiques permettent d'éliminer cet amortissement lorsque la fluctuation de température apparente vient à sortir d'un intervalle fixé ; on suit alors les variations instantanées au lieu de la valeur moyenne. On se sert parfois de détecteurs de contact munis d'une lame souple frottant sur la surface, pour contrôler la température de matériaux fragiles tels que : papier, textile. D'autres types de détecteurs sans contact bâtis selon le principe de compensation des flux de chaleur sont destinés à la mesure de températures sur les fils et les bandes [24].

– **Exemple 3** : mesures répétées sur des pièces identiques. Il s'agit d'un cas particulier du précédent, par exemple : contrôle de la soudure de boîtes de conserve, de la température de bouteilles sortant d'un four, etc. Le milieu étant discontinu et répétitif, la mesure est effectuée en un point fixé de chaque élément, au passage de celui-ci. Une lunette infrarouge, munie d'un dispositif électronique de détection, permet un affichage continu de la température cherchée.

Lorsque le signal doit servir à la régulation, il est impératif, afin d'obtenir une action reproductible, de prélever l'information toujours au même endroit de l'objet, car celui-ci peut présenter des hétérogénéités de température dans l'espace. Un circuit électronique retardateur réalise cette condition.

■ Mouvement continu de rotation

– **Exemple 4** : cylindre de laminoir ou cylindre sécheur de papeterie. On a envisagé différentes techniques relevant toutes des méthodes de mesure en surface. La pyrométrie optique est mal adaptée car les surfaces sont très lisses (conditions éloignées de celles du corps noir) ; les couples à archet frottant sur le cylindre sont le siège d'une erreur systématique d'échauffement. Les papiers ont adopté une solution élégante mettant en œuvre un cylindre annexe calorifugé, qui contient dans son axe un détecteur fixe et qui tourne sans frotter sur la surface à contrôler [25].

– **Exemple 5** : four rotatif. Lorsqu'il est possible de placer un détecteur fixe dans l'axe de rotation, la préférence reviendra aux méthodes optiques. Dans un broyeur, l'apparition continue de surfaces fraîches d'émissivités variables pose le même problème que dans l'exemple 2 ; on obtient une valeur moyenne de température en augmentant le temps de réponse de la lunette.

– **Exemple 6** : arbre creux. La mise en œuvre de détecteurs électriques logés dans l'axe nécessite des contacts tournants à faible couple de freinage. Lorsque l'on a affaire à une résistance thermométrique, les résistances de contact doivent être faibles ou tout au moins constantes. Il existe de nombreux exemples de contacts tournants au mercure qui permettent des vitesses de rotation élevées (30 000 tr/min avec une résistance de contact de 0,1 Ω ou 4 000 tr/min avec une résistance de contact de 10^{-3} Ω).

On cite l'exemple d'un frotteur en graphite contenant 90 % d'argent, sur un anneau en argent, avec une résistance parasite de 0,02 à 0,04 Ω au cours d'une utilisation continue de 40 h à 7 000 tr/min [26].

Pour l'utilisation des couples thermoélectriques, le problème est comparable : des f.é.m. parasites naissent dans les contacts qui, pour une friction correcte, doivent être de natures différentes. L'erreur peut être importante car le frottement dégage de la chaleur. Les alliages thermoélectriques usuels n'étant pas utilisables en

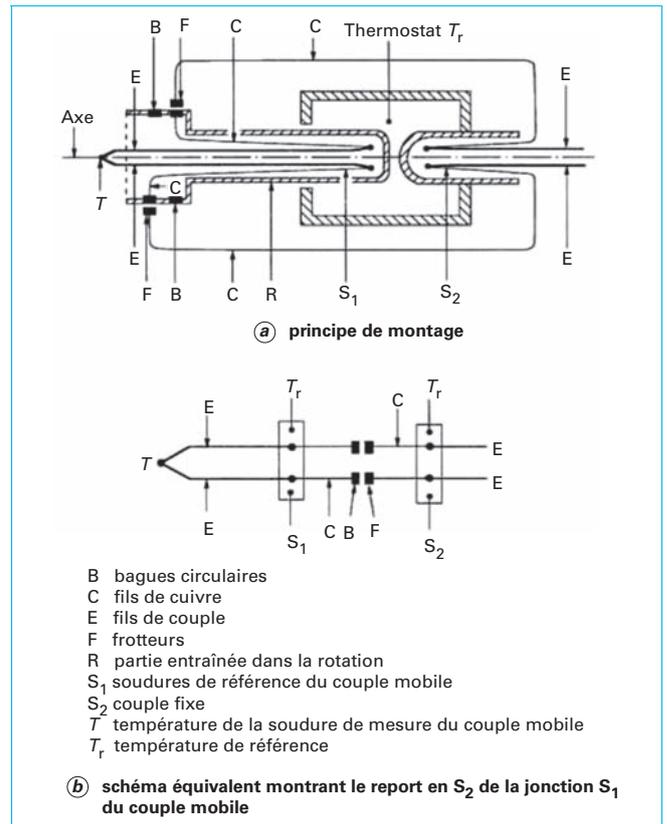


Figure 16 – Montage d'un couple thermoélectrique dans un arbre tournant permettant de diminuer l'influence parasite des contacts mobiles ([28], p. 236)

contacts mobiles, on se sert le plus souvent des combinaisons argent, or, cuivre présentant de faibles pouvoirs thermoélectriques. Le montage de la figure 16, qui permet de s'affranchir de ce problème, offre la possibilité de choisir au mieux la nature des contacts.

Une autre solution supprimant les contacts mobiles est celle du couplage inductif. Le couple thermoélectrique mobile (figure 17) est en série avec une bobine entraînée dans le mouvement de rotation et servant d'inducteur à un alternateur de construction spéciale.

La soudure de référence se trouve dans un thermostat. Lorsque le circuit thermoélectrique est le siège d'un courant, l'oscillographe détecte une tension dans l'enroulement secondaire. On règle le thermostat pour que cette tension soit nulle : la température cherchée est alors égale à celle du thermostat [26].

Une méthode de couplage inductif est également possible pour les détecteurs à résistance, dans le domaine des fréquences radio : les variations de la résistance placée dans un circuit oscillant modifient le couplage entre l'émetteur et le récepteur fixe. La mesure n'est pas continue, elle a lieu une fois par tour, au moment où le circuit oscillant passe entre l'émetteur de puissance et le récepteur (figure 18). La sensibilité est indépendante de la vitesse de rotation, et l'on peut s'arranger pour que la tension lue soit fonction linéaire de la résistance thermométrique [26].

– **Exemple 7** : moteurs électriques, alternateurs, turbines. On peut surveiller l'échauffement des moteurs électriques en contrôlant la résistance des enroulements.

Une méthode plus sensible consiste à utiliser des thermistances, qui sont bien adaptées au domaine de température étudié.

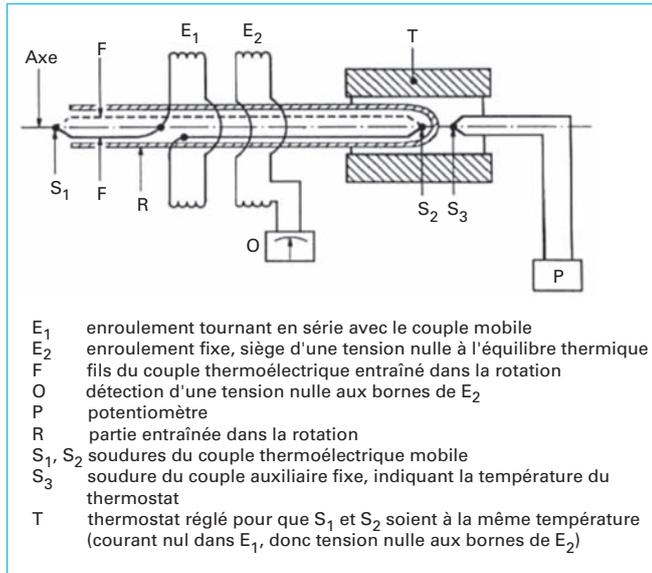


Figure 17 – Dispositif de couplage inductif pour la mesure de température dans un arbre tournant à l'aide d'un couple thermoélectrique ([28], p. 241)

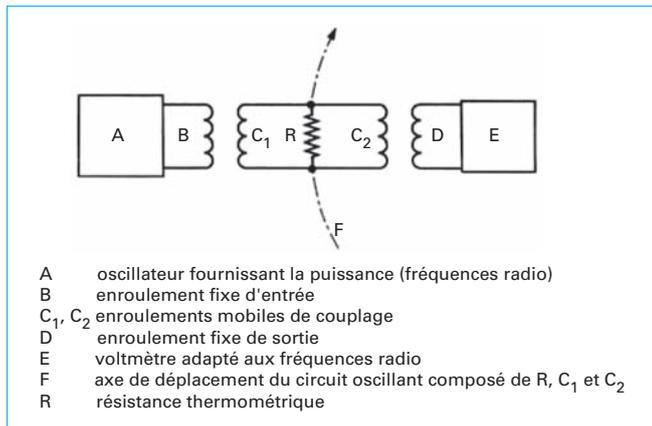


Figure 18 – Dispositif de couplage inductif pour la mesure de température sur une pièce en rotation à l'aide d'un thermomètre à résistance ([28], p. 244)

Les problèmes de contacts tournants sont assez faciles à résoudre car les thermistances ont des résistances élevées.

– **Exemple 8** : température atteinte au frottement. Par exemple, dans l'usinage au tour, on peut considérer que le contact pièce-outil de deux surfaces métalliques propres est une jonction thermoélectrique, permettant d'atteindre la température à la pointe de l'outil. Ce procédé est assez délicat à utiliser dans le cas général des températures de frottement, car le métal le plus mou laisse une couche de transfert sur le plus dur et la f.é.m., qui normalement doit croître avec la quantité de chaleur dégagée, reste alors constante ou décroît [26].

■ **Mouvement alternatif ou oscillant**

Exemple 9 : pistons, soupapes de moteurs, etc. Les couples thermoélectriques enrobés de faibles dimensions (Thermocoax TC SA, par exemple), sont assez souples pour tenir plusieurs centaines d'heures lorsqu'on les monte sur des soupapes en mouvement.

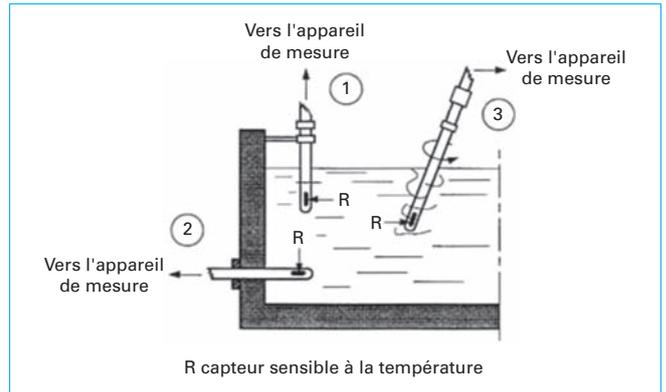


Figure 19 – Principe de montage de thermomètres dans un liquide au repos

On a utilisé dans les pistons de moteurs Diesel des émetteurs de télémessure alimentés par pile, fixés sur la chemise intérieure, la sonde étant placée dans la couronne du piston. Ces émetteurs supportent une accélération de 30 000 g.

Lorsque les solutions précédentes sont inapplicables, il faut mettre en œuvre des dispositifs à contacts glissants ou intermittents ou encore à couplage inductif ; cela en fonction de l'amplitude du mouvement et des accélérations. Avec des contacts intermittents, la mesure a lieu aux moments où la vitesse est presque nulle : le temps pendant lequel se produit le contact doit être suffisamment long par rapport au temps de réponse de l'appareil (on utilise en général un oscillographe).

3.4.2 Mesure de la température dans un liquide

3.4.2.1 Liquides non brassés

■ **Emplacement du capteur dans le liquide**

Suivant la position du capteur dans un liquide au repos, on peut obtenir des informations différentes. En effet, si le mode de chauffage ne favorise pas les échanges par convection libre, il se produit un classement des couches liquides suivant leur densité (figure 19).

Les thermomètres placés en 1 ou 2 donneront des indications différentes.

En position 2, on contrôlera mieux une surchauffe éventuelle (cas d'un chauffage par le fond) ; en position 1, on aura une mesure par défaut (par rapport à 2, avec $T_1 < T_2$) qui sera peut-être plus représentative du tiers supérieur de la cuve (cas d'un bain de trempage, par exemple).

Une régulation devra être commandée par 2 (ou toute autre position minimisant les délais de transmission thermique).

Pour obtenir une mesure moyenne plus valable, on peut agiter le liquide directement avec le thermomètre (position 3). Celle-ci correspond alors à une mesure discontinue à précision et signification physique élevées.

Dans ce schéma général, le capteur R peut être quelconque (à dilatation, résistance, couple), et il est aussi possible d'adapter cette disposition aux mesures optiques.

Nota : comme il faut éviter une visée directe de la surface libre (la température de la surface n'est pas identique à celle de la masse liquide et les émissivités du liquide interviendraient), on procède par soufflage d'un gaz inerte dans un tube qui sert de canal de visée (figure 20).

Mentionnons que c'est cette disposition qui a été retenue dans le procédé *Ray-o-tube* avec un récepteur à rayonnement total. Ce procédé présente cependant un manque de fidélité et est souvent abandonné au profit de méthodes par immersion de couples thermoélectriques.

Le récepteur à rayonnement total peut être remplacé par un pyromètre bichromatique qui élimine l'influence des variations, au cours du soufflage, de l'angle solide de visée.

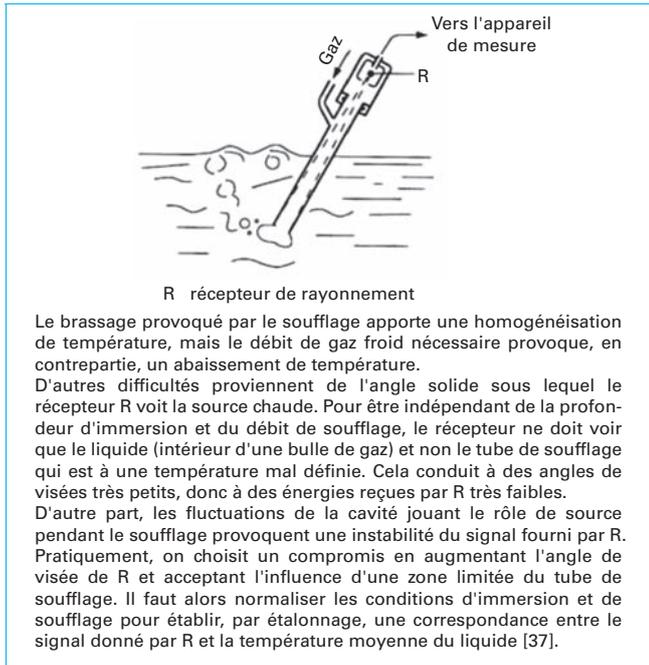


Figure 20 – Mesure optique de températures par soufflage dans un liquide

■ Cas particulier des bains métalliques

L'exemple des bains métalliques montre, du fait des conditions extrêmes de la mesure (1 300 à 2 100 K), que pour un problème particulier la solution est toujours un compromis. Dans ce cas, la difficulté de la mesure en bain fluide est couplée au problème de la consommation de métal coûteux, de corrosion des gaines et donc du prix de la mesure.

La température d'acier liquide avant la coulée se situe vers 1 900 K. Afin de diminuer le coût de la mesure, diverses solutions ont été apportées : effectuer une mesure rapide, renouveler fréquemment le couple au niveau de la soudure chaude ou, au contraire, améliorer la protection des fils dans cette zone.

■ Le schéma général du montage de la canne pyrométrique est donné sur la figure 21 [27]. La canne est composée d'un tube A (21 x 27) en acier, coudé pour faciliter la mise en place de la tête de mesure dans le convertisseur. Celle-ci est protégée par des manchons de graphite C maintenus en place par un ressort. La soudure chaude du couple B est protégée par une gaine en silice fondue S, fixée à un bouchon de graphite G ajusté dans le manchon en acier M. Les deux fils du couple passent dans des isolateurs bifilaires en stéatite (zone à $T \leq 1\,300\text{ K}$) puis en mullite ou alumine.

■ Les isolateurs de la soudure chaude peuvent présenter divers aspects (figure 22). Les couples thermoélectriques étant en platine et en alliage platine-rhodium, il faut éviter tout contact contaminant avec la silice généralement utilisée comme réfractaire de la gaine entourant la soudure chaude. Pour cette raison, les montages classiques (figures 22a et 22b) ne sont pas acceptables, car ils n'évitent pas ces contacts entre fils métalliques et gaines. Dans le montage b en bifilaires, le contact direct est évité le long de la génératrice de la gaine mais engendre des tractions et cisaillements plus importants du fil de platine. La taille en sifflet du protecteur bifilaire est un compromis acceptable (figure 22c). Une encoche dans le biseau sur une longueur de l'ordre du centimètre permet de loger la soudure en évitant la pollution du métal et permet un échauffement rapide sous l'influence du rayonnement du bain au travers de la gaine de silice fondue S généralement transparente.

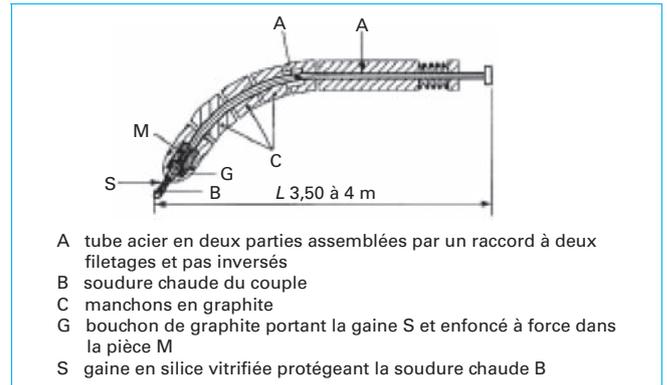


Figure 21 – Canne pyrométrique à immersion (modèle léger)

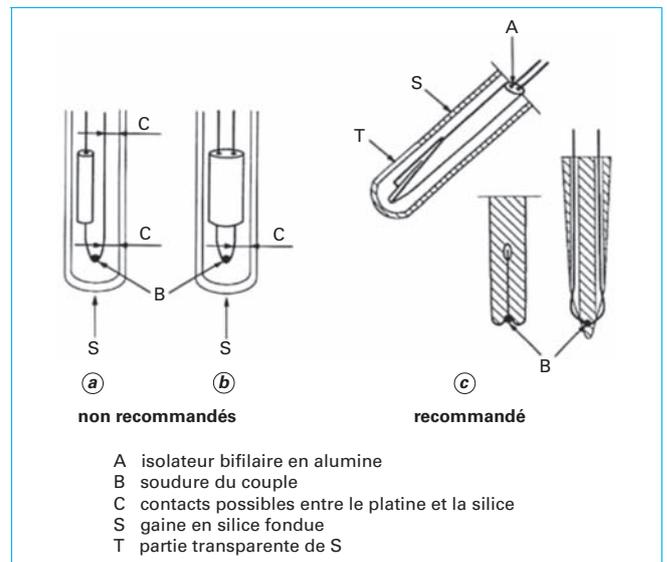
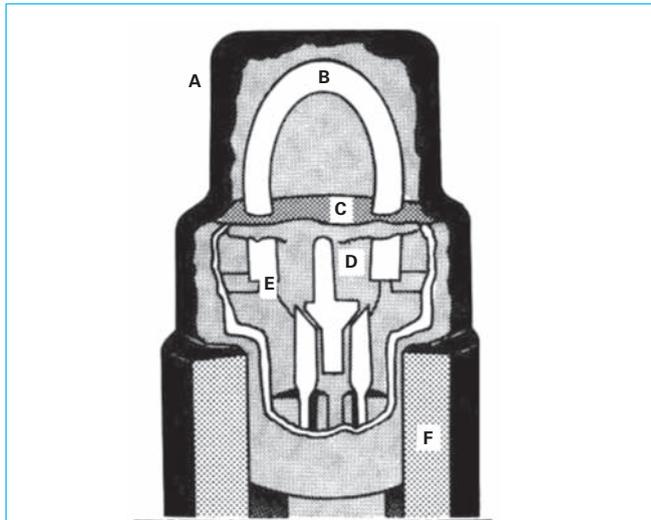


Figure 22 – Disposition d'un isolateur mono ou bifilaire

■ Une solution élégante au problème consiste à rendre interchangeable la tête de mesure à son extrémité (embouts consommables Leeds & Northrup, figure 23). Chaque tête de mesure, constituée par le couple dans un tube de silice fondue, ne sert qu'une seule fois et se remplace aussi facilement qu'un fusible. Un capot métallique serti protège le couple et le tube de silice lors de la mise en place de la canne pendant la traversée du laitier, puis se dissout dans le bain métallique, laissant le couple dans son tube de silice se mettre en équilibre thermique avec celui-ci. Par cette technique, une fidélité dans la mesure est obtenue mais au prix d'un accroissement de 50 % du prix global de mesure.

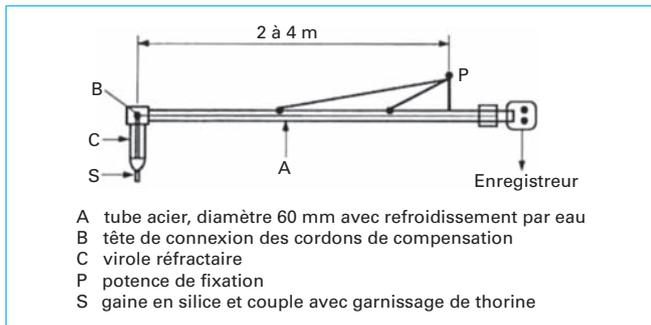
■ En utilisant les travaux de M. Chaussain [28] sur les contaminations apportées aux fils de platine et d'alliage platine-rhodium par les différents réfractaires utilisables comme isolants thermiques, on a été conduit à utiliser la thorie au voisinage de la soudure chaude. Un exemple de canne équipée d'une circulation d'eau et d'une tête interchangeable est donné sur la figure 24. Le temps de réponse de ce montage est un peu plus important que celui des montages précédents, toutefois la meilleure protection du couple équilibre cette conséquence d'un dispositif lourd.

■ Différents matériaux peuvent être utilisés pour confectionner les gaines protectrices. La silice fondue convient bien pour les mesures rapides dans les fontes et aciers liquides, mais ne supporte



- A capot métallique, destiné à fondre dans le bain
- B couple thermoélectrique (type R, S ou B)
- C corps réfractaire
- D support du couple thermoélectrique
- E soudures entre métaux nobles et métaux de base
- F tube de protection en carton

Figure 23 – Embout consommable Temtip® (Leeds & Northrup)



- A tube acier, diamètre 60 mm avec refroidissement par eau
- B tête de connexion des cordons de compensation
- C virole réfractaire
- P potence de fixation
- S gaine en silice et couple avec garnissage de thoriane

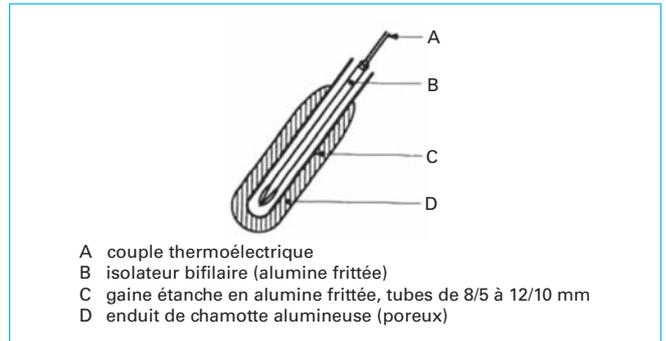
Figure 24 – Canne à immersion pour fours à sole (modèle à circulation d'eau)

pas une immersion de plus de cinq à dix minutes, ni les aciers spéciaux dont la température de coulée est très élevée, ni les alliages d'aluminium. Pour les mesures à hautes températures (jusqu'à 2 100 K), on emploie des gaines en **alumine frittée**, protégées par un revêtement extérieur en chamotte alumineuse (figure 25). Ce revêtement est destiné à éviter le choc thermique dû à l'immersion. Cette disposition doit aussi être prise pour les mesures continues ou de longue durée dans les chenaux de coulée ou les dispositifs de coulée continue, par exemple.

Des gaines mixtes métal-céramique ou **cermet** existent sous différents noms commerciaux et peuvent avantageusement remplacer la gaine de silice dans le cas où le laitier corrosif dissout celle-ci. Leur tenue à la corrosion est excellente mais elles peuvent être sensibles au choc thermique. Un préchauffage à 1 600 K pendant cinq minutes est à recommander. Le couple doit être protégé de l'action contaminante du **cermet** par une mince gaine en alumine.

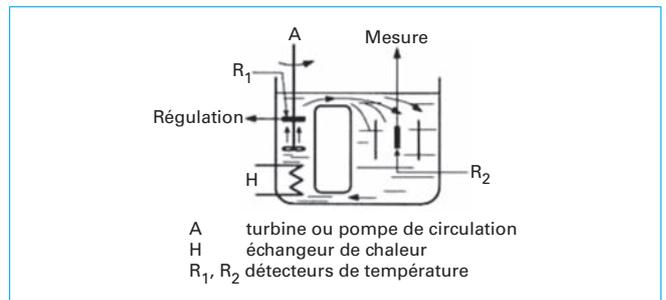
3.4.2.2 Liquide en écoulement

Dans les exemples qui vont suivre, toute la masse fluide est en écoulement continu devant le capteur immobile.



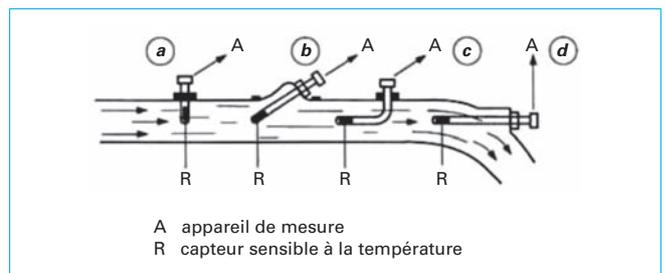
- A couple thermoélectrique
- B isolateur bifilaire (alumine frittée)
- C gaine étanche en alumine frittée, tubes de 8/5 à 12/10 mm
- D enduit de chamotte alumineuse (poreux)

Figure 25 – Gaine en alumine avec revêtement en chamotte



- A turbine ou pompe de circulation
- H échangeur de chaleur
- R₁, R₂ détecteurs de température

Figure 26 – Thermostat à circulation de liquide



- A appareil de mesure
- R capteur sensible à la température

Figure 27 – Différents modes de prise de température dans une conduite

Au laboratoire, les thermostats à circulation (figure 26) sont d'un emploi très courant. On trouve des fluides thermostatiques de 85 à 825 K (article *Étalonnage et vérification des thermomètres* [R 2520]). Dans les bons montages, on dissocie l'organe de régulation R₁ de celui destiné à la mesure R₂. Le premier est placé le plus près de l'élément chauffant ou réfrigérant H, juste après la petite turbine de circulation A. Le second, R₂, profite de l'inertie de la masse liquide pour donner une indication moyenne après amortissement des fluctuations éventuelles dues au régulateur.

Suivant le fluide utilisé et le détecteur employé, on peut obtenir une stabilité de $\pm 0,1$ K à 0,01 K ou à mieux de 1 et 0,1 mK dans des conditions très spéciales.

Dans la figure 27 sont schématisées diverses solutions de mesure de la température d'un fluide dans une conduite. Suivant la règle énoncée au paragraphe 2 de [R 2519], on voit que la qualité du montage croît dans la série de a à d. Suivant les possibilités techniques, on essaiera de se rapprocher au mieux du montage de la figure 27d où le capteur est disposé le long des isothermes du fluide.

Dans le cas d'un fluide en écoulement laminaire, un classement des couches de viscosités différentes peut augmenter les gradients

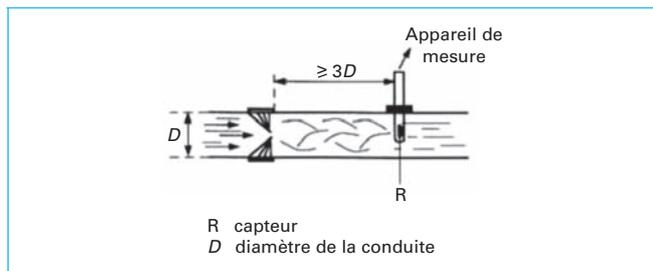


Figure 28 – Création d'une turbulence dans une conduite

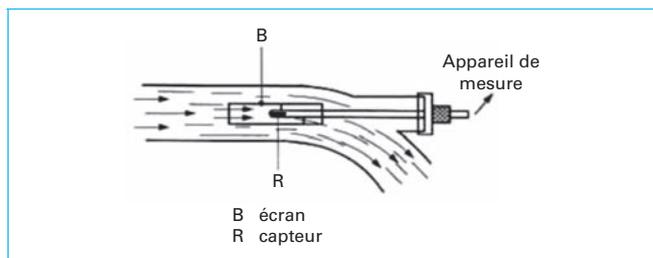


Figure 29 – Prise de température dans une conduite

thermiques locaux. Un dispositif de mélange par ailettes ou cyclone est à prévoir en amont du point de mesure, à une distance égale à environ 4 diamètres de la conduite. La figure 28 schématise un tel dispositif.

Il est possible d'améliorer encore les résultats en disposant un ou plusieurs écrans B autour du capteur R (figure 29). Cette disposition est recommandée lorsque la conduite se trouve à une température différente de celle du fluide, par exemple dans le transport des gaz chauds. Les méthodes du fil froid ou du couple thermoélectrique à fil fin sont bien adaptées à la mesure locale et instantanée de la température des fluides (article *Mesure locale et instantanée de la température des fluides* [R 2760] sur ce sujet). Une température moyenne peut être obtenue par la méthode du fil déjà mentionnée au paragraphe 3.1.2 (figure 3).

Dans le cas particulier de métaux en écoulement turbulent à température élevée, on met à profit la formation d'un vortex pour effectuer une mesure pyrométrique au fond de la cavité ainsi formée. Si le rapport profondeur/diamètre du vortex est supérieur à 5, le liquide métallique dont le facteur d'émission est voisin de 0,4 présente une cavité de type corps noir de facteur d'émission apparent voisin de 1 ($\epsilon_N \approx 0,99$) (article *Pyrométrie optique* [R 2610]).

3.4.3 Mesure de la température dans un gaz

La mesure de la température dans un milieu gazeux est l'une des mesures thermiques les plus difficiles à réaliser, car la conductivité et la capacité thermique des gaz sont faibles. La température d'un gaz est rarement homogène, du fait que les parois qui le contiennent sont à des températures différentes. Il s'ensuit des gradients et des flux thermiques au sein même du milieu. La température évolue à la fois dans l'espace et dans le temps.

Une flamme, qui peut être considérée comme un gaz très particulier, possède un tel degré d'hétérogénéité qu'il est difficile de définir même une notion de température.

■ Emploi d'une sonde de contact

L'emploi d'une sonde de contact entraîne une différence de température entre le capteur et le gaz qui rend la validité de l'indication incertaine. De plus, le gaz étant un milieu transparent, le capteur

échange de l'énergie thermique par rayonnement avec l'enceinte qui contient le gaz et dont la température peut être différente. Le thermomètre de contact effectue une sorte de moyenne entre ces diverses sources thermiques. Il est alors nécessaire d'interposer un ou plusieurs écrans entre le capteur et l'enceinte extérieure. On trouvera des exemples de réalisations pratiques de ces principes dans l'article *Conductivité thermique des liquides et des gaz* [K 427] (pyromètres à aspiration et sondes pulsées à aspiration sonore).

L'erreur due au déséquilibre entre capteur et milieu est accentuée lorsque la vitesse relative du gaz vis-à-vis du capteur est élevée. De plus, aux grandes vitesses, le frottement dû à l'écoulement crée un échauffement non négligeable du capteur qui peut atteindre quelques degrés au-delà de 100 m.s^{-1} . La mesure de fluctuations rapides au sein d'un gaz est résolue à l'aide des méthodes du fil froid ou du thermocouple à fil fin (article *Mesure locale et instantanée de la température des fluides* [R 2750], [R 2760]). Par ces méthodes, on atteint des temps de réponse de l'ordre de la centaine de microsecondes.

■ Mesures indirectes

Les propriétés intrinsèques du gaz sont mises à profit pour en déterminer sa température. Après écoulement et refroidissement du gaz dans des conditions bien déterminées, on mesure une température qui permet de calculer la température initiale du fluide. C'est le principe de la sonde à double col sonique et du pyromètre pneumatique à venturi.

L'absorption de rayonnement X, d'électrons ou de particules radioactives, la vitesse de propagation du son et la composition du gaz dépendent de la température. Ces propriétés sont utilisées dans la mesure indirecte de cette grandeur.

■ Mesures optiques

Moyennant des précautions particulières, aux températures élevées les mesures optiques sont généralement plus représentatives et donc préférables aux mesures par thermométrie de contact.

En pyrométrie optique et infrarouge, l'atmosphère que rencontre le rayonnement est une cause d'erreur de mesure. Un gaz absorbe et réémet successivement des radiations. L'étude de ce rayonnement en intensité, fréquence ou largeur de raies conduit à de nombreuses méthodes optiques de mesure de la température.

Le gaz est souvent un combustible stocké sujet à de violentes déflagrations. La sécurité des installations comportant ce type de fluide passe entre autres par une surveillance critique de la thermique du milieu. L'utilisation de capteurs classiques mettant en jeu la plupart du temps un courant électrique peut présenter un réel danger. La mesure de la température à l'aide de capteurs à fibres optiques est une solution astucieuse à ce type de problèmes.

■ Mesure de la température de l'atmosphère

En météorologie, la mesure de la température de l'atmosphère est de très grande importance pour la compréhension des phénomènes et leur éventuelle prévision. C'est la différence d'échauffement et de refroidissement des masses d'air qui est à l'origine des circulations atmosphériques. La température au sol, par exemple, est sujette à des variations rapides de 1 à 2 K en quelques secondes. Ces fluctuations n'intéressent pas le météorologue, qui emploiera donc un capteur de grande constante de temps (comprise entre 30 s et 1 min).

L'équilibre capteur-milieu est, ici encore, difficile à réaliser. Tout le monde sait qu'un thermomètre exposé à l'air sans précautions particulières est soumis au rayonnement solaire et fournit une indication « optimiste » le jour. La nuit, la mesure qu'il indique est « pessimiste » à cause de son rayonnement propre.

Le lecteur intéressé par ces problèmes particuliers dont les solutions sont riches d'enseignements consultera l'article *Mesures en météorologie. Mesures atmosphériques* [R 3050].

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