



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **R2520 V2**

Étalonnage et vérification des thermomètres - Généralités et description d'instruments

Date de publication :
10 mars 2012

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

par **Eliane RENAOT, Dominique JOUIN**

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

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

Document téléchargé le : **07/06/2021**
Pour le compte : **7200034507 - universite de lille // 194.254.129.28**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Étalonnage et vérification des thermomètres

Généralités et description d'instruments

par **Eliane RENAOT**

Ingénieur

Responsable « amont » du département « température moyenne » au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM

et **Dominique JOUIN**

Ingénieur

Responsable du département et du laboratoire d'étalonnage « température moyenne » au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM

1. Présentation générale	R 2 520v2 – 2
1.1 Rappels	– 2
1.2 Chaînes de mesure de température	– 3
1.3 Étalonnage et vérification	– 3
1.4 Rappel sur les échanges thermiques	– 4
1.4.1 Conduction	– 4
1.4.2 Rayonnement	– 4
1.4.3 Convection	– 4
2. Technologie et précaution d'emploi des thermomètres et capteurs de température	– 4
2.1 Thermomètre à résistance de platine et sondes à résistance de platine	– 4
2.1.1 Sondes étalons répondant aux recommandations de l'EIT-90	– 5
2.1.2 Sondes industrielles	– 5
2.1.3 Avantages et inconvénients	– 7
2.2 Thermomètres à couples thermoélectriques et couples thermoélectriques	– 7
2.2.1 Rappel concernant l'effet Seebeck	– 7
2.2.2 Avantages et inconvénients	– 8
2.3 Thermomètres à dilatation de liquide	– 9
2.4 Thermistances	– 10
2.5 Capteurs autonomes (capteur « iButton »)	– 10
2.5.1 Généralités	– 10
2.5.2 Exemple de capteurs intégrés	– 11
2.5.3 Principales caractéristiques des thermomètres « iButton » ...	– 11
3. Conclusion	– 12
Pour en savoir plus	Doc. R 2 520v2

La température est une des grandeurs physiques les plus fréquemment mesurées car, pour de nombreux procédés de production industrielle, elle constitue un paramètre d'influence majeur. En outre, pratiquement toutes les autres grandeurs physiques macroscopiques d'intérêt pour l'industrie et la recherche sont plus ou moins fortement influencées par la température. Les mesures de température interviennent dans tous les secteurs de l'entreprise : recherche et développement, production, contrôle, sécurité, conditionnement. Tous les domaines d'activités industrielles sont concernés, de la production automobile au transport de substances biologiques.

La dénomination « thermomètre » est souvent utilisée pour désigner indifféremment une chaîne de mesure de température (ou chaîne thermométrique) ou un capteur de température. Pour éviter toute ambiguïté, il est préférable de réserver ce terme à la désignation d'une chaîne complète.

Il existe une multitude de capteurs de température, tant par leur technique que par leurs formes. Entre le premier thermomètre à colonne de liquide inventé par le duc de Toscane en 1654 et la gamme naissante des capteurs autonomes assurant une transmission sans fil vers un récepteur hôte, que d'évolution ! Les capteurs de température délivrent une information relative à une grandeur physique (résistance, volume, tension...) qui est associée à une valeur de température à travers un étalonnage.

Nous nous limiterons dans cet article au domaine de la thermométrie par contact : c'est-à-dire aux capteurs de température qui sont placés directement en contact avec le milieu d'étalonnage ou le milieu dont on veut connaître la température. Nous restreindrons également ce document aux capteurs utilisés dans la gamme de température allant de 83,8058 K à 2041,35 K. Cette gamme couvre la plupart des besoins des industriels.

Les chaînes de températures disponibles sur le marché intègrent des capteurs de technologies très différentes. À chaque type de capteur sont associés des précautions d'emploi spécifiques ainsi que des paramètres d'influence qui vont intervenir sur le résultat final. La plupart des chaînes de température fournissent directement une information en température, néanmoins il est bon que l'utilisateur soit informé de la nature de la donnée d'entrée délivrée par le capteur intégré à la chaîne (résistance électrique, tension...) et de la manière dont cette donnée est transformée pour accéder à une valeur de température.

Cet article ne concerne pas les appareils de mesure de la température par analyses d'un rayonnement : le lecteur se reportera sur ce sujet à l'article Pyrométrie optique [R 2 610] dans le présent traité.

Cet article ne s'intéresse pas aux sondes cryogéniques utilisées en dessous de 83,8058 K.

Cet article ne traite pas des capteurs de température de surface.

1. Présentation générale

1.1 Rappels

L'unité de la température thermodynamique, grandeur physique fondamentale, est le kelvin (symbole K). Le kelvin est l'une des sept unités de base du Système international d'unités (SI).

Le kelvin, est défini comme la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. La dénomination « degré Kelvin » ne doit pas être employé.

Compte tenu des progrès considérables réalisés ces dernières années concernant la redétermination de la constante de Boltzmann k_B , le kelvin verra sans doute sa définition modifiée dans un avenir proche pour la relier à cette constante fondamentale.

Pour des raisons historiques, il reste d'usage courant d'exprimer la température en degré Celsius (symbole °C). L'unité de température Celsius est égale à l'unité kelvin par définition. Une différence ou un intervalle de température peut s'exprimer aussi bien en kelvins qu'en degrés Celsius. La valeur numérique de la température Celsius exprimée en degrés Celsius est liée à la valeur numérique de la température thermodynamique exprimée en kelvins par la relation : t (en °C) = T (en K) – 273,15 K.

Les industriels cherchent généralement à reproduire une température plutôt qu'à connaître réellement la température thermodynamique intervenant dans leurs procédures de fabrication. Ces considérations ont conduit à mettre en place dès 1927 une échelle pratique de température, reposant sur des phénomènes physiques répétables et aisément identifiables. Les mesures effectuées dans cette échelle sont néanmoins en étroite accord avec les valeurs des températures thermodynamiques. Plutôt que de « mesure de la température thermodynamique », on parlera donc de « repérage de la température dans l'échelle ». L'échelle actuellement en vigueur est l'échelle internationale de température de 1990 (EIT-90). Elle repose sur :

- une série de points de définition basés sur des transitions de phase de métaux purs ;
- des instruments spécifiés auxquels sont associées des formules d'interpolation ou d'extrapolation paramétrées.

La matérialisation d'une échelle de température est certes plus « pratique » que la mise en œuvre de thermomètres primaires permettant d'accéder à la température thermodynamique, néanmoins elle nécessite :

- des investissements financiers importants au niveau des équipements scientifiques nécessaires ;
- du personnel compétent qui se consacre à temps plein à cette activité.

Tableau 1 – Domaine fréquent d'utilisation des capteurs de température

Capteur	Repère thermométrique	Domaine fréquent d'utilisation
Dilatation de liquide	Volume du liquide	– 200 °C à 650 °C
Résistance de platine	Résistance électrique de l'élément sensible	– 260 °C à 962 °C
Thermistance	Résistance électrique de l'élément sensible	0 °C à 100 °C
Couple thermoélectrique	Force électromotrice	0 °C à 2 500 °C

Ce type d'étalonnage est donc réservé à des thermomètres étalons qui se situent au plus haut niveau de la chaîne de traçabilité. A titre d'exemple un thermomètre étalon étalonné entre 0 °C et 420 °C selon l'EIT-90 sera affecté d'une incertitude d'étalonnage comprise entre 0,0003 °C à 0,001 °C en fonction du niveau de température.

Pour répondre aux besoins de l'industrie, on peut utiliser des techniques simplifiées qui permettent d'approcher l'échelle internationale de température. Ces méthodes, à condition que les incertitudes associées soient convenablement estimées, permettent une bonne approximation de l'échelle à coût modéré. La technique simplifiée utilisée pour l'étalonnage des capteurs de température entre – 80 °C et 1 600 °C repose sur une comparaison entre cet instrument et un thermomètre étalon raccordé aux étalons nationaux.

Avant d'entreprendre un étalonnage, on ne devra pas oublier les considérations suivantes :

1- L'information délivrée par un capteur de température est fonction de **sa propre** température (ou de la variation de température à laquelle est soumis ce capteur). La différence, entre les températures du capteur et celle du milieu dans lequel il est placé, **peut être importante** si les conditions d'échanges thermiques n'ont pas été analysées et adaptées au mieux.

2- Un capteur de température n'est pas un instrument discret. Sa présence va **modifier la répartition des températures** au sein du milieu où il est placé.

3- Lorsqu'on réalise des mesures de température, il faut s'assurer, avant de relever les mesures, que l'**équilibre thermique** entre le capteur en étalonnage et le milieu dans lequel il est plongé **est atteint**. Le temps nécessaire à l'obtention de l'équilibre thermique dépend :

- du temps de réponse du capteur ;
- de la nature du milieu (air, liquide...);
- du couplage thermique élément sensible du capteur/milieu.

Le tableau 1 présente les domaines de température les plus fréquemment associés aux différentes technologies de capteur.

1.2 Chaînes de mesure de température

L'étalonnage peut concerner des capteurs seuls ou des chaînes de mesure de température. Une **chaîne de mesure de température** (appelée quelquefois « chaîne thermométrique ») comprend un **capteur** (sonde à résistance, couple thermoélectrique, thermistance) connecté par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs éléments à un **indicateur**. Le terme « thermomètre », fréquemment utilisé, peut porter à confusion. Il est employé :

- par les fabricants et vendeurs de chaînes de température pour désigner l'ensemble des éléments constituant ces chaînes ;
- par les fabricants et vendeurs de capteurs de température pour nommer ces capteurs.

Dans le corps du présent document le terme « thermomètre » s'applique à une chaîne complète. Un thermomètre à dilatation de liquide est une chaîne de température. La fonction « capteur » est assurée par le liquide, la tige graduée étant l'indicateur.

Les différents éléments d'une chaîne de température peuvent être étalonnés indépendamment mais généralement on accède à un niveau d'incertitude plus faible en faisant étalonner la chaîne dans son ensemble.

Les précautions d'emploi et les paramètres d'influence étant spécifiques à chaque type de capteur, il est souhaitable que l'opérateur s'enquière de la nature du capteur intégré à la chaîne en étalonnage.

Dans le cas d'une chaîne de mesure de température dont le capteur est un couple thermoélectrique, celui-ci est généralement connecté par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs éléments (câble d'extension, câble de compensation, transmetteur, convertisseur) à un indicateur lui-même associé à une jonction de référence ou à un dispositif de compensation intégré ou non. Lorsque cela est possible, l'étalonnage doit concerner l'intégralité de la chaîne, câbles de compensation ou d'extension inclus. Dans le cas contraire, ces câbles devront être étalonnés individuellement. Si la chaîne comporte un dispositif de compensation intégré, l'étalonnage se fera compensation active ou inactive en fonction des conditions d'utilisation habituelles de la chaîne.

Lorsqu'il est impossible de déplacer l'indicateur, celui pourra être étalonné *in situ* par l'intermédiaire d'un simulateur de température lui-même raccordé aux références nationales. Dans cette méthode, un générateur de signal électrique (résistance ou tension) est substitué au capteur de température. Des précautions particulières sont à prendre lorsqu'il s'agit d'un indicateur associé à des couples thermoélectriques (nature du couple sélectionnée en « entrée » ou « sortie » d'instrument, compensation de soudure froide intégrée ou non, active ou non, compatibilité des câbles d'extension ou de compensation utilisés avec la nature du couple sélectionné...). Cette méthode conduira nécessairement à une incertitude dégradée par rapport à l'incertitude accessible dans le cas de l'étalonnage de la chaîne complète.

1.3 Étalonnage et vérification

La vérification métrologique consiste à apporter la preuve, à partir de mesures, que des exigences spécifiées (souvent appelées « écart maximum toléré » ou EMT) sont satisfaites. Dans le cadre des mesures de température, une opération de vérification fait souvent suite à une opération d'étalonnage.

La vérification permet de s'assurer que l'écart entre l'indication fournie par l'appareil à vérifier et l'indication procurée par l'instrument étalon est toujours inférieur aux erreurs maximales tolérées. Celles-ci sont définies par l'utilisateur de l'appareil à vérifier en fonction de ses besoins et peuvent reposer sur l'application d'une norme ou d'un texte réglementaire.

Avant d'établir un constat de vérification, il est indispensable de bâtir un programme de vérifications minimales, en adéquation avec l'instrument concerné, les conditions d'utilisation et la demande du client. Selon l'étendue du domaine de mesurage que l'on cherche à vérifier, le programme de vérification intégrera un nombre de points d'étalonnage suffisant pour obtenir un ensemble caractéristique du comportement de l'instrument. Le nombre de

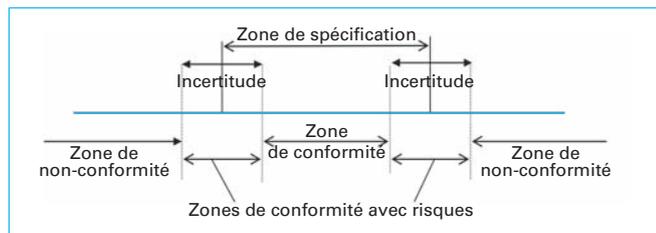


Figure 1 – Règles de conformité

point d'étalonnage dépend de nombreux paramètres : étendue de la gamme d'utilisation, nature du capteur, critère d'acceptation... Les points d'étalonnage seront uniformément répartis, avec un point à chaque extrémité du domaine d'utilisation. Si la température 0 °C est incluse dans ce domaine, il y aura lieu de réaliser un point d'étalonnage à cette température.

Lors de l'émission d'un avis, suite à une vérification métrologique, il faudra tenir compte des incertitudes affectant les mesures. L'instrument pourra être déclaré conforme, non conforme ou conforme avec risques (figure 1).

Il ne faut pas oublier que si une vérification conduit à déclarer la conformité d'un instrument (et donc à donner confiance à l'utilisateur), seul le certificat d'étalonnage permet d'accéder à la connaissance des corrections à appliquer à l'instrument accompagnées de leurs incertitudes.

L'étude mathématique de la métrologie et des méthodes de propagation des incertitudes ne sera pas développée dans cet article. Le lecteur pourra se référer au « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » (NF ENV 13005) ainsi qu'au fascicule de documentation FD X07-028 « Procédures d'étalonnages de vérification des thermomètres », édités par l'Afnor.

1.4 Rappel sur les échanges thermiques

Nous ne ferons ici que les rappels nécessaires à la compréhension de la suite du document. Le lecteur pourra se reporter aux articles suivants publiés dans le présent traité :

- *Transmission de l'énergie thermique. Conduction* [BE 8 200] ;
- *Convection thermique et massique. Principes généraux* [BE 8 205] ;
- *Rayonnement thermique des matériaux opaques* [BE 8 210] ;
- *Rayonnement thermique des matériaux semi-transparents* [B 8 215].

1.4.1 Conduction

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide, gaz), sans mouvement de matière.

En régime permanent, le mécanisme de la transmission de la chaleur par conduction dans une seule direction est donné par la relation de Fourier :

$$\varphi = -\lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \quad (1)$$

avec	φ	densité de flux (en $W \cdot m^{-2}$), c'est la quantité de chaleur qui traverse la surface unité pendant l'unité de temps,
	$\delta T / \delta x$	gradient thermique le long du trajet parcouru par ce flux calorifique (en $K \cdot m^{-1}$),
	λ	conductivité thermique du matériau. Elle dépend du matériau et de sa température. λ s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus les matériaux conduisent facilement la chaleur. Au contraire les matériaux de faible conductivité thermique conduisent difficilement la chaleur et sont donc utilisés comme isolants. Par exemple, la conductivité thermique du cuivre est de $390 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ alors que celle du polystyrène expansé est de $0,03 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

La conductivité thermique des gaz est très faible ; celle de l'air à 100 kPa est de $0,026 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; une lame de gaz, même très mince, se comporte comme un isolant thermique.

1.4.2 Rayonnement

Le rayonnement thermique correspond à un transfert de chaleur ne nécessitant aucun support matériel.

Le flux échangé $\varphi_{s1,s2}$, en $W \cdot m^{-2}$, entre deux surfaces $s1$ et $s2$ aux températures T_{s1} et T_{s2} est donné par :

$$\varphi_{s1,s2} = f(T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (2)$$

La fonction f est complexe, et ne sera pas développée ici. Elle fait intervenir de nombreux paramètres dont les coefficients d'émissivité des surfaces ; or la valeur de ces coefficients est très dépendante de l'état de surface. À 300 K, ce coefficient est de 0,16 pour l'acier Inox poli et de 0,80 pour l'acier ordinaire oxydé. Dans le cadre de cet article, il suffit de considérer que les températures interviennent à la puissance 4 dans l'équation et que ce type d'échanges deviendra rapidement prépondérant lorsque l'écart de température sera supérieur à 500 K.

1.4.3 Convection

La convection est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel avec mouvement de matière.

Il y a lieu de distinguer :

- la convection naturelle : le transport de chaleur est dû à des mouvements du fluide provoqués par un champ de pesanteur ;
- la convection forcée : le transport de chaleur est dû à des mouvements du fluide provoqués par un dispositif mécanique. La bonne uniformité en température présentée par les bains liquides repose sur ce type de convection.

Le flux φ , en $W \cdot m^{-2}$, échangé est donné par :

$$\varphi = h_c \cdot (T_p - T_M) \quad (3)$$

avec h_c (en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) coefficient d'échange convectif,
 T_p (en K) température de la paroi du corps,
 T_M (en K) température de mélange (voir [BE 8 205]).

Les échanges par convection sont souvent difficiles à quantifier car l'évaluation du coefficient h_c est délicate.

2. Technologie et précaution d'emploi des thermomètres et capteurs de température

2.1 Thermomètre à résistance de platine et sondes à résistance de platine

Avant d'entreprendre l'étalonnage d'une sonde à résistance de platine, le lecteur pourra se reporter aux articles *Éléments sensibles à résistance métallique et thermomètres étalons* [R 2 525] et *Thermomètre à résistance métallique* [R 2 570] dans le présent traité.

Un thermomètre à résistance de platine est constitué d'un indicateur délivrant une information en température ou en résistance, d'une sonde à résistance de platine et de câbles électriques permettant de relier ces instruments. L'indicateur inclut un générateur de courant et un voltmètre. Souvent l'indicateur renferme également un calculateur. La résistance mesurée est alors traduite en température à partir de la fonction d'interpolation et des valeurs des coefficients introduits dans le calculateur. La fonction d'interpolation n'est généralement pas modifiable mais, dans bien des cas, les valeurs des coefficients peuvent être changées par l'utilisateur.

Il y a lieu de considérer deux types de sondes à résistance de platine :

- les sondes étalons (TRPE) répondant aux recommandations de l'échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) ;
- les sondes à résistances de platine industrielles (TRPI).

2.1.1 Sondes étalons répondant aux recommandations de l'EIT-90

L'élément sensible d'une sonde à résistance de platine, qu'elle soit étalon ou industrielle, est constitué d'un fil de platine bobiné. Afin d'éliminer au mieux les variations éventuelles des caractéristiques géométriques de ce fil de platine au cours des cyclages thermiques, l'étalonnage des sondes étalons ne consiste pas à établir une relation directe entre la résistance électrique présentée par l'élément sensible et la température. Les températures sont déterminées en fonction du rapport $W(T_{90})$ entre la résistance $R(T_{90})$ aux bornes de la sonde à la température T_{90} et sa résistance $R(273,16\text{ K})$ au point triple de l'eau :

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16\text{ K}) \quad (4)$$

Dans le cas des sondes étalons, le platine utilisé doit répondre à des critères de pureté spécifiés dans le texte de l'EIT-90. Pour pouvoir appliquer les fonctions d'interpolation données dans le texte de l'échelle, une sonde étalon doit remplir au moins une des conditions suivantes :

$$W(29,7646\text{ °C}) \geq 1,11807 ; W(-38,8344\text{ °C}) \leq 0,844235$$

Pour les capteurs utilisés jusqu'au point d'argent, il doit aussi satisfaire à une condition supplémentaire : $W(961,78\text{ °C}) \geq 4,2844$.

Le montage de l'élément sensible est tel que le fil de platine est libre de contraintes mécaniques, y compris lors des cyclages thermiques. Ces capteurs, très onéreux, sont à manipuler avec beaucoup de soin et se situent au plus haut niveau de la chaîne de traçabilité. La figure 2 présente des bobinages classiques d'éléments sensibles. La résistance nominale des sondes étalons est de $25\ \Omega$ pour les sondes utilisées dans la gamme de température allant de -189 °C à 420 °C ; à cette température la sensibilité de ce capteur est de $0,1\ \Omega\cdot\text{°C}^{-1}$. Cette résistance est de $2,5\ \Omega$ (sensibilité $0,01\ \Omega\cdot\text{°C}^{-1}$) ou $0,25\ \Omega$ (sensibilité $0,001\ \Omega\cdot\text{°C}^{-1}$) pour les thermomètres utilisés entre 0 °C et 962 °C .

La gaine de la sonde est généralement en silice. Elle est dépolie sur environ 20 cm au-dessus de l'élément sensible afin de limiter les échanges indésirables par rayonnement. La figure 3 donne un schéma de principe de ces sondes. Le corps de la sonde est scellé hermétiquement. L'étalonnage de ce type de sonde est réalisé dans des laboratoires de métrologie de haut niveau, selon les recommandations de l'EIT-90. Cet instrument relié à un pont de résistances de haute exactitude permet de détecter des variations de températures de l'ordre de quelques dizaines de μK .

La reproductibilité, fonction de sa température d'utilisation, est de l'ordre de $50\ \mu\text{K}$ entre 0 °C et 230 °C mais atteindra plusieurs millièmes de degrés vers 960 °C .

Pour plus d'information sur l'EIT-90 le lecteur pourra consulter l'article *L'échelle internationale de température : EIT-90* [R 2 510] dans le présent traité.

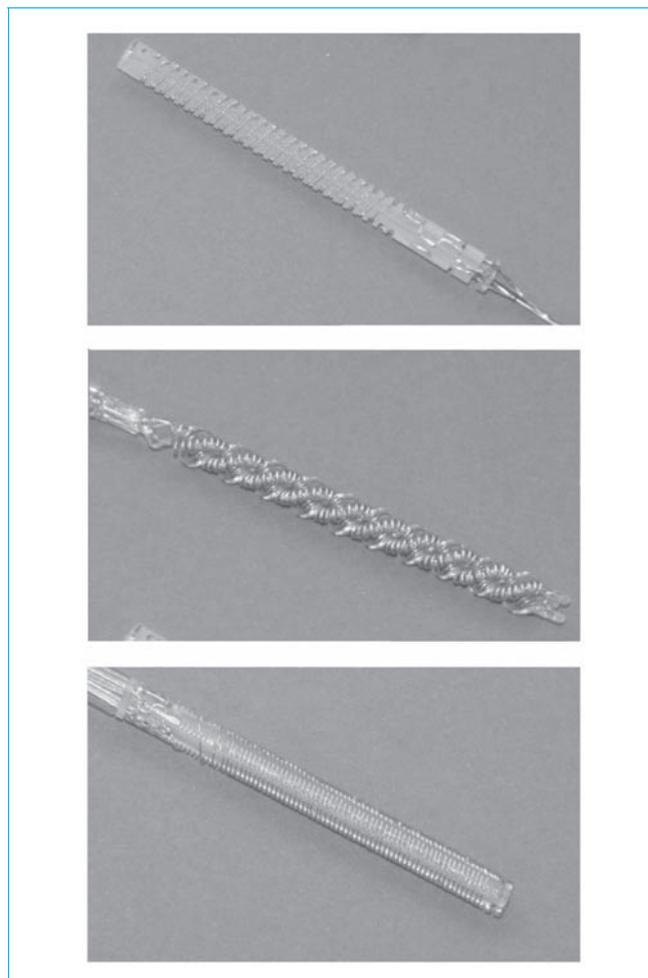


Figure 2 – Bobinages d'éléments sensibles de thermomètres étalons

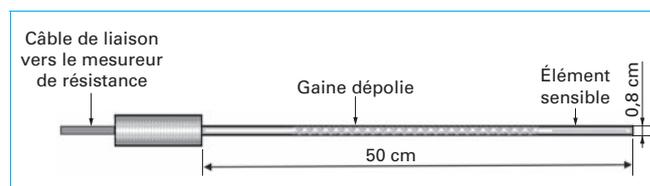


Figure 3 – Schéma de principe d'une sonde étalon

2.1.2 Sondes industrielles

Les sondes dites « industrielles » sont souvent utilisées dans des milieux polluants où il n'est pas possible de conserver un très haut niveau de pureté pour le fil de platine. Afin de ne pas engager de dépense superflue, le fil utilisé pour la fabrication de l'élément sensible de ces capteurs présente, dès la fabrication, un degré de pureté moindre ne répondant pas aux critères de l'EIT-90. En conséquence, sauf cas particuliers, les formules d'interpolation reportées dans le texte de l'EIT-90 ne sont pas applicables aux sondes industrielles. La figure 4 présente différents éléments sensibles de sondes industrielles. On a imaginé un grand nombre de techniques pour enrouler le fil de platine. Celui-ci peut être noyé dans un matériau souple (plastique, Téflon...), dans du verre, dans du ciment ou placé dans un isolant en alumine très pure. La technologie des

Tableau 2 – Ordre de grandeur du phénomène d’hystérésis en fonction de la technologie de la sonde

Montage de l’élément sensible	Variation de la résistance mesurée à 0 °C traduite en température
Sonde plate, dépôt d’un film de platine de 2 µm d’épaisseur sur un substrat en alumine ou en Téflon (sonde A)	± 0,100 °C
Hélice de platine noyée dans du verre ou dans un ciment réfractaire (sonde B)	± 0,030 °C
Hélice de platine noyée dans de la poudre d’alumine et placée dans un tube en alumine (sonde C)	± 0,008 °C

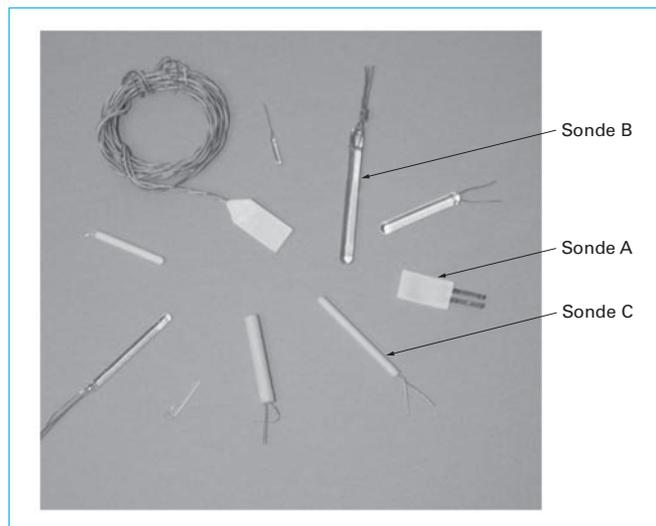


Figure 4 – Éléments sensibles de sondes industrielles

sondes plates repose sur le dépôt, sous vide, d’un film épais de platine sur un support dont une partie est recouverte d’un cache.

La résistance nominale des sondes à résistance de platine industrielles est souvent de 100 Ω à 0 °C, la sensibilité à cette température est de 0,39 Ω.°C⁻¹. Néanmoins on trouve également sur le marché des sondes dont la résistance nominale est de 500 Ω ou de 1 000 Ω.

Ces sondes pouvant être soumises, lors de leur utilisation, à des vibrations, un montage libre de contrainte n’est pas adapté. Selon la technologie de la sonde, le couplage mécanique entre le platine et son support est plus ou moins important. Les coefficients de dilatation thermique du platine et de son support étant différents, le platine se trouve soumis à des contraintes mécaniques lors des cyclages thermiques. Ces contraintes entraînent un phénomène d’hystérésis.

On trouvera dans le tableau 2 un ordre de grandeur de la variation de la résistance mesurée à 0 °C de trois types de sondes soumises à un cyclage thermique entre - 200 °C et + 200 °C.

Pour être plus maniables, ces éléments sensibles sont souvent montés dans des gaines qui, pour des raisons de robustesse, sont métalliques (figure 5). Les échanges thermiques *via* cette gaine entre l’élément sensible et les milieux à une température autre que la température d’étalonnage peuvent être importants et affecter notablement le résultat final. L’élément sensible n’étant pas visible, sa position est mal connue ; selon les conditions de montage il n’est pas nécessairement positionné au bout de la gaine métallique. Le raccordement du tube métallique à la tête de la sonde n’est jamais parfaitement étanche ; à basse température, il peut apparaître un phénomène de condensation à l’intérieur de la gaine qui peut conduire à un court-circuit entre les spires de

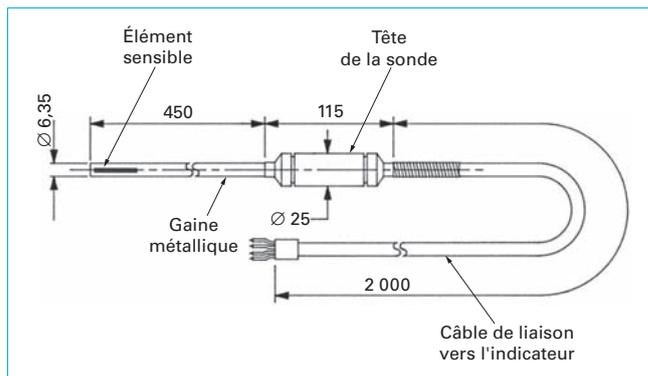


Figure 5 – Exemple de sonde industrielle montée dans une gaine métallique (les caractéristiques géométriques sont données en mm)

l’élément sensible. Avant d’entreprendre un étalonnage, l’opérateur doit également s’assurer que le capteur ne présente pas un défaut d’isolement entre les fils de liaison et la gaine métallique.

Si la sonde en étalonnage n’est pas incluse dans une chaîne de mesure, sa résistance électrique peut être mesurée avec :

- un pont de mesure de résistance ;
- un ohmmètre ;
- un voltmètre à condition que la valeur du courant traversant la sonde puisse être connue par ailleurs (ampèremètre ou résistance étalon intégrée dans le circuit).

La liaison de la sonde avec l’appareil de mesure est réalisée par l’intermédiaire de deux, trois ou quatre fils (figure 6). Le montage dit « à deux fils », (figure 6a) doit être évité ; il peut conduire à des erreurs importantes, car la résistance de fils de ligne va évoluer en fonction de leur température et donc nécessairement varier entre les conditions d’étalonnage et d’utilisation. Si un laboratoire se trouve dans l’obligation d’étalonner une chaîne de température comportant ce type de montage, il devra impérativement reporter dans le certificat d’étalonnage la température du laboratoire au moment des mesures. Il devra également introduire dans le bilan d’incertitude finale une composante d’incertitude associée aux imperfections de ce montage.

Le montage dit « en trois fils » (figure 6b) peut être utilisé si certaines conditions sont respectées. L’appareil mesure dans un premier temps la résistance X égale à $r1 + R + r2$, puis ensuite la résistance Y avec $Y = r2 + r3$. L’appareil calcule $R = X - Y$. L’erreur commise sera d’autant plus importante que les valeurs ohmiques de $r1$ et de $r3$ différeront. Les trois fils de liaison utilisés doivent impérativement avoir la même longueur, le même diamètre et être de même nature.

Le montage « en quatre fils », (figure 6c) deux fils pour la conduction du courant, deux fils pour la mesure de la tension, conduira aux incertitudes d’étalonnage les plus faibles.

Lorsque l'indicateur présente une entrée « en trois fils » et que le capteur est monté « en quatre fils », l'un des fils de liaison du capteur ne doit pas être connecté sur l'appareil ; l'extrémité de ce fil doit être isolée et ne pas être utilisée. Si l'indicateur présente une entrée « en quatre fils » alors que le capteur est monté « en trois fils », l'action qui consiste à *shunter* deux des entrées peut induire des erreurs considérables.

2.1.3 Avantages et inconvénients

Les sondes à résistance de platine étalons conduisent à des incertitudes de mesure inégales entre 83 K et 700 K mais elles sont très onéreuses et très fragiles. Leur utilisation ne relève pas, sauf exception, d'un laboratoire industriel.

Les sondes à résistance de platine de type « industriel », pour peu que leur montage n'implique pas des contraintes mécaniques importantes permettent d'accéder à des incertitudes faibles sur une

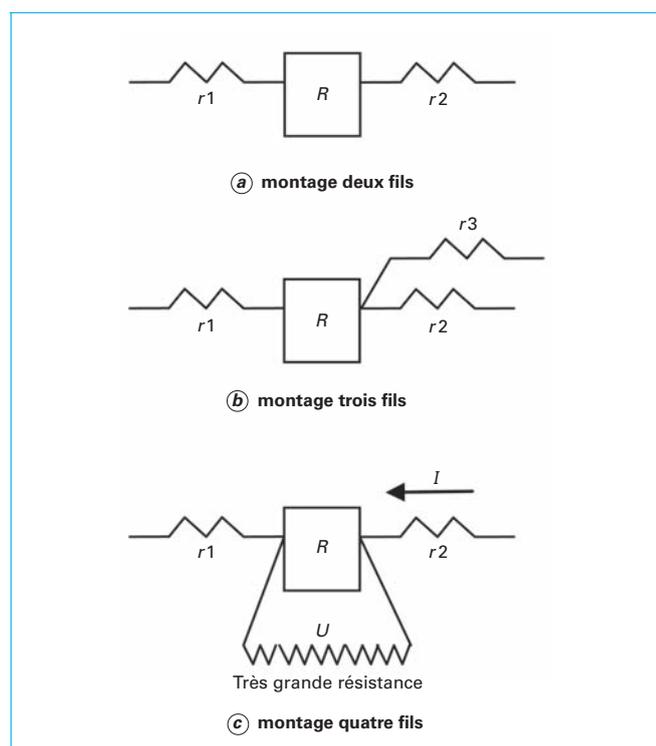


Figure 6 – Types de liaison de la sonde à l'appareil de mesure

gamme d'étendue relativement large. Le tableau 3 donne l'ordre de grandeur des incertitudes affectant l'étalonnage d'une sonde étalon dans un laboratoire national de métrologie et d'une sonde industrielle à montage à contraintes mécaniques faibles dans un laboratoire accrédité.

Une exposition à une température supérieure à 420 °C (exceptionnellement 660 °C selon la technologie du capteur) entraînera une modification importante des caractéristiques métrologiques de la sonde qui peut aller jusqu'à sa destruction. L'emploi des sondes à résistance de platine n'est donc pas conseillé au-delà de 660 °C, sauf s'il s'agit de sondes spécifiques adaptées aux hautes températures. Néanmoins ces sondes ne sont pas recommandées en milieu industriel car il est nécessaire de les soumettre après chaque utilisation à une opération de recuit délicate.

Enfin la taille de ces capteurs peut être un inconvénient, la mesure de température n'est pas ponctuelle ; l'information délivrée correspond à une intégration de la température sur toute la hauteur de l'élément sensible. De plus, la présence de la sonde peut modifier localement le champ de température si des précautions ne sont pas prises pour supprimer au mieux les échanges thermiques le long de la gaine de la sonde. Ceci ne peut être réalisé que si la sonde est suffisamment immergée dans le milieu d'utilisation. Pour s'assurer que cette condition est bien remplie, il suffit de modifier cette immersion de la longueur de l'élément sensible (quelques centimètres) et de vérifier que l'information délivrée par la sonde reste constante.

2.2 Thermomètres à couples thermoélectriques et couples thermoélectriques

2.2.1 Rappel concernant l'effet Seebeck

Nous ne ferons ici que quelques rappels. Pour de plus amples informations, le lecteur pourra se rapporter aux articles *Couples thermoélectriques : caractéristiques et mesure de température* [R 2 590] et *Couples thermoélectriques : données numériques d'emploi* [R 2 594] dans le présent traité.

Considérons un élément de conducteur de longueur dx , soumis à un gradient de température ∇T . Ce conducteur peut être assimilé à un générateur de tension élémentaire. La force électromotrice (f.é.m) générée, dE , est donnée par la relation :

$$dE = S(x) \vec{\nabla} T dx$$

$S(x)$ est appelé « coefficient de Seebeck » ou pouvoir thermoélectrique absolu à la température T de l'élément conducteur.

Tableau 3 – Incertitudes affectant l'étalonnage d'une sonde étalon et d'une sonde industrielle

Sonde étalon		Sonde industrielle	
Température	Incertitude d'étalonnage (en °C)	Température	Incertitude d'étalonnage (en °C)
- 200 °C à 0 °C	0,0012	- 80 °C à 0 °C	0,006
0 °C à 160 °C	De 0,0003 à 0,0008	0 °C à 100 °C	0,006
160 °C à 420 °C	De 0,0008 à 0,0013	100 °C à 200 °C	0,010
420 °C à 660 °C	De 0,0013 à 0,0030	200 °C à 550 °C	0,020
		550 °C à 660 °C	0,150

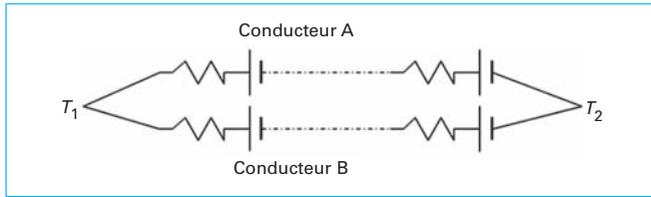


Figure 7 – Schéma électrique équivalent d'un couple thermoélectrique

Le coefficient de Seebeck est proportionnel à la température thermodynamique T de l'élément et dépend de sa conductivité électrique.

Des défauts apparaissant au niveau cristallin entraîneront une modification de la conductivité et, par conséquent, une modification de la valeur de $S(x)$. Si un conducteur est homogène (pas de défaut du réseau cristallin), son coefficient de Seebeck sera constant sur toute sa longueur.

La figure 7 présente le schéma électrique équivalent d'un couple formé de deux conducteurs différents dont les jonctions sont portées à des températures différentes.

Dans le cas d'un couple thermoélectrique, les conducteurs A et B sont appelés « thermoéléments ». La f.é.m totale, E , générée par le circuit thermoélectrique placé entre les températures T_1 et T_2 et constitué des conducteurs homogènes A et B s'écrit :

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

avec $S_A(T)$ et $S_B(T)$ les coefficients de Seebeck des conducteurs A et B à la température T . Dans le cas de conducteurs homogènes, la f.é.m générée dépend donc uniquement des températures des deux jonctions ; néanmoins, la f.é.m délivrée par un couple thermoélectrique est essentiellement générée dans les zones soumises à de fortes variations de température comme l'illustre la figure 8.

Si l'un des conducteurs du couple présente localement un défaut du réseau cristallin et donc une variation locale du coefficient de Seebeck, la f.é.m générée sera d'autant plus affectée que la section du conducteur concernée sera soumise à un gradient thermique important.

On appelle « hétérogénéités » les disparités locales des propriétés thermoélectriques des conducteurs constituant le couple thermoélectrique. Les hétérogénéités peuvent avoir différentes origines en particulier l'apparition de contraintes mécaniques liées à un manque de soin dans la manipulation du couple thermoélectrique (pliage, écrasement lors de traversée de porte de four...). La pollution du couple par des agents chimiques est également une cause fréquente d'apparition d'hétérogénéités. Ces hétérogénéités peuvent être atténuées en appliquant au couple un traitement thermique approprié. Cette opération consiste à porter le couple thermoélectrique à une température donnée, généralement proche de la température maximale d'utilisation du couple, pendant une durée définie. Ce traitement peut être effectué soit en plaçant le couple dans un four, soit en le faisant parcourir par un courant électrique approprié (chauffage par effet joule).

La f.é.m générée par le couple dépendant de l'écart entre les températures T_1 et T_2 des deux jonctions, il est impératif de fixer l'une de ces températures pour pouvoir déterminer l'autre. On distinguera donc une jonction de mesure (ou jonction chaude), cette jonction est placée à la température mesurée ; et une jonction de référence appelée aussi « jonction froide ». La jonction de référence est formée par le raccordement un à un des conducteurs du couple thermoélectrique avec des fils de cuivre qui assurent la liaison avec l'indicateur. Chaque connexion est isolée électriquement et séparément. Cette jonction est placée dans un milieu dont la température

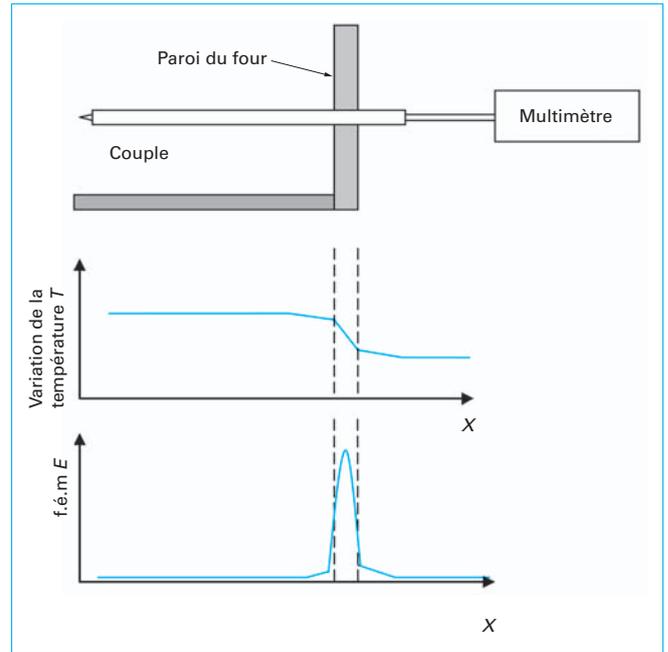


Figure 8 – Localisation de la f.é.m délivrée par le couple thermoélectrique lorsqu'il est placé dans un four

stable et connue (température de référence) sert de référence pour la mesure. Le principe du montage électrique est présenté figure 9.

La température de référence peut être un point de glace fondante (0°C), mais pour des raisons pratiques les laboratoires d'étalonnage utilisent de plus en plus des boîtes de jonction de référence.

Les boîtes de jonction de référence sont constituées d'un générateur de température à consigne fixe (généralement 0°C) possédant un (ou plusieurs) puits central(aux). Ces boîtes présentent :

- soit des puits accessibles de l'extérieur dans lesquels on peut introduire une jonction de référence indépendante de la boîte ;
- soit des puits internes et non accessibles, dans ce cas les fils de compensation ou d'extension et les fils de cuivre constituant la jonction de référence arrivent sur des borniers de connexion situés à l'extérieur de la boîte. Ces borniers sont adaptés aux différents couples thermoélectriques normalisés.

Un câble d'extension ou un câble de compensation peut être utilisé pour prolonger le couple thermoélectrique jusqu'à la jonction de référence. Les conducteurs d'un câble d'extension sont de même nature que ceux du couple thermoélectrique associé. Les conducteurs d'un câble de compensation sont réalisés avec des matériaux différents de ceux du couple thermoélectrique associé, dans un domaine restreint de température, ce câble présente un comportement thermoélectrique proche de celui du couple thermoélectrique auquel il est connecté.

Certains indicateurs comportent un dispositif de compensation intégré qui compense l'absence de température de référence. En fonction des informations délivrées par une thermistance localisée dans l'indicateur, un circuit électronique génère une tension de compensation liée à la température supposée des points de liaison des fils du thermocouple dans l'appareil. Néanmoins, selon l'emplacement de la thermistance, la compensation effectuée peut être plus ou moins conforme.

2.2.2 Avantages et inconvénients

Les couples thermoélectriques sont utilisables sur une large gamme de température. Les données numériques d'emploi des principaux couples thermoélectriques sont reportées dans le

Tableau 4 – Données numériques d'emploi de couples thermoélectriques

Type	Thermoélément	Sensibilité moyenne	Domaine
S	Platine rhodié 10 %/platine	10 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	0 à 1 600 °C
B	Platine rhodié 30 %/platine rhodié 6 %	9 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	50 à 1 700 °C
R	Platine rhodié 13 %/platine	12 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	0 à 1 600 °C
K	Nickel-chrome/nickel-aluminium	40 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	- 180 à 1 300 °C
N	Nickel-chrome-silicium/nickel-silicium	40 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	- 270 à 1 300 °C
E	Nickel-chrome/cuivre-nickel	80 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	- 270 à 800 °C
J	Fer/cuivre-nickel	56 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	- 40 à 750 °C
T	Cuivre/cuivre-nickel	46 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	- 200 à 400 °C
	Platine/palladium	5 à 21 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	0 à 1 500 °C
	Platine/or	20 $\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$	0 à 1 000 °C

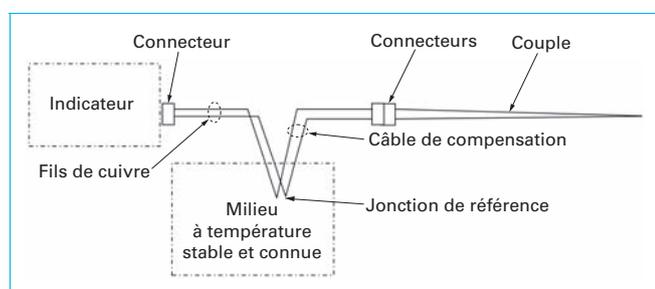
**Figure 9 – Montage électrique associant un couple thermoélectrique, un câble de compensation, une jonction de référence, des fils de cuivre et un indicateur**

tableau 4. En thermométrie par contact, ce sont les seuls capteurs utilisables au-dessus de 962 °C (en milieu industriel généralement 420 °C et exceptionnellement 660 °C) ; ces capteurs sont donc très répandus dans l'industrie. Ils sont facilement manipulables, relativement robustes et leur gaine pouvant être de très petit diamètre (0,5 mm par exemple), ils peuvent être introduits dans des équipements industriels où l'espace disponible est étroit.

L'utilisation des couples thermoélectriques apparemment simple est en pratique très délicate. Des maladresses dans leur mise en œuvre peuvent conduire à des erreurs importantes de mesure, on citera par exemple :

- une utilisation de câble de compensation non adaptée à la nature du couple ;
- un branchement du couple sur des bornes de l'indicateur non compatible avec la nature du couple ;
- une jonction de référence froide défectueuse (pour les boîtes de jonction de référence) ou dont la réalisation est corrompue (point de glace fondante) ;
- une utilisation d'un couple présentant une zone fortement hétérogène associée à un positionnement de celle-ci dans un environnement de forte variation de température (sortie d'un four par exemple).

De par leur construction, les couples thermoélectriques dont les conducteurs sont en alliage seront plus souvent affectés par des phénomènes d'hétérogénéités que les couples thermoélectriques

en métaux nobles ou en métaux purs. Pour renforcer la qualité métrologique des couples en métaux nobles ou en métaux purs, on peut placer les conducteurs dans une gaine également en métal pur qui limitera les risques de pollution en utilisation aux températures élevées (par exemple gaine en platine pour un couple type S). Néanmoins, ces couples sont alors très onéreux tout en étant très fragiles.

Les erreurs de mesure associées aux hétérogénéités peuvent atteindre plusieurs degrés pour un couple type K (nickel-chrome/nickel-aluminium), quelques dixièmes de degrés pour un couple S (platine-10 % rhodium/platine) et quelques centièmes pour un couple platine/palladium.

2.3 Thermomètres à dilatation de liquide

■ Présentation

Un thermomètre à dilatation de liquide (TDL) est formé d'un réservoir contenant le liquide thermométrique, d'une tige graduée dans laquelle s'expande le liquide en fonction de la température et d'un réservoir d'expansion offrant une sécurité si le TDL est porté à une température supérieure à sa température maximale d'utilisation.

Les thermomètres à dilatation de liquide peuvent être à immersion complète, immersion totale (immersion au degré lu), immersion partielle ou immersion spécifiée. La figure 10 présente le positionnement dans le milieu d'étalonnage de ces différents types de TDL.

Avant d'entreprendre l'étalonnage d'un TDL, il y a lieu de s'assurer qu'il n'y pas de liquide retenu dans la chambre d'expansion et que la colonne de liquide n'est pas séparée.

On trouvera dans le tableau 5 une liste non exhaustive des liquides thermométriques en fonction de leur domaine d'utilisation.

■ Avantages et inconvénients

Les thermomètres à dilatation de liquide sont d'excellents instruments métrologiques qui, utilisés par des personnes compétentes, peuvent permettre d'accéder à des incertitudes de l'ordre de quelques millikelvins sur une gamme de température réduite.

Le réservoir d'un thermomètre à dilatation de liquide subira des variations de ses caractéristiques géométriques au cours du temps et en fonction des cycles thermiques auxquelles il sera soumis. Ces variations seront à l'origine de l'évolution des indications fournies par le thermomètre.

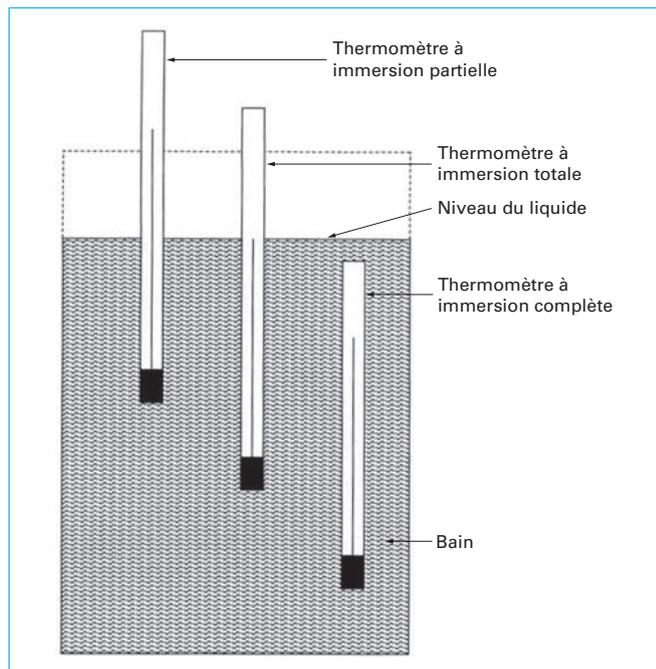


Figure 10 – Thermomètres à dilatation de liquide à immersion complète, totale ou partielle

Tableau 5 – Liquides thermométriques	
Domaine d'emploi (en °C)	Liquide
- 200 à + 20	Pentane
- 110 à + 100	Alcool éthylique (souvent coloré en rouge)
- 38 à + 650	Mercure
- 56 à + 650	Mercure-thallium

Pour contrôler la stabilité dans le temps de ces thermomètres, il faut les placer périodiquement dans un bain de glace fondante et relever la valeur de température indiquée. Les principales causes de variation de l'indication du thermomètre sont :

- une variation des caractéristiques géométriques du réservoir ;
- une séparation de la colonne de liquide ;
- une retenue du liquide dans la chambre d'expansion.

Les thermomètres à dilatation de liquides doivent être stockés et transportés de préférence en position verticale, cela afin de limiter au maximum les risques de rupture de la colonne de mesure.

2.4 Thermistances

■ Présentation

L'élément sensible d'une thermistance (figure 11) est constitué d'un matériau semi-conducteur. Les caractéristiques d'une thermistance sont fonction de son modèle commercial et varient considérablement entre deux modèles. Leur principal domaine d'application se situe entre - 80 °C et 250 °C ; domaine qu'on restreindra à la plage 0 °C-100 °C si une incertitude faible est recherchée. Il existe

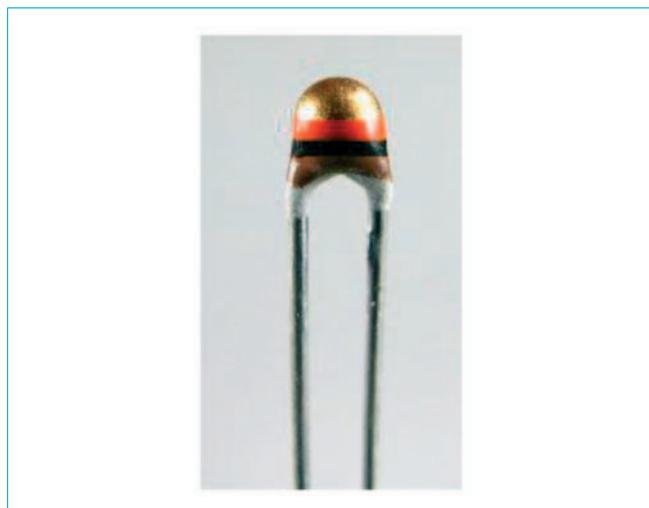


Figure 11 – Thermistance

des thermistances à coefficient de température négatif (CTN), dont la résistance électrique diminue lorsque la température augmente, et des thermistances à coefficient de température positif (CTP) pour lesquelles la résistance électrique augmente avec la température.

■ Avantages et inconvénients

Les thermistances présentent généralement une résistance électrique souvent de plusieurs kiloohms. Cette forte valeur de résistance est à la fois un atout et un inconvénient :

- atout : la variation de la résistance électrique en fonction de la variation de température est élevée (plusieurs ohms par °C) c'est donc un capteur très sensible ;
- inconvénient : pour limiter l'autoéchauffement du capteur, il faudra utiliser de très faibles courants de mesure de l'ordre de quelques μ A.

Les thermistances ont un faible encombrement et si on prend soin d'ancrer thermiquement les fils de liaison sur une dizaine de centimètres elles modifient peu la répartition des températures du milieu dans lequel elles sont placées.

Les thermistances sont des capteurs de température particulièrement bien adaptées au domaine de la température ambiante. Une thermistance de bonne qualité, bien étalonnée et bien utilisée, peut permettre d'accéder à des incertitudes de mesure de l'ordre de quelque mK.

2.5 Capteurs autonomes (capteur « iButton »)

2.5.1 Généralités

Ce chapitre n'expose pas, de manière exhaustive, la technologie des capteurs intégrés et le fonctionnement détaillé des thermomètres iButton. Il donne les principes de fonctionnement, et les précautions d'emploi de ce type de thermomètres, qui sont de plus en plus utilisés pour surveiller la chaîne du froid, mais très peu décrits dans la littérature.

De nombreuses applications nécessitent d'enregistrer la température dans des pièces climatisées, des réfrigérateurs, des caissons réfrigérés, sur de longues périodes. Les capteurs utilisés pour ces applications ne sont pas des capteurs classiques (couple thermo-électrique, thermomètres à résistance...), décrits dans les précédents chapitres, mais des capteurs dont le principe de fonctionnement repose sur les propriétés thermodynamiques des semi-conducteurs (transistors, diodes) ou des oscillateurs (quartz). Les thermomètres « iButton » ou « thermo-bouton » ont la forme



Figure 12 – Thermomètre iButton (thermo-bouton)

d'une pastille d'un diamètre 15 mm et d'épaisseur 5 mm. Ces capteurs de température sont composés, la plupart du temps, d'un semi-conducteur associé à un bus de contrôle « one-wire ». Le capteur, le convertisseur analogique numérique, et le bus de contrôle sont intégrés sur un même circuit intégré. La figure 12 présente les photographies d'un capteur iButton.

Leur taille réduite, l'absence de câblage, leur durée de vie sans intervention extérieure, leur facilité d'emploi et d'installation, les nombreux logiciels disponibles pour effectuer un histogramme des températures, constituent les principaux avantages qui permettent d'utiliser ces capteurs pour assurer la surveillance et la traçabilité de la chaîne du froid, lors du transport de produits pharmaceutiques ou alimentaires. Ils doivent être, de préférence, étalonnés dans des conditions proches de leur utilisation (enceinte climatique). Les recommandations pour l'étalonnage de ces capteurs sont développées dans un deuxième article [R 2 521] *Étalonnage et vérification des thermomètres – Techniques d'étalonnage*.

2.5.2 Exemple de capteurs intégrés

La technologie des circuits intégrés permet d'appairer des transistors destinés à la réalisation de capteurs de température. Ces capteurs délivrent une tension ou un courant proportionnels à la température, avec une grande linéarité sur un domaine de température variant de - 50 °C à 150 °C.

La figure 13 présente un exemple de capteur de température à semi-conducteur, la figure 14 présente un exemple de capteur de température à quartz.

Les deux transistors sont identiques, avec le même gain en courant. Ces transistors sont construits avec une surface d'émetteur S telle que : $S_{T2} = N \times S_{T1}$.

Les courants inverses de saturation base collecteur sont donc de la forme : $I_{s2} = N \times I_s$

avec q charge de l'électron,
 k_B constante de Boltzmann,
 T température absolue.

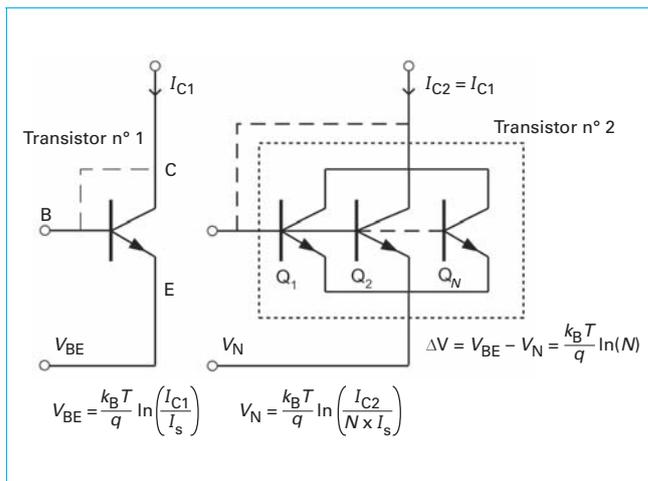


Figure 13 – Principe de fonctionnement d'un capteur de température à transistors

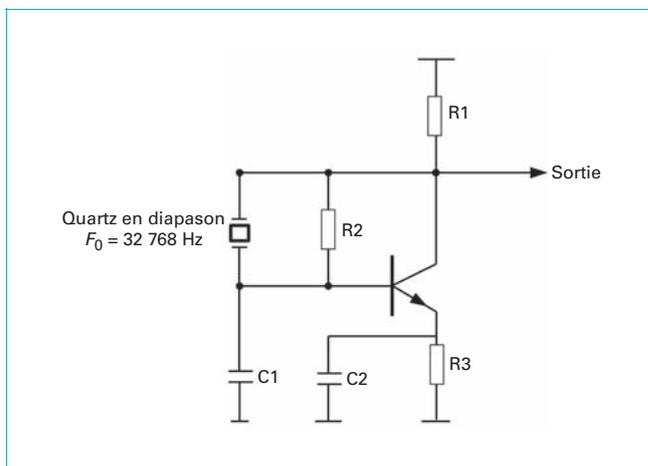


Figure 14 – Principe de fonctionnement d'un capteur de température à quartz

La fréquence de résonance du quartz piézo-électrique varie avec la température en suivant un polynôme du troisième degré, de la forme :

$$F(T) = F(T_0) \left(1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \delta(T - T_0)^3 \right)$$

T_0 est la température de référence, en général égale à 25 °C, et $F(T_0)$ est la fréquence de résonance du quartz à la température de référence.

Les trois coefficients sont donnés par le constructeur du quartz piézo-électrique :

- α coefficient du premier ordre, exprimé en ppm.°C⁻¹,
- β coefficient du second ordre, exprimé en ppm.°C⁻²,
- δ coefficient du troisième ordre, exprimé en ppm.°C⁻³.

2.5.3 Principales caractéristiques des thermomètres « iButton »

2.5.3.1 Linéarité

Ces capteurs ont une réponse linéaire sur un faible domaine de température (- 45 °C à 125 °C). La figure 15 présente les caractéristiques de transfert d'un capteur à semi-conducteur.

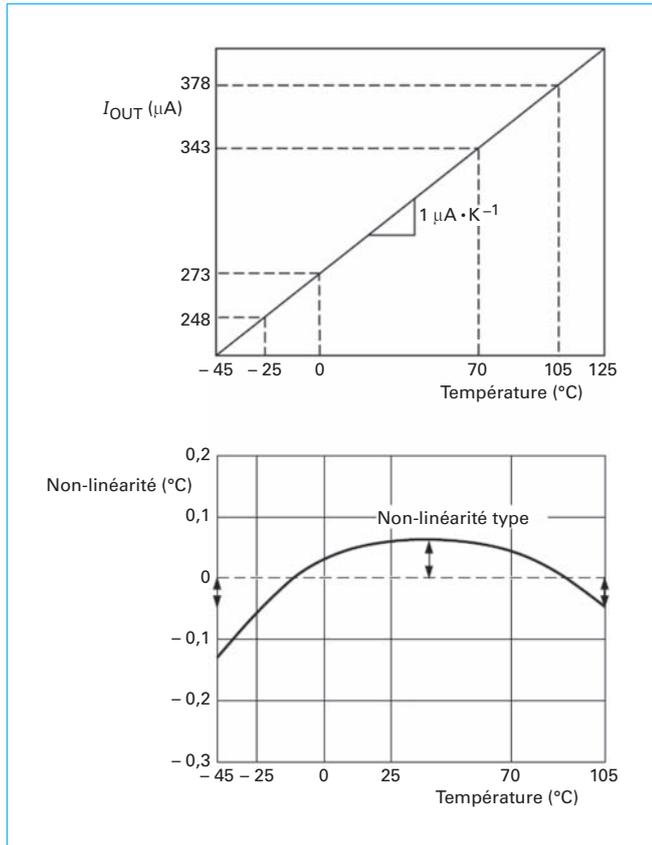


Figure 15 – Caractéristiques de transfert du capteur de température TMP 17 (Datasheets Analog Device)

Suivant le type de thermo-bouton utilisé, la résolution peut varier de 0,0625 °C à 2 °C. Le capteur de température et le convertisseur analogique-numérique sont intégrés sur une même plaquette semi-conducteur. Même si la température affichée sur le terminal est au centième de degré Celsius, la résolution de ces dispositifs est liée au convertisseur A/N, cette résolution est configurable en fonction du domaine de température et de la fréquence d’acquisition. Certains thermomètres iButton permettent de configurer la résolution en 9, 10, 11 ou 12 bits. Le tableau 6 présente un exemple de conversion de la température.

Exemple (tableau 6) :

Le pas de quantification est égale à 0,0625 °C.
 Soit une température égale à 25,0625 °C : $25,0625/0,0625 = 401$ (décimal) = 0001 1001 0001 (binaire) = 0191 (hexadécimal).

2.5.3.2 Durée de vie et fréquence d’acquisition

La période d’acquisition des mesurages peut être configurée de 1 seconde à 273 heures, le nombre de mesurages enregistrés est variable (4096, 8192...). La durée de vie du thermomètre iButton est directement liée à la fréquence d’acquisition. Une horloge temps réel est intégrée et permet d’effectuer un histogramme des températures. La figure 16 présente un exemple de durée de vie des thermomètres iButton.

2.5.3.3 Bus de contrôle « one wire »

Le bus de contrôle *one wire* permet de connecter et de faire dialoguer entre eux des thermomètres sur un seul fil. Le système de bus utilise un seul maître (PC) qui pourra dialoguer avec un ou plusieurs esclaves (thermomètres iButton). Chaque thermomètre

Tableau 6 – Exemple d’un thermomètre configuré en 12 bits

Température (en °C)	Sortie numérique (binaire)	Sortie numérique (hexadécimale)
+ 125	0111 1101 0000	7D0
+ 85	0101 0101 0000	550
+ 25,0625	0001 1001 0001	191
+ 10,125	0000 1010 0010	0A2
+ 0,5	0000 0000 1000	008
0	0000 0000 0000	000
- 0,5	1111 1111 1000	FF8
- 10,125	1111 0101 1110	F5E
- 25,0625	1110 0110 1111	E6F

possède une adresse physique unique, gravée dans la puce lors de sa fabrication. La figure 17 présente l’architecture du thermomètre iButton DS1820 (Dallas Semiconductor).

3. Conclusion

Les chaînes de mesure de température ont bénéficié des progrès considérables réalisés ces dernières décennies dans l’électronique. De nos jours, la qualité métrologie d’une chaîne de mesure de température repose pour l’essentiel sur les caractéristiques du capteur intégré. Avant d’entreprendre un étalonnage, il est donc souhaitable que l’opérateur s’enquière de la nature de ce capteur pour pouvoir tenir compte des précautions d’emploi et des paramètres d’influence spécifiques à ce type d’instrument.

L’utilisation des sondes à résistance de platine est relativement aisée. À condition de prendre quelques précautions, leur étalonnage ne présentera pas de difficulté. Néanmoins, au-dessus de 600 °C, elles présentent généralement un manque de stabilité devant une source d’incertitude prépondérante dans l’incertitude finale.

Les couples thermoélectriques, si couramment employés dans l’industrie, et dont la mise en œuvre paraît si simple peuvent conduire à d’importantes erreurs de mesure de température si leurs règles d’utilisation ne sont pas scrupuleusement respectées.

Affectées à des gammes de température réduites (généralement 0 °C à 100 °C) et parcourues par un courant de mesure adapté, les thermistances de bonne qualité métrologique peuvent permettre des incertitudes de mesure de l’ordre de quelque mK.

Les thermomètres à dilatation de liquide sont des instruments fragiles qui restent néanmoins très employés dans la chimie et l’agroalimentaire.

Les capteurs autonomes sont de plus en plus utilisés (contrôle de la température des biomatériaux, caractérisation d’enceinte climatique...). Leur arrivée récente sur le marché s’est rapidement traduite par de fortes demandes en étalonnage et surtout en vérification.

Les techniques d’étalonnage, leur application à ces différents types de capteur et les sources d’incertitudes associées sont développées dans l’article *Étalonnage et vérification des thermomètres – Techniques d’étalonnage* [R 2 521] publié dans le présent traité.

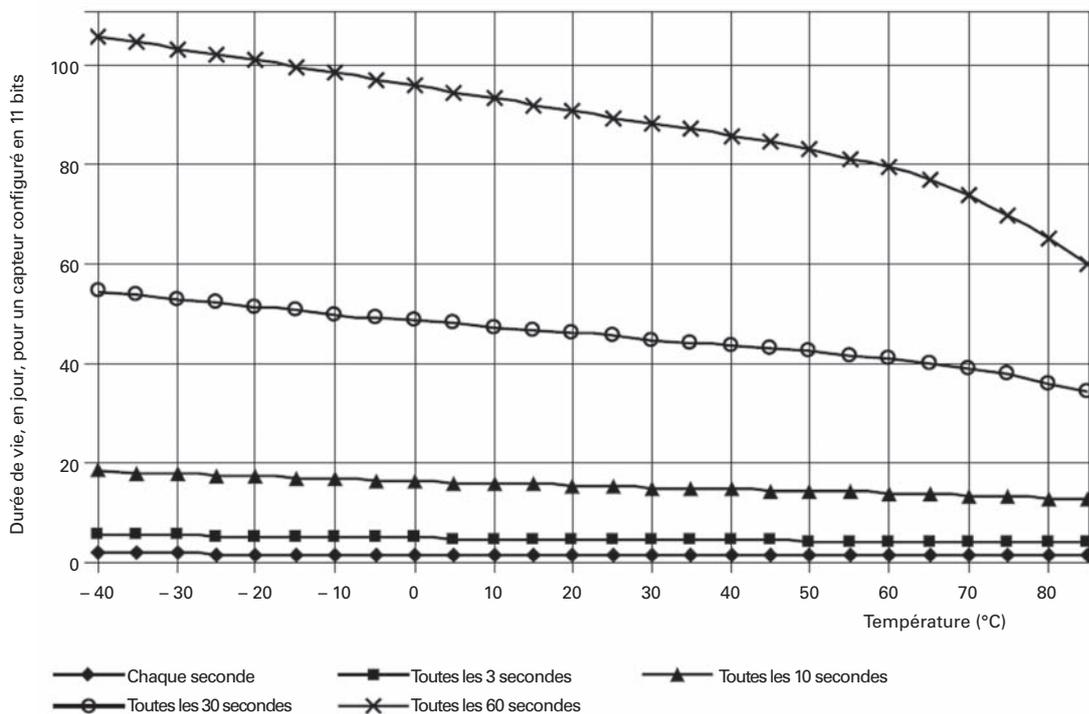
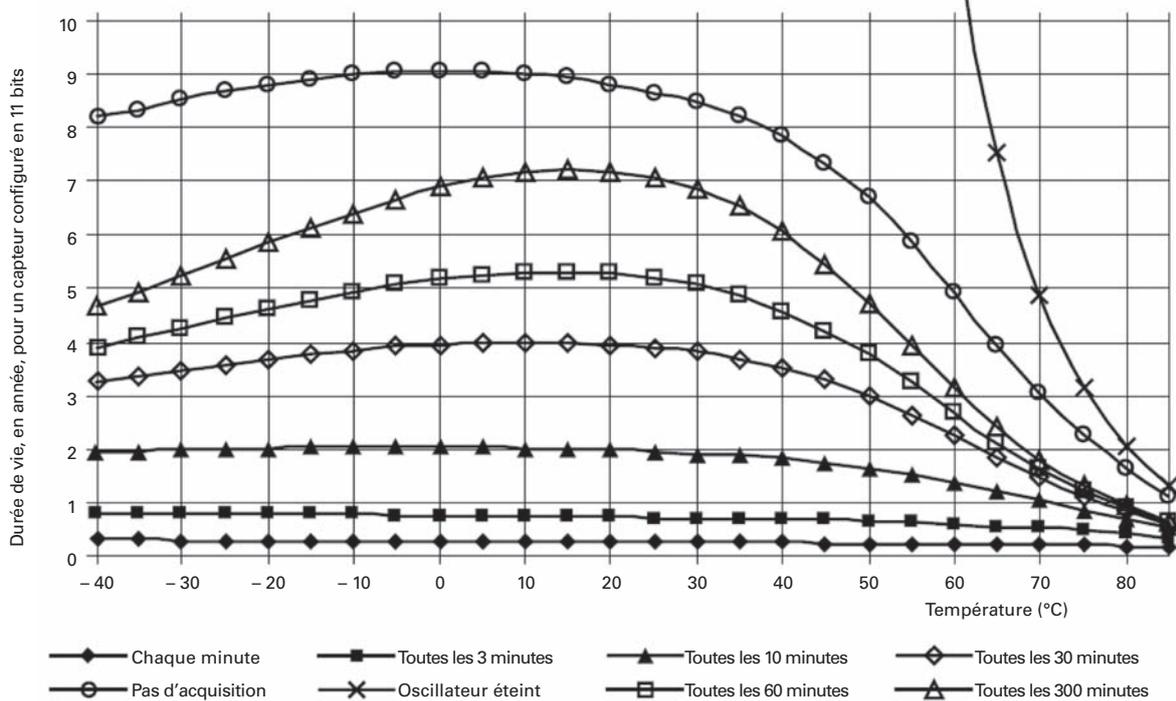


Figure 16 - Exemple de durées de vie des thermomètres iButton, en fonction de la température et de la fréquence d'acquisition (Datasheets Dallas Semiconductor)

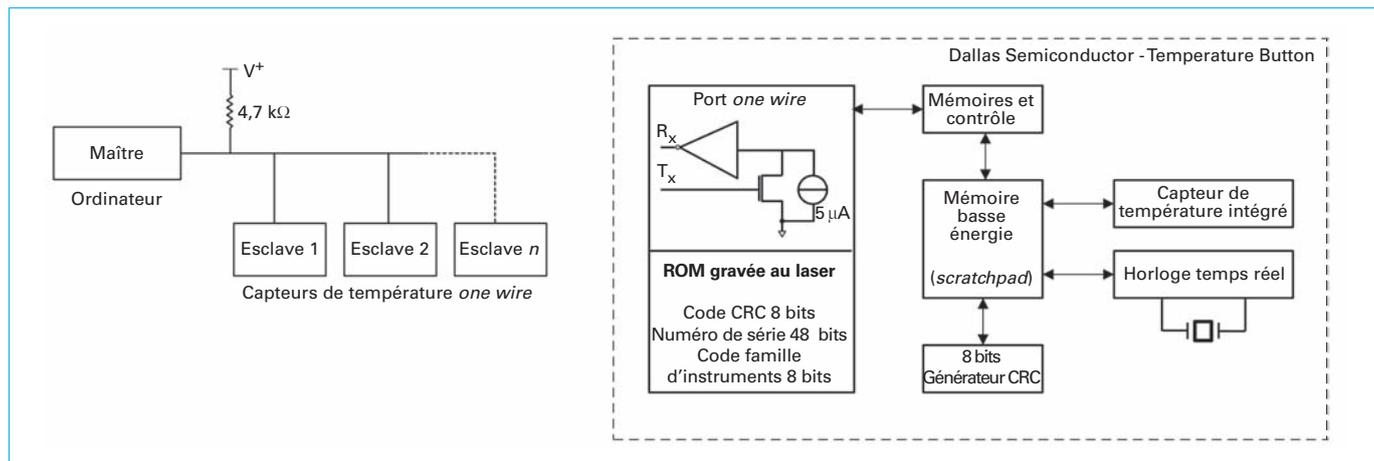


Figure 17 - Schéma de principe d'un thermomètre iButton one wire

Étalonnage et vérification des thermomètres

Généralités et description d'instruments

par **Eliane RENAOT**

Ingénieur

Responsable « amont » du département « température moyenne » au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM

et **Dominique JOUIN**

Ingénieur

Responsable du département et du laboratoire d'étalonnage « température moyenne » au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM

Sources bibliographiques

Techniques simplifiées permettant d'approcher l'Échelle Internationale de Température

de 1990. Monographie BNM N° 14, Chiron, Paris (1991).

Handbook Temperature Measurement. Volumes 1-3, éditeur Robin E. Bentley (1998).

À lire également dans nos bases

BONNIER (G.) et DEVIN (E.). – *Couples thermoélectrique : caractéristiques et mesure de température*. Logiciel « Fonctions de référence », [R 2 590]. Base Mesures physiques (1997).

DEVIN (E.). – *Couples thermoélectriques – Données numériques d'emploi*. [R 2 594]. Base Mesures physiques (1999).

VIGNERON (T.). – *Éléments sensibles à résistance métallique et thermomètres étalons*. [R 2 525]. Base Mesures physiques (2007).

DEGIOVANNI (A.). – *Transmission de l'énergie thermique – Conduction*. [BE 8 200]. Base Génie énergétique (1999).

PADET (J.). – *Conversion thermique et masique – Principes généraux*. [BE 8 205]. Base Génie énergétique (2005).

AUTRAN (J.-M.). – *Thermomètre à résistance métallique*. [R 2 570]. Base Mesures physiques.

MATTEI (S.). – *Rayonnement thermique des matériaux opaques*. [BE 8 210]. Base Génie énergétique (2005).

KLARSFELD (S.), HUETZ-AUBERT (M.) et DE DIANOUS (P.). – *Rayonnement thermique des matériaux semi-transparents*. [B 8 215]. Base Archives Génie énergétique (1995).

Sites Internet

Échelle Internationale de température de 1990 (EIT-90), disponible sur le site web du BIPM : <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/its-90/EIT-90.pdf>

Normes et standards

AFNOR

FD X 07-007

Métrologie – Guide d'application de la norme NF EN ISO 10012 « Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure » – Conception, développement, maîtrise et amélioration des processus de mesure ou d'essai.

FD X 07-011

Métrologie – Essais – Métrologie dans l'entreprise – Constat de vérification des moyens de mesure.

FD X 07-012

Métrologie – Métrologie dans l'entreprise – Certificat d'étalonnage des moyens de mesure. Constat de vérification des moyens de mesure.

NF X 07-001

Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.

FD X 07-028

Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – estimation des incertitudes sur les mesures de température.

FD X 07-029-1

Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – Partie 1 : procédure d'étalonnage et de vérification des sondes et thermomètres à résistance.

FD X 07-029-2

Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – Partie 2 : procédure d'étalonnage et de vérification des couples thermoélectriques et thermomètres à couple thermoélectrique.

FD X 07-029-3

Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – Partie 3 : procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres à dilatation de liquide.

NF C 42-324	Câbles d'extension et de compensation pour couples thermoélectriques – Composition, nature des matériaux, essais de fabrication.	NF B 35-507	Thermomètre à échelle protégée d'usage général.
NF EN 60584-1	Couples thermoélectriques – Partie 1 : tables de référence.	NF B 35-508	Thermomètre sur tige pour calorimètre.
NF EN 60584-2	Couples thermoélectriques – Partie 2 : tolérances.	NF B 35-509	Thermomètre sur tige pour calorimètre à échelle protégée.
NF EN 62460	Tableaux température – Force électromotrice (F.É.M) pour les combinaisons de couples thermoélectriques à éléments purs.	NF C 42-323	Appareils de mesurage électrique – Identification des couples thermoélectriques.
FD X 07-013	Critères de choix entre vérification et étalonnage, utilisation et conservation des résultats de mesure.	NF EN 50112	Mesure, commande, régulation – Capteurs électriques de température – Tubes protecteurs métalliques pour assemblage de couples thermoélectriques.
NF X 07-015	Métrologie – Essais – Métrologie dans l'entreprise – Raccordement des résultats de mesure aux étalons.	NF EN 50113	Mesure, commande, régulation – Capteurs électriques de température – Tubes isolants pour couples thermoélectriques.
NF X 07-016	Métrologie – Essais – Métrologie dans l'entreprise – Modalités pratiques pour l'établissement des procédures d'étalonnage et de description des moyens de mesure.	NF EN 50212	Connecteurs pour couples thermoélectriques.
NF B 35-500	Thermomètre de laboratoire à dilatation de liquide dans une gaine de verre – Principe de conception de construction et d'utilisation.	NF EN 61515	Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dit « chemisés ».
NF B 35-501	Thermomètre à échelle protégée ajustable.	CEI	
NF B 35-502	Thermomètre de précision, sur tige, type long.	CEI 60751	2008 Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine (publié par l'AFNOR).
NF B 35-503	Thermomètre de précision, sur tige, type court.	ASTM	
NF B 35-504	Thermomètre de précision, à échelle protégée, type long.	ASTM E77	Standard test method for inspection and verification of thermometers.
NF B 35-505	Thermomètre de précision, à échelle protégée, type court.	UTE	
NF B 35-506	Thermomètre sur tige d'usage général.	UTE C46-201	Mesure et commande dans les processus industriels – Capteurs de température à couples thermoélectriques – Prescription de qualification.

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