



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **R2521 V1**

Date de publication :
10 mars 2012

Étalonnage et vérification des thermomètres - Techniques d'étalonnage

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

Techniques d'étalonnage

par **Eliane RENAOT**

Ingénieur

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

et **Dominique JOUIN**

Ingénieur

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

1. Présentation générale	R 2 521 – 2
1.1 Rappel	– 2
1.2 Définitions	– 2
2. Méthodes d'étalonnage	– 3
2.1 Méthode par points fixes	– 3
2.2 Étalonnage par comparaison	– 7
3. Fonctions d'interpolation	– 10
3.1 Le capteur est une sonde répondant aux critères de l'EIT-90	– 10
3.2 Le capteur est une sonde ne répondant pas aux critères de l'EIT-90	– 12
3.3 Le capteur est une thermistance	– 12
3.4 Le capteur est un couple thermoélectrique	– 12
4. Indicateurs numériques	– 13
4.1 Présentation générale	– 13
4.2 Acquisition et conversion du signal analogique	– 13
4.3 Conversion « mathématique » du signal numérique	– 13
4.4 Génération d'un courant pour les mesures de résistances	– 14
5. Étalonnage de capteurs et thermomètres spécifiques	– 15
5.1 Thermomètres à résistance de platine et sondes à résistance de platine	– 15
5.2 Thermomètres à couples thermoélectriques et couples thermoélectriques	– 16
5.3 Thermomètres à dilatation de liquide	– 18
5.4 Thermistance	– 20
5.5 Capteurs autonomes	– 21
6. Rédaction et utilisation des certificats d'étalonnage	– 21
7. Conclusion	– 21
Pour en savoir plus	Doc. R 2 521

Les demandes de prestations d'étalonnage réalisées aux meilleures incertitudes sont en constante augmentation. Le domaine de température le plus sollicité va de -80°C à 250°C , mais on observe un accroissement des demandes en températures négatives lié en particulier à la nécessité de maîtriser la chaîne du froid dans l'agro-alimentaire et le domaine de la santé. Contre toute attente, les prestations d'étalonnage concernant les thermomètres à dilatation de liquide, bien que décroissant d'année en année, représentent encore 20 % des instruments étalonnés car ils sont encore très répandus dans le secteur agroalimentaire.

Cet article a pour but de guider l'expérimentateur dans le choix d'une technique d'étalonnage pertinente en fonction de ses besoins ainsi que dans la mise en œuvre de cette technique. Les mesures de température sont si communes que l'opérateur oublie parfois qu'il lui faut maîtriser plusieurs domaines de la physique pour accéder à des résultats de mesure affectés d'une incertitude compatible avec les besoins exprimés.

L'expérimentateur est souvent confronté à la difficulté d'établir un bilan d'incertitudes associé à sa mesure. Les informations fournies dans cet article formeront une base de réflexion sur laquelle s'appuyer au moment d'établir un bilan d'incertitudes associé à une mesure de température.

Nous nous limiterons dans cet article au domaine de la **thermométrie par contact**, c'est-à-dire aux méthodes d'étalonnage pour lesquelles le capteur de température est directement en contact avec le milieu d'étalonnage. Nous retracerons également ce document aux étalonnages réalisés dans la gamme de température allant de **83,8058 K à 2041,35 K**. Cette gamme couvre la plupart des besoins des industriels.

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 mesures de température de surface.

1. Présentation générale

1.1 Rappel

En thermométrie par contact, la « réalisation de la définition d'une grandeur donnée » peut être fournie soit par un système de mesure (thermomètres de référence, générateur de température, chaîne de mesure électrique...), soit par une mesure matérialisée (points fixes de température). La première méthode est une méthode d'**étalonnage par comparaison**, la seconde méthode correspond à un **étalonnage par points fixes**. Ces deux méthodes sont explicitées dans la suite du document (§ 2).

Un étalonnage est une opération qui consiste à comparer les valeurs indiquées par un appareil à étalonner avec des valeurs de références fournies par un étalon. La connaissance des valeurs de références est rendue possible parce que l'étalon utilisé est raccordé par une chaîne ininterrompue de comparaisons aux étalons nationaux ou internationaux et par la maîtrise des incertitudes de mesures affectant ces comparaisons.

Pour assurer la traçabilité d'un étalonnage, il est impératif d'enregistrer les conditions et les résultats de l'étalonnage accompagnés des incertitudes associées.

Le résultat d'un étalonnage se traduit par des informations utilisables pour, entre autres :

- apporter des corrections aux résultats de mesure fournis par un instrument ;
- effectuer une confirmation métrologique (opération qui permet de s'assurer qu'un instrument est conforme aux exigences pour une utilisation prévue) ;
- évaluer la dérive d'un instrument dans le temps.

Dans le cadre des exigences d'un système qualité, un certificat d'étalonnage doit être produit avant toute intervention d'ajustage car il doit permettre à l'utilisateur de valider ou de corriger les résultats issus de l'usage antérieur de l'instrument. Un second certificat doit être émis après intervention et les deux certificats doivent être remis à l'utilisateur.

1.2 Définitions

Le vocabulaire employé dans ce document se rapporte :

- au *Vocabulaire international de métrologie – Concept fondamentaux et généraux et termes associés* (VIM) ;
- au *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (GUM).

■ **Étalonnage** (VIM – paragraphe 2.39)

« Opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication. »

■ **Étalon** (VIM – paragraphe 5.1)

« Réalisation de la définition d'une grandeur donnée, avec une valeur déterminée et une incertitude de mesure associée, utilisée comme référence. »

■ **Vérification** (VIM – paragraphe 2.44)

« Fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées. »

■ **Traçabilité métrologique** (VIM – paragraphe 2.41)

« Propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne

ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure. »

■ Incertitude type (GUM – paragraphe 2.3.1)

« Incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart type. »

■ Incertitude type composée (GUM – paragraphe 2.3.4)

« Incertitude type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de termes, ces termes étant les variances ou covariances de ces autres grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs. »

■ Incertitude élargie (GUM – paragraphe 2.3.5)

« Grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande. »

■ Facteur d'élargissement (GUM – paragraphe 2.3.6)

« Facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude type composée pour obtenir l'incertitude élargie. »

■ Évaluation de type A (de l'incertitude) (GUM – paragraphe 2.3.2)

« Méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations. »

■ Évaluation de type B (de l'incertitude) (GUM – paragraphe 2.3.3)

« Méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de séries d'observations. »

■ Répétabilité (VIM – paragraphes 2.20 et 2.21)

« Fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de répétabilité (condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent la même procédure de mesure, les mêmes opérateurs, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps). »

■ Reproductibilité (VIM – paragraphes 2.24 et 2.25)

« Fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de reproductibilité (condition de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires. »

Les définitions de quelques termes techniques employés dans la suite du document sont données ci-dessous.

■ Générateur de température

Bain liquide, four électrique, enceinte thermostatée utilisé pour générer des températures qui peuvent être positives ou négatives.

■ Volume de travail

Volume au sein d'un générateur de température dans lequel sont placés le capteur étalon et le capteur en étalonnage lors d'un étalonnage par comparaison.

■ Homogénéité thermique du volume de travail (AFNOR – FD X 07-0291 paragraphe 3)

« Différence obtenue en régime établi entre les valeurs extrêmes de température dans le volume de travail. »

■ Profil thermique (AFNOR – FD X 07-0291 paragraphe 3)

« Évolution de la température le long du capteur de température. »

■ Bloc d'égalisation thermique (AFNOR – FD X 07-0291 paragraphe 3)

« Bloc utilisé dans une enceinte thermique pour améliorer localement la stabilité et l'homogénéité thermique. »

2. Méthodes d'étalonnage

2.1 Méthode par points fixes

2.1.1 Principe

Les points fixes de température reposent sur des transitions de phase de corps purs. Suivant la règle de Gibbs :

$$v = n + 2 - r - \varphi$$

avec	v	nombre de variables intensives indépendantes caractérisant le système à l'équilibre,
	n	nombre de corps purs en présence,
	2	nombre de paramètres externes, température et pression,
	r	nombre d'équations chimiques indépendantes,
	φ	nombre de phases présentes dans le système.

Si une enceinte contient un corps pur présent sous ses trois phases (solide, liquide, vapeur), on a alors $n = 1$, $r = 0$ et $\varphi = 3$, ce qui conduit à $v = 0$. Il n'y a aucune variable intensive indépendante, la température et la pression ne peuvent prendre qu'une seule valeur. Si le corps est présent sous deux formes (liquide et solide par exemple) $v = 1$, la température est alors fonction de la pression locale.

Nous nous limiterons dans ce document aux points fixes :

- relevant de la thermométrie de contact ;
- se situant dans une gamme de température compatible avec la majorité des besoins industriels.

Il y a lieu de différencier les points fixes de définition de l'EIT-90 des points fixes secondaires. C'est la possibilité de les reproduire avec une plus ou moins grande incertitude qui conduit à classer les transitions de phase dans l'une ou l'autre catégorie. Plusieurs paramètres vont influencer sur cette reproductibilité. La **présence d'impuretés** dans le corps considéré va se traduire par une modification de la température de changement de phase ainsi que par un élargissement de la plage de température sur laquelle a lieu la transition. La pureté ultime du corps à laquelle on va pouvoir accéder en appliquant les méthodes de raffinage les plus élaborées sera donc un critère important. Les points fixes sont réalisés à partir de corps présentant une pureté au moins égale à 99,9999 %. À titre d'exemple, une concentration en impuretés de 9×10^{-7} g/g dans de l'argent (pureté 99,99991 %) modifiera sa température de changement de phase de 0,001 °C. Les points d'ébullition, plus dépendants de la pression que les points de fusion ou de congélation, seront généralement classés parmi les points secondaires sauf dans le domaine des très basses températures.

La liste des points fixes utilisés dans le domaine de – 189,3442 °C à 961,78 °C est reportée dans le tableau 1. Tous ces points sont des points de définition de l'EIT-90 à l'exception du point de fusion de la glace (0 °C) qui est un point secondaire. Néanmoins ce point figure dans ce tableau car il est fréquemment utilisé dans les laboratoires d'étalonnage. D'autres points secondaires sont rarement utilisés, le point du plomb (327 °C) par exemple.

Tableau 1 – Points fixes entre – 189,3442 °C et 961,78 °C

Corps	Type de point	Température (°C)	Température (K)
Ar	T	– 189,3442	83,8058
Hg	T	– 38,8344	234,3156
H ₂ O	F	0	273,15
H ₂ O	T	0,01	273,16
Ga	F	29,7646	302,9146
In	C	156,5985	429,7485
Sn	C	231,928	505,078
Zn	C	419,527	692,677
Al	C	660,323	933,473
Ag	C	961,78	1234,93

Dans la gamme de température considérée, on rencontre trois types de point :

- le **point triple (T)** : la température correspond à la température d'équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du corps ;
- le **point de fusion (F)** : la température correspond à la température d'équilibre entre les phases solide et liquide du corps à la pression de 101 325 Pa. Le corps passe de l'état solide à l'état liquide ;
- le **point de congélation (C)** : la température correspond à la température d'équilibre entre les phases solide et liquide du corps à la pression de 101 325 Pa. Le corps passe de l'état liquide à l'état solide.

Pour illustrer ces points fixes, on s'intéressera dans ce document au **point triple de l'eau** (0,01 °C), au **point de fusion de la glace** (0 °C) et au **point de congélation de l'indium** (156,5985 °C). Les lecteurs souhaitant obtenir plus d'informations sur ces points ainsi que sur les autres points fixes se rapporteront au texte de la *Supplementary Information* disponible sur le site du Bureau international des poids et mesures (BIPM).

2.1.2 Point triple de l'eau (0,01 °C)

Le diagramme de phases de l'eau est présenté sur la figure 1. Au point A, les trois phases coexistent et réalisent le point triple ; la température et la pression sont fixées et ne peuvent pas prendre d'autres valeurs. Le point B correspond au point de fusion (du solide vers le liquide) ou de congélation (du liquide vers le solide). Deux phases sont en présence, la température du mélange eau-glace est fonction de la pression locale. Pratiquement, une cellule au point fixe de l'eau (figure 2) se présente sous la forme d'une ampoule contenant de l'eau très pure dont la composition isotopique est connue. À température ambiante l'ampoule contient de l'eau sous forme liquide et vapeur. La phase solide est formée lors de la mise en œuvre du point par introduction d'une tige ou d'un corps froid dans le tube central de l'ampoule. Celle-ci est ensuite placée dans un milieu régulé en température proche de 0,01 °C afin de pouvoir conserver le plus longtemps possible les trois phases en présence au sein de l'ampoule. Lors de l'étalonnage, le thermomètre est placé dans le puits central de la cellule. De nombreux facteurs d'influence vont venir impacter la réalisation pratique de ce point triple :

- la pureté de l'eau ;
- la composition isotopique de l'eau ;

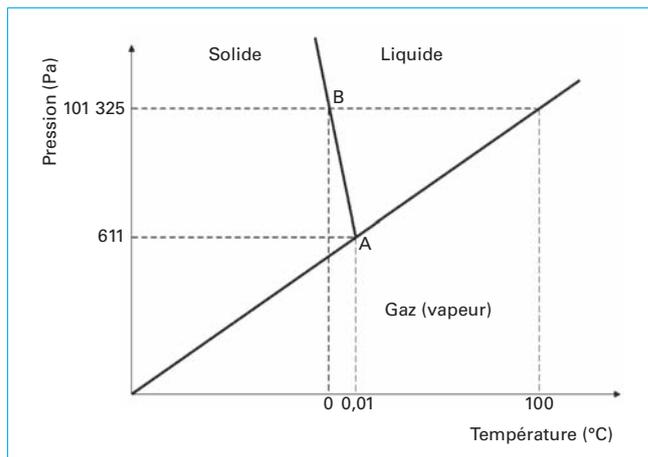


Figure 1 – Diagramme de phases de l'eau

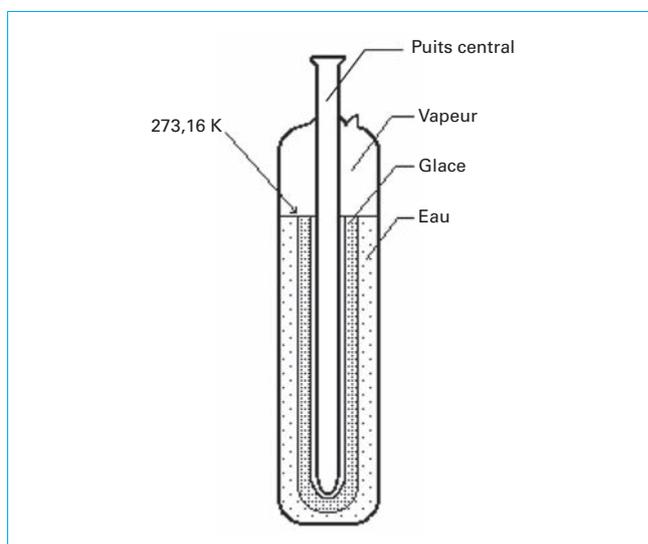


Figure 2 – Cellule au point triple de l'eau

- éventuellement la pollution de l'eau par le matériau constituant l'ampoule ;
- la présence d'air à l'intérieur de l'ampoule due à :
 - à un dégazage insuffisant de l'eau lors de la construction de la cellule,
 - à des microfissures laissant petit à petit pénétrer de l'air dans l'ampoule ;
- un défaut de continuité du manchon de glace entourant le puits central ;
- etc.

La mise en œuvre et l'utilisation de ce point fixe, comme de l'ensemble des points fixes, relève d'une formation spécifique et passe au minimum par la lecture de documents tels que la *Supplementary Information* déjà citée plus haut.

2.1.3 Point de fusion de la glace (0 °C)

Ce point fixe correspond à la température d'équilibre entre les phases solide et liquide de l'eau pure saturée d'air sous une pression de 101 325 Pa. Ce n'est pas un point fixe de l'EIT-90,

Tableau 2 – Incertitude sur la réalisation du point de fusion de la glace en fonction de la qualité de l'eau utilisée

Qualité de l'eau	Incertitude
Eau de ville	$\pm 0,050$ °C
Eau déminéralisée	$\pm 0,030$ °C
Eau distillée	$\pm 0,003$ °C

néanmoins il trouve plusieurs applications dans un laboratoire d'étalonnage, en particulier :

- température de référence pour couples thermoélectriques ;
- contrôle de la stabilité dans le temps des sondes à résistance de platine et des thermistances.

L'incertitude sur la réalisation du point de fusion de la glace va être fonction de la qualité de l'eau utilisée. Le tableau 2 donne des valeurs indicatives de cette incertitude. Le mélange eau liquide-glace est généralement réalisé dans un récipient dont les parois sont isolées thermiquement. La quantité de liquide doit être suffisante pour que le mélange présente une couleur grise uniforme. L'eau liquide présente un maximum de densité pour une température d'environ 4 °C ; il faut donc entretenir ce mélange (retirer périodiquement l'eau issue de la fonte de la glace du liquide et rajouter de la glace) pour éviter une accumulation de liquide à cette température dans la partie basse du récipient.

2.1.4 Point de congélation de l'indium (156,5985 °C)

Ce point fixe est un point de congélation ; le métal passe de la phase liquide à la phase solide. Le métal est placé dans un creuset en graphite, lui-même inséré dans une enveloppe en silice. Un puits central en silice permet l'introduction du thermomètre (figure 3). Tous les éléments intervenant dans l'élaboration de la cellule sont soumis à une procédure de nettoyage complexe avant d'entreprendre l'étape de remplissage du creuset. Cette étape est délicate car elle ne doit pas introduire de pollution au sein du métal.

Le gaz régnant dans la cellule est généralement de l'argon. La cellule peut être :

- scellée : dans ce cas, la pression a été ajustée lors de la fabrication pour être égale à 101 325 Pa à la température de changement de phase ;
- ouverte : une tubulure permet de raccorder la cellule à un banc de pompage et de remplissage en argon. La pression est contrôlée à chaque mise en œuvre du point fixe.

La cellule est placée dans un générateur de température qui va permettre de faire décrire par le métal un cycle fusion-congélation. Pour éviter, lors de l'étalonnage, que la température de l'élément sensible du thermomètre soit affectée par la température du générateur de température, une interface solide-liquide continue doit entourer le puits de la cellule sur une hauteur d'au moins 17 cm. Cette condition impose une uniformité en température au sein du générateur de température impossible à obtenir avec un four classique ne comportant qu'une seule résistance chauffante. On sera donc conduit à utiliser des générateurs de température tels que :

- un bain liquide (– 80 °C à 200 °C) ;
- des fours à air (jusqu'à 420 °C), voir figure 4a ;
- des fours comportant plusieurs résistances chauffantes alimentées séparément, voir figure 4b ;
- des fours avec une seule résistance chauffante mais équipés d'un bloc d'égalisation thermique ou d'un caloduc remplissant cette fonction, voir figure 4c.

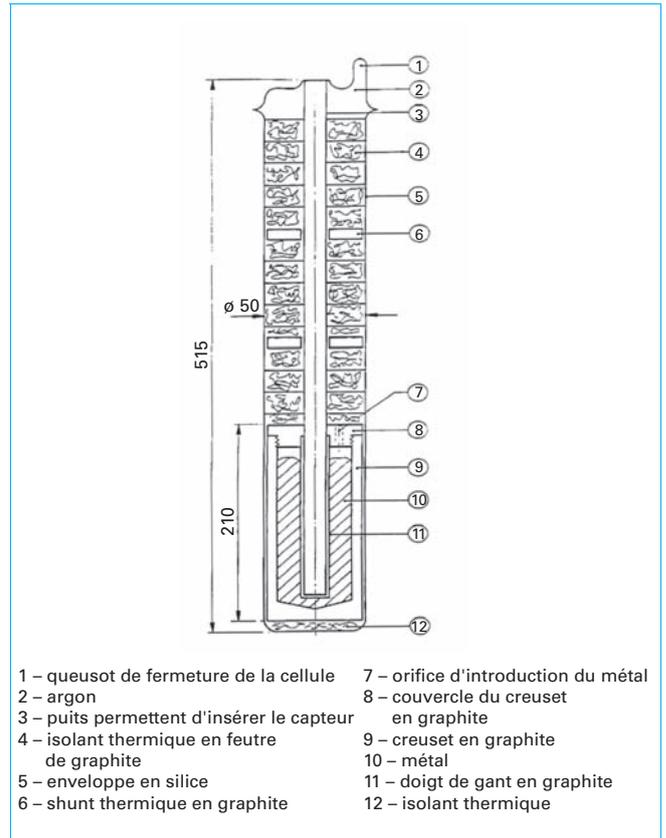


Figure 3 – Cellule au point fixe de l'indium scellée

La température au sein du générateur de température est pilotée par un (ou plusieurs) régulateur(s) de température dont l'élément de commande est le plus souvent un couple thermoélectrique. La consigne affichée en début d'expérience permet de faire fondre le métal ; on observe le palier de fusion (figure 5). La température est ensuite abaissée pour obtenir, après le phénomène de surfusion, la congélation. La surfusion est liée à la faculté d'un métal à rester en phase liquide à une température inférieure à sa température de congélation. La germination est la formation d'une nouvelle phase (ici solide) dans une région séparée de ce qui l'entoure (ici liquide) par une limite bien définie. Dans le cas d'un métal très pur nous sommes dans le cas d'une germination dite « homogène ». Sans entrer ici dans les détails, il suffit de savoir que ce type de germination ne peut se développer que lorsque la température est inférieure à la température de congélation. Pour un métal très pur, la température atteinte lors de la surfusion dépend de la nature du métal, elle est de quelques degrés pour l'indium, le zinc, l'aluminium et l'argent. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de degrés pour l'étain et même plus de cent degrés pour le gallium.

La loi de Gibbs est applicable à un corps idéalement pur. Dans la pratique, même avec un métal dont la pureté est égale ou supérieure à 99,999 %, le changement de phase ne se réalise pas à une température unique mais plutôt sur un domaine de température. En fonction de la pureté du corps disponible sur le marché, la variation de température pendant la transition de phase sera comprise entre 0,1 mK (gallium, pureté 99,9999 %) et 1 mK (zinc, pureté 99,9999 %). À haute température (points fixes de l'aluminium et de l'argent), une pollution par migration des vapeurs métalliques du générateur de température vers le métal peut apparaître lors d'une utilisation intensive.

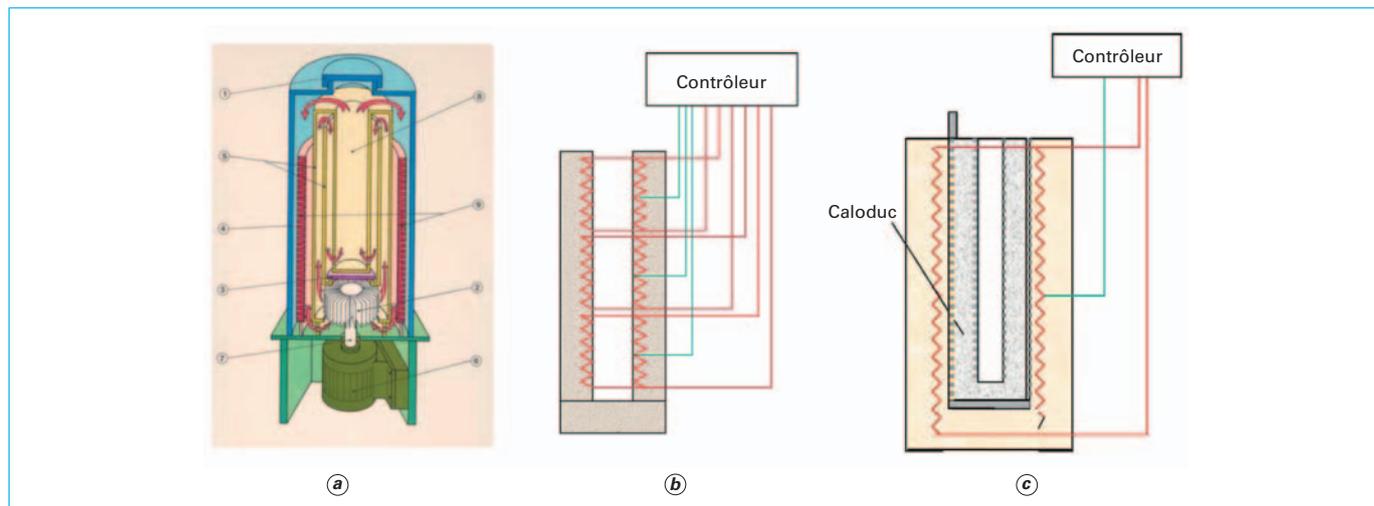


Figure 4 – Fours utilisés dans la mise en œuvre des points fixes de température

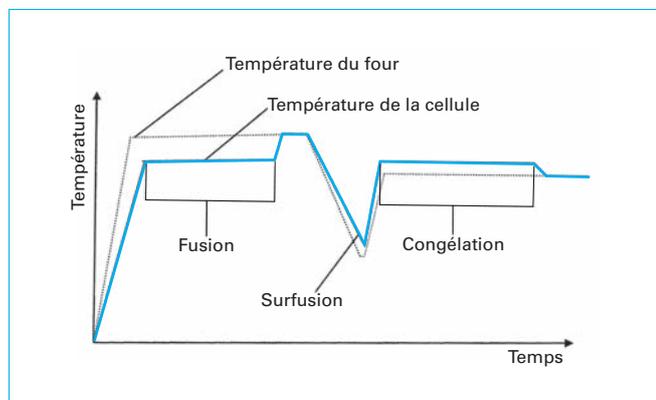


Figure 5 – Cycle fusion-congélation

Selon la masse volumique du métal utilisé et en fonction des dimensions de la cellule, la quantité de métal ultrapur nécessaire va de 350 g (aluminium) à 1 200 g (argent).

Les laboratoires nationaux de métrologie évaluent l'incertitude affectant la réalisation des références nationales en s'appuyant sur :

- les résultats des comparaisons internationales ;
- les études qu'ils mènent pour mettre en lumière les différents paramètres d'influence impactant la réalisation des points fixes.

Les points fixes utilisés dans les laboratoires d'étalonnage délivrant des prestations sont périodiquement raccordés aux références nationales au travers d'un étalonnage.

2.1.5 Mini-cellules

On trouve dans le commerce des mini-cellules qui permettent un étalonnage *in situ* des couples thermoélectriques. Ces mini-cellules sont constituées d'un creuset en graphite contenant quelques grammes de métal très pur (figure 6). Ces mini-cellules peuvent être aisément insérées dans un équipement industriel ; elles sont essentiellement réservées à l'étalonnage des couples thermoélectriques. Le principe est identique à celui des cellules classiques ; le couple est étalonné pendant la transition de phase du métal présent dans la mini-cellule. Les échanges thermiques étant moins bien maîtrisés, l'incertitude d'étalonnage sera relativement élevée

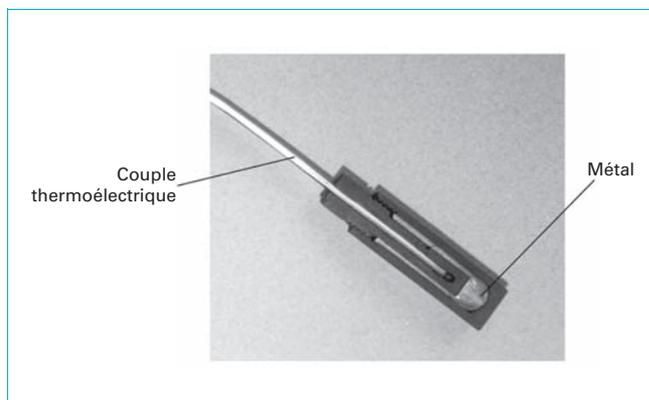


Figure 6 – Mini-cellule

tout en restant compatible avec de nombreux besoins industriels. Les risques de pollution du métal sont également importants et les mini-cellules doivent être fréquemment renouvelées.

2.1.6 Points fixes au-delà de 1234,93 K

Au-delà de 1234,93 K les étalonnages par points fixes concernent uniquement les couples thermoélectriques. On trouve le point de congélation du cuivre à 1357,77 K. La technologie de réalisation de ce point fixe est très proche de celle du point fixe de l'indium décrite ci-dessus.

D'autres points fixes reposent sur l'utilisation de métaux nobles, très onéreux (or/1337,3 K, palladium/1827 K, platine/2041 K). Pour des raisons financières, on n'utilise pas de cellules points fixes qui nécessitent de grande quantité de métal. La méthode mise en œuvre est la technique dite « du fil ». En fonction de la température d'étalonnage choisie, un petit fil de l'un des matériaux cités précédemment est soudé aux extrémités des thermoéléments constituant le couple thermoélectrique (figure 7). Le couple est introduit dans un four dont on élève lentement la température. La force électromotrice (f.é.m) délivrée aux bornes du couple est enregistrée en permanence. Lorsque la température atteint la température t_f de fusion du matériau utilisé, celui-ci fond et le circuit électrique est rompu. La dernière force électromotrice mesurée est retenue comme valeur d'étalonnage du couple à la température t_f .

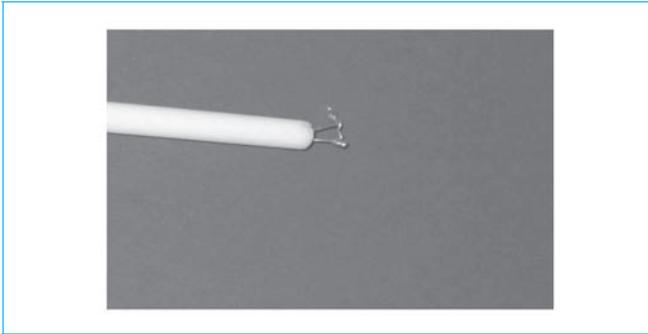


Figure 7 – Étalonnage par la méthode dite du « fil »

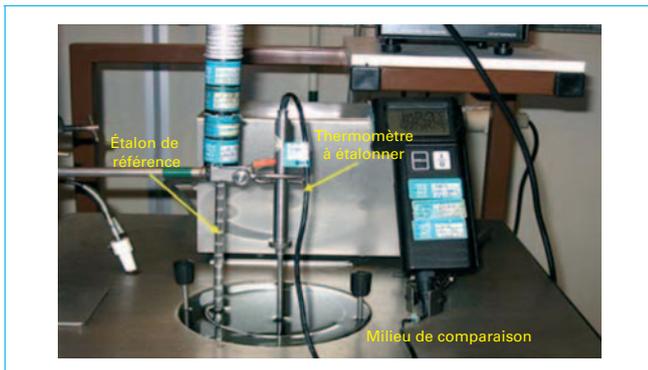


Figure 8 – Étalonnage par comparaison

2.2 Étalonnage par comparaison

L'étalonnage consiste à comparer les indications données par un instrument de mesure aux valeurs fournies par un étalon placé dans le même milieu (figure 8).

Il est évident que, dans cette méthode d'étalonnage, on fait l'hypothèse que le capteur étalon et le capteur en étalonnage sont à la même température.

Cette hypothèse ne sera jamais parfaitement satisfaite. La différence de température dépendra :

- de l'uniformité en température du milieu de comparaison ;
- de la différence de technologies entre les capteurs étalon et en étalonnage (longueur de l'élément sensible, temps de réponse, nature de la gaine...).

Lorsque cela est possible, on aura toujours intérêt à préférer un bain liquide bien agité à un four classique. Les bains et fours peuvent être équipés d'un bloc d'égalisation thermique qui conduira à une amélioration locale de la stabilité et de l'homogénéité thermique. Les fours électriques multi-enroulements présentent une plus grande uniformité en température axiale que les fours mono-enroulement.

Les incertitudes portant sur les résultats des mesurages issus d'un étalonnage par comparaison seront déterminées à partir de trois principales composantes : les composantes liées à l'étalon de référence, les composantes liées au milieu de comparaison (générateur de température), les composantes liées au thermomètre à étalonner.

2.2.1 Étalon de référence

Le thermomètre de référence (incluant un couple thermoélectrique ou une sonde à résistance) est conçu pour l'étalonnage, il doit avoir des caractéristiques métrologiques compatibles avec

celles des thermomètres à étalonner. Lors du choix d'un thermomètre de référence, l'utilisateur devra établir un cahier des charges qui reprendra au minimum les points suivants :

- l'incertitude d'étalonnage souhaitée : résolution de l'indicateur ? reproductibilité ? répétabilité ? dérive ? types de capteurs ?
- le domaine de température : sonde à résistance de platine ? couple thermoélectrique ? thermistance ?
- le milieu d'utilisation : étalonnage des thermomètres dans un milieu liquide ? étalonnage des thermomètres dans l'air ?

Ce cahier des charges conditionnera le choix du thermomètre de référence en termes de qualité et donc de coût. Préalablement à l'étalonnage, le thermomètre de référence devra être caractérisé et ses performances maîtrisées, notamment en ce qui concerne les données techniques fournies par le constructeur :

- **s'il s'agit d'une sonde à résistance** : localisation et dimension de l'élément sensible, autoéchauffement, temps de réponse, courant de mesure préconisé, résistance nominale à 0 °C, choix de la loi de conversion « résistance/température » (EIT-90, norme NF EN 60751, relation de Steinhart-Hart pour les thermistances) ;
- **s'il s'agit d'un couple thermoélectrique** : type de couple thermoélectrique, temps de réponse, utilisation d'un câble de compensation ou d'extension, homogénéité des thermoéléments, type de jonction de référence et câble d'extension le cas échéant.

Ces informations pourront être complétées par des manipulations réalisées lors de l'étalonnage du thermomètre de référence.

Dans tous les cas, il est préférable d'étalonner la chaîne de référence dans son ensemble, l'application des corrections et la composition des incertitudes en seront simplifiées. Dans le cas contraire, chaque élément de la chaîne de mesure (capteur de référence, moyen de mesure électrique, boîte de jonction de référence le cas échéant) devra être étalonné séparément.

2.2.2 Principales composantes d'incertitudes liées au thermomètre de référence

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.

■ Incertitude associée à la dispersion des résultats

Cette composante peut s'exprimer quantitativement à l'aide de l'écart type expérimental sur la moyenne.

■ Incertitude associée à la reproductibilité des résultats

La reproductibilité (étroitesse de l'accord entre les résultats du même mesurage, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure) est estimée en faisant varier les conditions expérimentales. Elle est quantifiée en s'appuyant sur la dispersion des résultats observés et en appliquant une méthode d'évaluation de type A ou de type B (voir paragraphe 1.2).

■ Incertitude type d'étalonnage

Elle est issue de l'incertitude figurant dans le certificat d'étalonnage (CE) de l'étalon. Conventionnellement, cette incertitude est reportée dans le CE sous forme d'incertitude élargie avec un coefficient d'élargissement égal à 2 ($k = 2$).

■ Incertitude type liée à la dérive entre les étalonnages

Pour estimer cette composante, il est nécessaire de disposer de plusieurs certificats d'étalonnage. Dans ce cas, il suffit d'analyser, pour un niveau de température, l'étendue maximale des réponses du thermomètre au cours des différents étalonnages. On considère que la dérive du thermomètre suit une loi de distribution uniforme (appelée également « rectangulaire ») non symétrique, l'étendue ne constituant qu'un demi-intervalle (voir GUM, paragraphe 4.3.7).

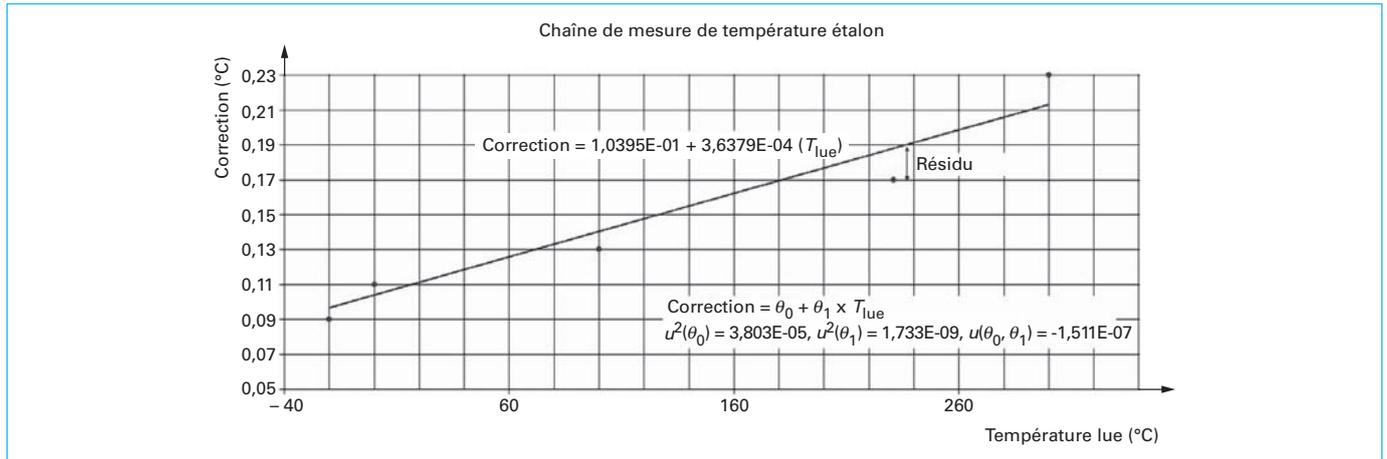


Figure 9 – Interpolation entre les points d'étalonnage : méthode des moindres carrés

Exemple

En 2010, le certificat d'étalonnage indique une correction à apporter aux lectures du thermomètre égale à 0,27 °C à 200 °C. En 2011, cette correction est égale à 0,09 °C pour le même niveau de température. L'incertitude type de dérive est estimée par :

$$u_{\text{dérive}} = \frac{|0,27 - 0,09|}{\sqrt{3}} \approx 0,11 \text{ °C}$$

Si l'utilisateur du thermomètre ne dispose pas d'un historique des étalonnages, il convient de se rapporter soit aux caractéristiques données par le constructeur, soit de rechercher, dans la littérature ou auprès d'autres utilisateurs, une composante de dérive communément admise.

■ Incertitude type liée à l'interpolation entre les points d'étalonnage

Le thermomètre de référence est utilisé sur tout un domaine de température, mais il est seulement raccordé à des températures discrètes, réparties uniformément dans son étendue de mesure. L'interpolation entre les points d'étalonnage engendre donc une incertitude type dont il faut tenir compte. La détermination de cette composante est relativement aisée lorsque le modèle d'interpolation est linéaire (polynôme de régression au sens des moindres carrés), elle devient beaucoup plus compliquée avec des modèles d'ordre supérieur. Le fascicule de documentation FDX 07-028, édité par l'AFNOR, présente une méthode simplifiée pour déterminer cette composante d'incertitude, à partir des résidus (figure 9).

■ Incertitude liée à la résolution de l'indicateur de la chaîne étalon

La résolution d'un instrument (*r*) est considérée comme étant un incrément du nombre sur l'indicateur numérique, dès lors que l'indication ne fluctue pas de plus d'un incrément (voir paragraphe 4.2).

■ Incertitude type liée au type de capteur

L'utilisateur devra prendre en compte les incertitudes types liées au type de capteur utilisé, notamment :

- s'il s'agit d'un **couple thermoélectrique** (par ordre d'importance) :
 - défaut d'homogénéité des thermoéléments,
 - mise en œuvre de la jonction de référence (0 °C),
 - utilisation d'un câble de compensation ou d'extension,

Domaine de température	Générateur de température	Milieu d'échange thermique
- 196 °C	Bain d'azote liquide	Liquide et gazeux
De - 100 °C à 250 °C	Bain d'éthanol Bain d'eau Bain d'huile silicone	Fluide
De - 50 °C à 150 °C	Enceinte climatique	Air
0 °C	Bain de glace fondante	Liquide
De 250 °C à 700 °C	Bain de sels fondus Fours classiques Four à poudre d'alumine fluidisée	Fluide Air et contact Fluide
De 700 °C à 1 500 °C	Fours classiques	Air et contact

- résolution de l'indicateur, si le capteur est associé à un indicateur de température ;
- s'il s'agit d'un **thermomètre à résistance** (par ordre d'importance) :
 - étanchéité de l'élément sensible,
 - fuites thermiques,
 - résolution de l'indicateur et loi de conversion « résistance/ température », si le capteur est associé à un indicateur de température,
 - autoéchauffement, courant de mesure.

2.2.3 Milieu de comparaison

La qualité du milieu de comparaison est déterminante pour accéder aux meilleures incertitudes. Les générateurs de température utilisés pour les étalonnages par comparaison sont classés en fonction du domaine de température. Le tableau 3 présente les principaux générateurs de température.

Quel que soit le générateur de température utilisé, celui-ci devra impérativement être caractérisé. Cette caractérisation consiste à

déterminer l'homogénéité (radiale/axiale) et la stabilité du milieu de comparaison. L'évaluation de la valeur de ces composantes est réalisée à plusieurs températures de consigne judicieusement réparties dans la gamme de travail du bain ou du four. À chaque température, la stabilisation thermique est attendue. Des mesures sont ensuite relevées en plusieurs points géométriques du volume de travail (par exemple : quatre points sur deux plans situés à des profondeurs d'immersion différentes, plus un point central où sera placée la sonde de la chaîne étalon lors de l'opération d'étalonnage).

Stabilité du milieu de comparaison

On caractérisera la stabilité de la température dans le bain de comparaison en effectuant plusieurs relevés de température à l'aide d'un thermomètre présentant une grande stabilité. La durée de relevé des mesures doit être compatible avec la durée d'un cycle de mesure lors de l'opération d'étalonnage et doit tenir compte du fait que les temps de réponse du thermomètre étalon et des capteurs en étalonnage peuvent être notablement différents.

Par **exemple** on effectue un mesurage toutes les dix secondes pendant cinq minutes ; l'écart type expérimental des trente mesurages sera représentatif de l'incertitude type de stabilité.

Homogénéité du milieu de comparaison

L'homogénéité radiale du milieu de comparaison pourra être déterminée à l'aide de la **méthode de la double pesée de Gauss** (figure 10). Cette méthode permet de s'affranchir des erreurs intrinsèques des thermomètres.

Les réponses des deux thermomètres sont relevées dans les configurations suivantes :

- configuration n° 1 : TH1 est dans L1, TH2 est dans L2 ;
- configuration n° 2 : TH2 est dans L1, TH1 est dans L2.

On a :

$$T_1 = R_1(T) \text{ la réponse de TH1 dans L1}$$

$$T_2 = R_2(T) + \varepsilon + \delta \text{ la réponse de TH2 dans L2}$$

$$T_3 = R_2(T) + \delta \text{ la réponse de TH2 dans L1}$$

$$T_4 = R_1(T) + \varepsilon \text{ la réponse de TH1 dans L2}$$

$R_i(T)$ est la réponse du thermomètre i placé à la température T .

$R_i(T) + \varepsilon$ est la réponse du thermomètre i placé à la température $T + \varepsilon$.

ε est l'écart de température entre les deux logements L1 et L2. δ est l'écart des réponses des thermomètres lorsqu'ils sont placés à la même température.

$$(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3) = (R_2(T) + \varepsilon + \delta) - (R_1(T)) + (R_1(T) + \varepsilon) - (R_2(T) + \delta)$$

$$\varepsilon = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}$$

Si on fait l'hypothèse que les températures T_1, T_2, T_3, T_4 sont très corrélées, avec un coefficient de corrélation proche de 1, et que les incertitudes types $u(T_1), u(T_2), u(T_3), u(T_4)$ sont du même ordre de

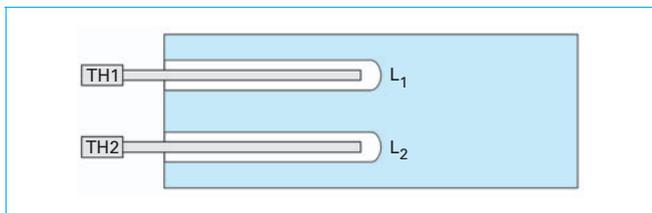


Figure 10 – Détermination de l'homogénéité du générateur

grandeur, alors l'incertitude sur la détermination de l'écart est très faible.

La composante d'incertitude liée aux défauts d'homogénéité en température du volume de travail sera estimée à partir de la valeur maximale de ε observée en testant tous les puits et en considérant une loi de distribution rectangulaire non symétrique :

$$u = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{3}}$$

Pour des informations complémentaires, le lecteur pourra se référer aux documents édités par l'AFNOR : le fascicule de documentation FDX 07-028 pour ce qui concerne les bains de fluide et les fours, et la norme NFX 15-140 pour ce qui concerne les enceintes climatiques.

Les bains de fluides et de liquides pourront être équipés d'un bloc d'égalisation thermique, afin d'améliorer leurs performances en termes de stabilité et d'homogénéité.

Le tableau 4 indique un ordre de grandeur des incertitudes types d'homogénéité et de stabilité.

L'homogénéité axiale devra être également déterminée sur toute la longueur utile du générateur.

La figure 11 présente l'exemple du profil thermique d'un générateur de température utilisé pour l'étalonnage de thermomètres à des températures comprises entre 600 °C et 1 500 °C.

Une nouvelle caractérisation devra être effectuée après chaque intervention susceptible de modifier les caractéristiques thermiques du générateur (résistance de chauffage, régulateur...). Il

Tableau 4 – Incertitude type d'homogénéité / stabilité

Domaine de température	Générateur de température	Incrtitude type d'homogénéité/ stabilité (sans bloc d'égalisation thermique)	Incrtitude type d'homogénéité/ stabilité (avec bloc d'égalisation thermique)
- 196 °C	Bain d'azote liquide	0,020 °C	0,002 °C
De - 100 °C à 250 °C	Bain d'éthanol	De 0,01 °C à 0,050 °C	0,001 °C à 0,005 °C
	Bain d'eau		
	Bain d'huile silicone		
De - 50 °C à 150 °C	Enceinte climatique	0,150 °C (dans un volume de travail de 10 cm ³)	
0 °C	Bain de glace fondante	0,002 °C	
De 250 °C à 700 °C	Bain de sels fondus	0,100 °C	De 0,05 °C à 0,1 °C
	Mini-fours		
	Four à poudre d'alumine fluidisée		
De 700 °C à 1 500 °C	Fours classiques	0,150 °C (homogénéité radiale)	

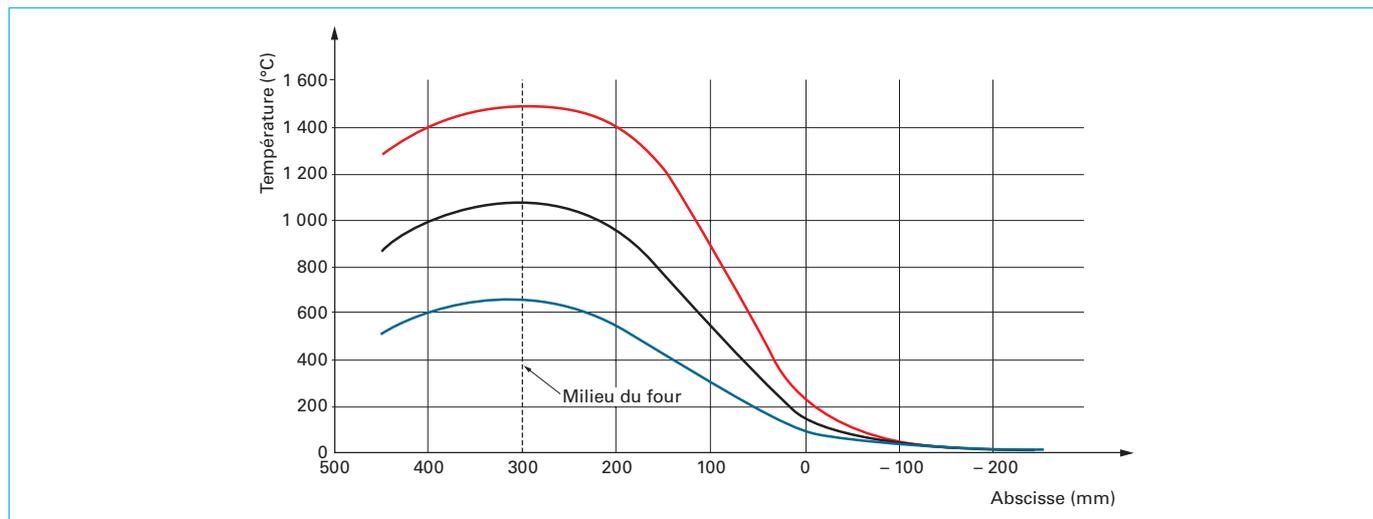


Figure 11 – Profil thermique d'un four d'étalonnage : homogénéité axiale

conviendra également de vérifier périodiquement que les caractéristiques d'homogénéité et de stabilité ne se dégradent pas au cours du temps.

■ Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde étalon

Le thermomètre n'indique que la température à laquelle il se trouve, c'est-à-dire la température propre de l'élément sensible.

Les échanges thermiques qui s'opèrent au niveau de l'élément sensible d'une sonde à résistance de platine sont :

- par conduction, le long des parois ;
- par conduction, le long des câbles et connecteurs ;
- par rayonnement, entre l'élément sensible et la partie haute de la sonde à une température proche de la température du laboratoire ;
- par conduction, de l'élément sensible vers la surface du capteur ;
- par convection, à la surface du capteur vers le milieu ;
- par rayonnement, de la surface du capteur vers le milieu.

Les fuites thermiques dépendent des caractéristiques géométriques du capteur (longueur de l'élément sensible, longueur et diamètre de la gaine, conception...), de la différence de température entre le milieu de comparaison et la température ambiante, du milieu d'échange (air, liquide, position d'étalonnage verticale ou horizontale). Un capteur de longueur 400 mm, de diamètre 6 mm et immergé de 300 mm dans un bain d'huile à 250 °C ne présentera pas de fuite thermique significative, contrairement à un capteur de longueur 150 mm, de diamètre 7 mm, immergé de 100 mm dans le même milieu de comparaison et à la même température.

D'autre part, il ne faut pas oublier qu'une sonde à résistance de platine n'est pas un instrument ponctuel, elle intègre la température sur toute la longueur de l'élément sensible.

Pour quantifier l'incertitude associée à la présence de ces échanges thermiques perturbateurs, il faut modifier les conditions expérimentales. Les opérations suivantes permettront d'accéder à des informations exploitables :

- variation de la profondeur d'immersion : la sonde étalon est déplacée vers le niveau supérieur du liquide sur une distance au moins équivalente à la hauteur de l'élément sensible, c'est-à-dire sur quelques centimètres ;
- modification des conditions d'échange : la partie de la gaine de la sonde qui émerge du liquide est refroidie ou réchauffée à l'aide d'un courant d'air chaud ou froid.

Si des fuites thermiques sont constatées, il conviendra, quand cela est possible, de rechercher la position du capteur pour laquelle sa réponse est indépendante de sa profondeur d'immersion.

3. Fonctions d'interpolation

3.1 Le capteur est une sonde répondant aux critères de l'EIT-90

Le lecteur pourra, s'il le souhaite, se référer à l'article *L'échelle internationale de température : EIT-90* [R 2 510] dans le présent traité.

Dans la gamme allant de 83,8058 K à 1234,93 K la température T_{90} est définie au moyen de sondes étalonnées à différentes séries spécifiées de points fixes de définition (voir paragraphe 2.1) et en utilisant des fonctions de référence et des fonctions écarts spécifiées pour interpoler aux températures intermédiaires.

L'utilisation d'une relation $W(T_{90}) = f(T_{90})$ ayant déjà été justifiée dans l'article *Étalonnage et vérification des thermomètres – Généralités et description d'instruments* [R 2 520] publié dans le présent traité, nous verrons ci-dessous comment on accède à l'expression numérique de la fonction f .

La température est obtenue à partir de la relation suivante :

$$W(T_{90}) = W_r(T_{90}) + \Delta W(T_{90})$$

où $W_r(T_{90})$ est la fonction de référence donnée dans le texte de l'EIT-90.

– De 0 °C à 961 °C :

$$T_{90} - 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2,64}{1,64} \right]^i$$

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90} - 754,15}{481} \right]^i$$

– De 13 K à 273 K :

$$\frac{T_{90}}{273,16} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right]^i$$

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{[\ln(T_{90}/273,16) + 1,5]}{1,5} \right]^i$$

Dans ces expressions, T_{90} est exprimé en kelvin. Les coefficients A_i , B_i , C_i et D_i sont tirés du texte de l'EIT-90.

Entre 83,8058 K et 1234,93 K, l'EIT-90 définit huit domaines de température (tableau 5). Pour chaque domaine, le texte de l'échelle spécifique :

- une fonction écart, dont le degré est d'autant plus important que la gamme de température concernée est étendue ;
- une série de points fixes de définition.

Aux points fixes de définition, l'écart $\Delta W(T_{90})$ est connu directement à partir de l'étalonnage de la sonde à ces points.

■ Dans le domaine allant de 83,8058 K à 273,16 K, la fonction écart est donnée par la relation suivante :

$$\Delta W(T_{90}) = a \cdot [W(T_{90}) - 1] + b \cdot [W(T_{90}) - 1] \cdot \ln W(T_{90}) \quad (1)$$

Les coefficients a et b sont calculés à partir des rapports $W(T_{90})$ mesurés au point triple de l'argon et du mercure.

■ De 273,15 K à 1 234,93 K, l'écart $\Delta W(T_{90})$ est tel que :

$$\Delta W(T_{90}) = a \cdot [W(T_{90}) - 1] + b \cdot [W(T_{90}) - 1]^2 + c \cdot [W(T_{90}) - 1]^3 + d \cdot [W(T_{90}) - W(660,323 \text{ °C})]^2 \quad (2)$$

En fonction de l'étendue du domaine d'étalonnage les coefficients a , b , c et d de la relation (2) peuvent prendre la valeur 0. Le tableau 5 donne la liste des différents domaines de température définis par l'EIT-90 entre 83,8058 K et 1234,93 K, la fonction écart utilisée dans ces domaines et les points fixes de définition permettant de déterminer la valeur des coefficients de ces fonctions.

Tableau 5 – Domaines de température et fonction écart définis par l'EIT-90 entre 83,8058 K et 1 234,93 K

Domaine de température	Fonction écart	Points fixes de définition
83,8058 K à 273,16 K	Relation (1)	Point triple de l'argon Point triple du mercure Point triple de l'eau
234,3156 K à 302,9146 K	Relation (2), $c = d = 0$	Point triple du mercure Point de fusion du gallium Point triple de l'eau
273,15 K à 302,9146 K	Relation (2), $b = c = d = 0$	Point de fusion du gallium Point triple de l'eau
273,15 K à 429,7485 K	Relation (2), $b = c = d = 0$	Point de congélation de l'indium Point triple de l'eau
273,15 K à 505,078 K	Relation (2), $c = d = 0$	Point de congélation de l'indium Point de congélation de l'étain Point triple de l'eau
273,15 K à 692,677 K	Relation (2), $c = d = 0$	Point de congélation de l'étain Point de congélation du zinc Point triple de l'eau
273,15 K à 933,473 K	Relation (2), $d = 0$	Point de congélation de l'aluminium Point de congélation de l'étain Point de congélation du zinc Point triple de l'eau
273,15 K à 1234,93 K	Relation (2)*	Point de congélation de l'argent Point de congélation de l'aluminium Point de congélation de l'étain Point de congélation du zinc Point triple de l'eau

* Pour les températures en-dessous du point de congélation de l'aluminium (933,473 K) $d = 0$. Les valeurs des coefficients a , b et c sont données par les résultats de l'étalonnage aux points de congélation de l'étain (505,078 K), du zinc (692,677 K) et de l'aluminium. Pour les températures se situant au-dessus du point de congélation de l'aluminium, la valeur du coefficient d est obtenue à partir de l'écart $\Delta W(T_{90})$ mesuré au point de congélation de l'argent (1234,93 K). Les coefficients a , b et c sont ceux déterminés précédemment.

3.2 Le capteur est une sonde ne répondant pas aux critères de l'EIT-90

En première approche, on distinguera deux catégories de sondes :

■ **Les sondes à bas coût de fabrication avec un couplage mécanique fort entre le fil de platine et son support.** Dans ce cas il est impossible de s'appuyer sur une fonction d'interpolation type. Il est indispensable de réaliser de nombreux points d'étalonnage dans la gamme de température considérée. On peut ensuite faire passer au mieux une courbe entre ces points en utilisant des instruments mathématiques tels que la méthode des « moindres carrés ». Pour définir le degré de la fonction $\Delta R(T)$ on se rapportera aux recommandations données dans le paragraphe suivant.

■ **Les sondes qui répondent aux critères de la norme NF EN 60751** (pureté du fil connu, pas de contraintes mécaniques fortes). La norme NF EN 60751 donne les relations $R = f(t)$ suivantes :

- Domaine - 200 °C à 0 °C :
 $R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100 \text{ °C}) t^3]$
- Domaine 0 °C à 850 °C :
 $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$

avec R_t résistance à la température t ,
 R_0 résistance à $t = 0 \text{ °C}$.

$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$; $B = - 5,775 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$ et $C = - 4,183 \times 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$

Pour une sonde particulière la relation reliant la résistance mesurée à la température peut s'exprimer sous la forme :

$$R(T) = R_r(T) + \Delta R(T)$$

On utilise comme fonction de référence la fonction et les coefficients consignés dans la norme NF EN 60751. Le nombre de degrés mathématiques de la fonction $\Delta R(T)$ dépend de l'étendue du domaine d'étalonnage et des caractéristiques de la sonde en étalonnage. Dans tous les cas, il est nécessaire de réaliser des points d'étalonnage complémentaires afin de s'assurer que les caractéristiques métrologiques de la sonde sont compatibles avec le modèle d'équation retenu compte tenu des incertitudes d'étalonnage recherchées.

Le nombre de degrés mathématiques de la fonction sera déterminé en tenant compte des incertitudes affectant les mesures. Cette fonction ne doit pas passer nécessairement par les points figurant les résultats de mesure mais elle doit couper les domaines représentant l'intervalle de confiance de chaque point (plage de valeurs au sein de laquelle existe la valeur vraie avec un niveau de confiance donné, généralement 95 %). Un exemple de traitement des données pertinent (a) et de traitement inadapté (b) est proposé figure 12.

3.3 Le capteur est une thermistance

Le lecteur pourra se référer à l'article *Thermistance CTN et autres thermomètres à semi-conducteur* [R 2 580] du présent traité.

La relation $R = f(T)$ est de la forme :

$$R(T) = R(T_0) \times e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$R(T_0)$ est la résistance de la thermistance à T_0 , T et T_0 sont exprimées en kelvin, T_0 est généralement égale à 298,15 K (valeur numérique en degrés Celsius : 25 °C).

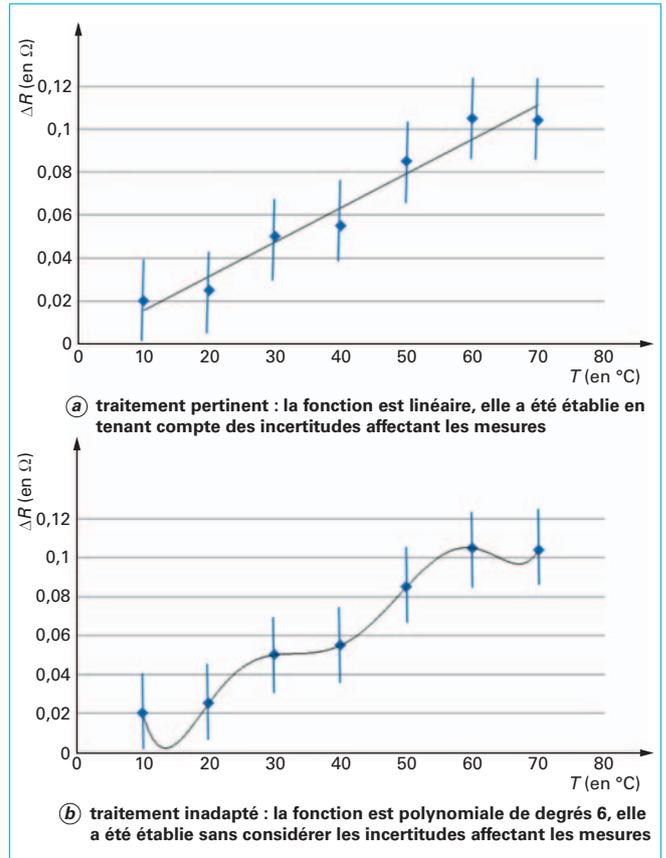


Figure 12 - Exemples de traitement des données

B , exprimé en kelvin, est l'indice de sensibilité thermique. C'est une caractéristique du matériau constituant la thermistance.

À partir de la relation de Steinhart-Hart qui est de la forme :

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C \ln(R)^3$$

l'utilisateur peut calculer les coefficients A , B et C à l'aide de trois équations.

T est la température étalon exprimée en kelvin et R la résistance mesurée à cette température.

3.4 Le capteur est un couple thermoélectrique

Les caractéristiques des couples thermoélectriques sont décrites dans les articles *Couples thermoélectriques - Caractéristiques et mesure de température* [R 2 590] et *Couples thermoélectriques - Données numériques d'emploi* [R 2 594] du présent traité.

La conversion s'effectue suivant la norme NF EN 60584.

Les relations $T = f(E)$ et $E = f(T)$ sont de la forme :

$$E = \sum_{i=1}^n a_i \times (T_{90})^i \quad \text{et} \quad T_{90} = \sum_{i=0}^n d_i \times E^i$$

Comme pour les sondes à résistance de platine industrielles, pour un couple thermoélectrique, la relation reliant la force électromotrice mesurée à la température peut s'exprimer sous la forme :

$$E(T) = E_r(T) + \Delta E(T)$$

On se reportera au paragraphe 3.1.2 pour les recommandations concernant l'établissement de la fonction $\Delta E(T)$.

4. Indicateurs numériques

4.1 Présentation générale

80 % des thermomètres étalonnés sont constitués d'un capteur (couple thermoélectrique, thermomètre à résistance de platine, thermistance...), associé à un multimètre.

Ce multimètre peut être un voltmètre, un ohmmètre, qui intègre une fonction de conversion en température.

La plupart des constructeurs proposent des indicateurs configurables suivant le type de capteur utilisé.

Afin de diminuer les corrections à apporter aux lectures de l'indicateur, de nombreuses procédures de réglage sont proposées. Dans la plupart des cas, ces réglages consistent à :

- effectuer des mesures de résistances à des températures étalons connues ;
- calculer des coefficients suivant des lois de conversions décrites dans des normes, ou dans des documents émis par le BIPM (texte de l'Échelle internationale de température de 1990) ;
- saisir numériquement les coefficients et les résistances dans l'indicateur de température en suivant le mode opératoire fourni par le constructeur.

Exemple : une mesure de la résistance du thermomètre dans un bain de glace fondante (0,00 °C) est effectuée. L'indicateur utilise la fonction « ohmmètre ». Cette valeur est saisie dans l'indicateur numérique. L'indicateur est alors utilisé, avec son mode « température » activé, dans ce même bain de glace fondante. La température lue sur l'indicateur est normalement égale à 0,00 °C (correction nulle).

- L'indicateur de température (figure 13) a plusieurs fonctions :
- acquisition et conversion du signal analogique, délivré par le capteur en signal numérique (CAN) ;
 - conversion « mathématique » du signal numérique en unité de température ;
 - compensation interne de jonction de référence (CSF), lorsque le capteur est un couple thermoélectrique ;
 - génération d'un courant électrique lorsque le capteur est un thermomètre à résistance.

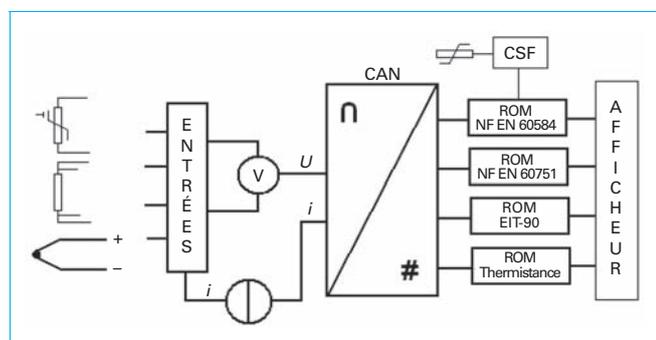


Figure 13 – Schéma d'un indicateur de température

4.2 Acquisition et conversion du signal analogique

La fonction du convertisseur analogique-numérique (CAN) est de générer, à partir d'une valeur analogique, une valeur numérique, codée sur plusieurs bits, proportionnelle à la valeur analogique entrée. Le plus souvent il s'agira de tensions électriques. Plus le nombre de bits est important, plus la résolution sera élevée.

Un multimètre numérique est caractérisé par un nombre de digits, un nombre de points, ou bien le nombre de bits du CAN. Par exemple, un voltmètre 6^{1/2} chiffres dispose de 2 000 000 de points (de 0 000 000 à 1 999 999) pour afficher les mesures ou encore un CAN 21 bits. Ces trois caractéristiques sont équivalentes.

La résolution, pour une gamme donnée, est le rapport de la plus grande valeur affichable à la plus petite valeur affichable. Par exemple : un voltmètre 6^{1/2} (CAN 21 bits), utilisé sur le calibre 2 V, aura une résolution de 1 µV :

$$q = \frac{V_{(\text{calibre})}}{2^n} = \frac{2}{2^{21}} = 1 \mu\text{V}$$

Si q est la résolution de l'indicateur pour un calibre donné, la valeur x lue sur l'indicateur numérique peut se situer entre x - q/2 et x + q/2. L'erreur générée par ce signal est décrite par une loi de probabilité rectangulaire (uniforme) de largeur q (figure 14).

La variance de x est égale à :

$$V(x) = E\{[x - E(x)]^2\} = E(x^2) - [E(x)]^2$$

$$V(x) = \int_{-q/2}^{+q/2} x^2 f(x) dx = \frac{1}{q} \left[\frac{x^3}{3} \right]_{-q/2}^{+q/2} = \frac{q^2}{12}$$

L'incertitude type liée à la résolution de l'indicateur est égale à q/2√3.

4.3 Conversion « mathématique » du signal numérique

4.3.1 Le capteur est un thermomètre à résistance de platine industriel (TRPI)

La relation entre la température et la résistance d'un thermomètre à résistance de platine a été déterminée par Callendar et Van Dusen. Cette équation est de la forme :

$$R_t = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \right] \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3$$

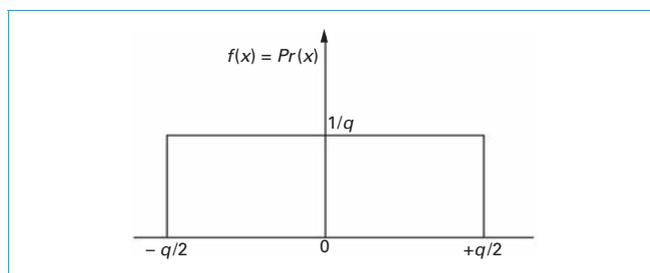


Figure 14 – Loi de probabilité rectangulaire uniforme appliquée à l'estimation de l'incertitude liée à la résolution

Pour une utilisation plus aisée, la norme NF EN 60751 a transformé cette équation en polynôme du deuxième degré (voir paragraphe 3.2).

Avec les égalités suivantes :

$$A = \alpha + \frac{\alpha\delta}{100} \quad B = -\frac{\alpha\delta}{100^2} \quad C = -\frac{\alpha\delta}{100^4}$$

Certains indicateurs de température permettent le choix de la valeur du coefficient de température α en fonction du thermomètre à résistance de platine utilisé. Cette valeur est en général indiquée dans la documentation technique du thermomètre.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \times R_0}$$

$\alpha = 3,851 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, standard européen

$\alpha = 3,926 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, standard américain

$\alpha = 3,911 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, standard industriel américain

Ces coefficients, ainsi que l'algorithme de conversion, sont stockés dans une ROM (*Read Only Memory*).

Lors de l'étalonnage, afin de réduire au maximum les corrections à apporter aux lectures du thermomètre, certains indicateurs de température disposent d'un programme de réglage qui permet :

- la saisie du R_0 ;
- le choix de la valeur de α ;
- la détermination et la saisie des coefficients de Callendar - Van Dusen du thermomètre, à partir des résultats d'étalonnage ($R_0, \alpha, \beta, \delta$, à partir de quatre équations) ;
- l'utilisation des coefficients A, B, C tels qu'ils sont décrits dans la norme NF EN 60751.

4.3.2 Le capteur est un thermomètre à résistance de platine étalon (TRPE) – *Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT)*

Les coefficients, ainsi que l'algorithme de conversion de la fonction de référence, sont stockés dans une ROM. Les coefficients a, b, c et d de la fonction écart sont déterminés lors de l'étalonnage du thermomètre (voir paragraphe 3.1).

Dans le domaine $0 \text{ }^\circ\text{C} - 419 \text{ }^\circ\text{C}$, $c = d = 0$; il suffit donc de calculer a et b à partir de deux équations (étalonnage au point fixe du zinc, au point fixe de l'étain et au point triple de l'eau).

$$W_{Zn} - W_{r Zn} = a.[W_{Zn} - 1] + b.[W_{Zn} - 1]^2$$

$$W_{Sn} - W_{r Sn} = a.[W_{Sn} - 1] + b.[W_{Sn} - 1]^2$$

Afin de réduire au maximum les corrections à apporter aux lectures du thermomètre, les coefficients a et b et la résistance au point triple de l'eau ($R_{0,01^\circ\text{C}}$) seront saisis dans l'indicateur de température.

4.3.3 Le capteur est une thermistance

La relation est de la forme (voir paragraphe 3.3) :

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C \ln(R)^3$$

T étant la température étalon exprimée en kelvin, R étant la résistance mesurée à cette température.

Les coefficients A, B, C peuvent être saisis dans l'indicateur.

4.3.4 Le capteur est un couple thermoélectrique

Pour chaque type de couple thermoélectrique, les coefficients ainsi que l'algorithme de conversion, sont stockés dans une ROM.

Ces polynômes de conversion sont donnés pour une jonction de référence maintenue à $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Afin de s'affranchir d'un bain de glace fondante, des dispositifs de « compensation soudure froide » (CSF) peuvent être activés par configuration de l'indicateur.

Dans la plupart des cas, ces dispositifs sont constitués d'un capteur de température ambiante (thermistance, circuit intégré...). À partir de la température ambiante T_a mesurée, la force électromotrice (f.é.m.) générée par un couple thermoélectrique dont la jonction de référence est maintenue à $0 \text{ }^\circ\text{C}$ et la jonction de mesure à la température T_a est calculée en utilisant la norme NF EN 60584. La f.é.m. ainsi déterminée est ajoutée à la f.é.m. générée par le couple thermoélectrique.

4.4 Génération d'un courant pour les mesures de résistances

Certains indicateurs associent plusieurs fonctions : ohmmètre, voltmètre, indicateur de température.

Si l'on souhaite régler l'indicateur de température afin de réduire les corrections à apporter aux lectures du thermomètre, il est nécessaire d'effectuer, avant l'étalonnage en température, des mesures de résistances, en respectant toutes les précautions attachées à ces mesures.

Il faut donc s'assurer que le courant utilisé pour les mesures de résistances avec la fonction ohmmètre est le même que celui utilisé pour la fonction indicateur de température.

Exemple :

Pour étalonner une chaîne de mesure de température à $0 \text{ }^\circ\text{C}$, une mesure de la résistance de la sonde à résistance de platine industriel associée est effectuée dans un bain de glace fondante. La puissance dissipée dans un thermomètre à résistance de platine (autoéchauffement) est proportionnelle au courant : $P = R I^2$.

Pour limiter l'autoéchauffement, il conviendra d'effectuer les mesures de résistance, sur le calibre $100 \ \Omega$, en utilisant la fonction « *low power* », qui permet de délivrer un courant de 1 mA (tableau 6).

Tableau 6 – Choix du calibre de mesure

Calibre	Courant de mesure	Puissance dissipée	Courant de mesure basse puissance (<i>low power</i>)	Puissance dissipée (LP)
1 Ω	10 mA	100 μW	10 mA	100 μW
10 Ω	10 mA	1 mW	10 mA	1 mW
100 Ω	10 mA	10 mW	1 mA	100 μW
1 k Ω	1 mA	1 mW	100 μA	10 μW
10 k Ω	100 μA	100 μW	10 μA	1 μW

5. Étalonnage de capteurs et thermomètres spécifiques

5.1 Thermomètres à résistance de platine et sondes à résistance de platine

5.1.1 Étalonnage par points fixes

Ce type d'étalonnage est réservé aux sondes à résistance de platine dont les caractéristiques satisfont aux critères spécifiés dans le texte de l'EIT-90. Très peu de laboratoires en France sont en mesure de réaliser des étalonnages selon l'EIT-90. Cette méthode d'étalonnage sera donc traitée succinctement. Le lecteur souhaitant plus d'informations pourra se tourner vers les documents relatifs à l'EIT-90 en libre accès sur le site du BIPM.

5.1.1.1 Incertitudes associées

Avant d'établir un bilan d'incertitude, il est indispensable de prendre connaissance des règles et méthodes développées dans le GUM (*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* ; Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure ; JCGM 100:2008).

L'encadré 1 donne la liste des sources d'incertitude affectant l'étalonnage d'une sonde à résistance de platine dans un point fixe. Cette liste n'est pas exhaustive et doit être complétée en fonction des conditions expérimentales propres à chaque laboratoire. La valeur estimée des composantes d'incertitude étant fonction des conditions de réalisation de chaque point fixe, il est indispensable d'établir des bilans d'incertitudes spécifiques pour chaque point. Les valeurs d'étalonnage étant exprimées en rapport $W(T_{90})$ l'incertitude affectant la mesure de R ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) doit être propagée à tous les points fixes en respectant les règles de propagation des incertitudes définies par le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*.

Encadré 1 – Sources d'incertitude affectant l'étalonnage d'une sonde à résistance de platine dans un point fixe

- Répétabilité de la lecture ;
- Reproductibilité de la lecture ;
- Résolution de l'appareil de mesure de la résistance aux bornes de la sonde ;
- Étalonnage de l'appareil de mesure de la résistance aux bornes de la sonde ;
- Dérive de l'appareil de mesure de la résistance aux bornes de la sonde ;
- Autoéchauffement de la sonde par le courant de mesure ;
- Réalisation locale du point fixe (impact des impuretés éventuelles, composition isotopique, dérive du palier de changement de phase...) ou/et étalonnage de la température matérialisée par la cellule au point fixe ;
- Flux thermiques indésirables.

Lorsqu'on s'intéresse à l'étalonnage d'une sonde sur un domaine de température, il y a lieu de déterminer les incertitudes affectant les coefficients de la fonction écart dans ce domaine à partir des incertitudes associées aux étalonnages à chaque point fixe. On trouvera dans la bibliographie des exemples détaillés de traitement des incertitudes sur un domaine de température de l'EIT-90.

À titre d'exemple, une sonde étalonnée entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans un laboratoire national de métrologie français sera affectée d'une incertitude d'étalonnage comprise entre $0,0003\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ en fonction du niveau de température. Des mises en œuvre simplifiées

Tableau 7 – Exemples de valeurs d'incertitude affectant l'étalonnage d'une chaîne de température au point fixe dans un laboratoire national de métrologie et dans un laboratoire accrédité de haut niveau

Point fixe	Incertitude d'étalonnage dans un laboratoire national de métrologie ($^{\circ}\text{C}$)	Incertitude d'étalonnage dans un laboratoire accrédité de haut niveau ($^{\circ}\text{C}$)
Point triple de l'argon	0,00069	0,0028
Point de congélation de l'indium	0,00070	0,0027
Point de congélation du zinc	0,00110	0,0037

des points fixes conduisent à des incertitudes d'étalonnage légèrement plus élevées satisfaisant néanmoins, à coût moindre, les besoins de l'industrie (tableau 7).

5.1.1.2 Cas particuliers des points fixes utilisés pour contrôler l'évolution dans le temps d'une sonde à résistance de platine

Afin d'assurer la qualité de leurs prestations, de nombreux laboratoires d'étalonnage souhaitent effectuer un contrôle périodique de la stabilité de leur sonde de référence et/ou de travail entre deux raccordements internes ou externes. L'opération la plus judicieuse consiste à placer la sonde à intervalle de temps régulier dans un point fixe de température. Un graphique où on reporte sur l'axe des x la date de la mesure et sur l'axe des y la résistance mesurée permet de détecter toute évolution de la sonde et d'estimer la valeur de la composante d'incertitude associée à l'évolution de la résistance de la sonde dans le temps.

Les points fixes utilisés pour cette fonction particulière sont reportés dans le tableau 8 avec les avantages et les inconvénients liés à leur mise en œuvre.

L'incertitude associée à l'utilisation de ces points fixes est établie à partir des sources d'incertitudes de l'encadré 1.

5.1.2 Étalonnage par comparaison

Cette méthode d'étalonnage concerne essentiellement les capteurs et chaîne de mesure de températures industrielles.

Les sources d'incertitudes peuvent être regroupées en trois groupes :

- les sources d'incertitudes relevant de la chaîne étalon ;
- la source d'incertitudes d'origine thermique ;
- les sources d'incertitudes associées à la chaîne en étalonnage.

Les sources d'incertitudes relevant de la chaîne étalon et du milieu de comparaison ont déjà été explicitées aux paragraphes 2.2.2 et 2.2.3.

Le principe physique de fonctionnement des différents types de capteurs est détaillé dans l'article *Étalonnage et vérification des thermomètres – Généralités et description d'instruments* [R 2 520], publié dans le présent traité. Dans ce chapitre, plusieurs manipulations sont proposées afin d'estimer les composantes d'incertitudes propres à chaque type de capteur. Dans ce cas, les incertitudes types seront déterminées en observant les variations maximales de la réponse du capteur au cours de la manipulation (évaluation de type B, voir paragraphe 2.2), et en considérant que ces variations suivent une loi de distribution uniforme (appelée également

Tableau 8 – Points fixes utilisés pour contrôler la stabilité de la sonde de référence et de travail

Point fixe	Température (°C)	Avantages	Inconvénients
Point de fusion de la glace	0	Peu onéreux	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessite la fabrication de glace à partir d'eau au minimum déminéralisée – Difficultés de réalisation correcte du point fixe – Niveau d'incertitude dépendant de la qualité de l'eau utilisée (voir § 2.1.3)
Point triple de l'eau	0,01	Niveau d'incertitude faible (possible < 1 mK avec un point régulièrement raccordé aux références nationales)	<ul style="list-style-type: none"> – Onéreux – Nécessite un moyen de conservation du point triple (bain liquide, container spécifique...) – Difficultés de réalisation du point fixe (risque de détérioration)
Point de gallium	29,7646	<ul style="list-style-type: none"> – Niveau d'incertitude faible (possible < 2 mK avec un point régulièrement raccordé aux références nationales) – Facilité de mise en œuvre et d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> – Onéreux – Nécessite un générateur de température spécifique (bain liquide, four à air...)

« rectangulaire ») symétrique ou non symétrique. L'incertitude type sera donc calculée de la manière suivante :

- loi uniforme symétrique :

$$\text{incertitude type} = \frac{\text{étendue des variations}}{2\sqrt{3}}$$

- loi uniforme non symétrique :

$$\text{incertitude type} = \frac{\text{étendue des variations}}{\sqrt{3}}$$

La fidélité du thermomètre devra être estimée, quel que soit le type de capteur à étalonner, et plusieurs mesurages dans des conditions de répétabilité devront être effectués. L'incertitude type de répétabilité ainsi déterminée devra être composée à l'incertitude finale. Pour des informations complémentaires, le lecteur pourra se référer au fascicule de documentation FD X 07-028 édité par l'AFNOR.

On retrouvera au niveau de la chaîne en étalonnage des composantes d'incertitude déjà évoquée dans le paragraphe consacré aux composantes d'incertitudes associées à la chaîne étalon (voir § 2.2.2) :

- dispersion des résultats (répétabilité) ;
- reproductibilité de la chaîne étalon ;
- résolution de l'indicateur de la chaîne étalon ;
- flux thermiques parasites affectant la sonde en étalonnage.

La manière d'intégrer la résistance de platine dans la gaine du thermomètre peut avoir une grande influence sur la qualité des mesurages et donc sur l'incertitude d'étalonnage :

- une bonne étanchéité de l'élément sensible va permettre d'éviter la présence d'air humide qui pourrait se condenser sur la résistance aux basses températures ;
- les contraintes mécaniques de l'élément sensible dans la gaine du thermomètre peuvent engendrer une mauvaise reproductibilité du thermomètre ;
- la composition du gaz (air sec, hélium, oxygène) et la pression partielle des différents constituants à l'intérieur de la gaine du thermomètre peuvent avoir une influence sur l'oxydation du platine en fonction de la température et donc sur la reproductibilité du thermomètre à un même niveau de température.

Pour mettre en évidence ces phénomènes, la procédure d'étalonnage pourra prévoir plusieurs mesurages à un même niveau de température, au cours de l'étalonnage.

Exemple : premier mesurage à 0 °C (bain de glace fondante), mesurage à la température la plus élevée, deuxième mesurage à 0 °C, mesurage à la température négative la plus basse, troisième mesurage à 0 °C. Les informations recueillies lors de ce cycle permettront à l'utilisateur final de déterminer une incertitude type de reproductibilité du thermomètre.

■ Incertitude type liée à l'autoéchauffement

La puissance dissipée dans un thermomètre à résistance de platine (autoéchauffement) est proportionnelle au courant : $P = Ri^2$. Cette puissance se dissipe différemment suivant le milieu d'échange (air, liquide) du générateur de température. Il convient donc de donner les informations nécessaires à l'utilisateur final afin qu'il tienne compte, dans son bilan d'incertitudes, de ces phénomènes d'autoéchauffement en fonction des conditions d'utilisation du thermomètre.

Dans le cas de l'étalonnage d'une sonde seule, le certificat d'étalonnage devra mentionner le courant de mesure (ou le calibre de mesure si le capteur, inclus dans une chaîne, est associé à un multimètre), et le milieu d'échange dans lequel le thermomètre a été étalonné.

Dans certains cas, il sera nécessaire d'extrapoler la résistance du thermomètre à courant nul. La figure 15 décrit l'étalonnage d'un thermomètre à résistance de platine à 0 °C, dans un milieu liquide et dans l'air, avec plusieurs courants de mesure.

Le tableau 9 donne un exemple de bilan d'incertitudes correspondant à l'étalonnage d'une chaîne de température par rapport à une chaîne étalon dans un bain liquide à 100 °C.

5.2 Thermomètres à couples thermoélectriques et couples thermoélectriques

5.2.1 Étalonnage par points fixes

Pour la réalisation des points fixes on se rapportera au paragraphe 2.1. L'encadré 2 fournit une liste non exhaustive des sources d'incertitude affectant l'étalonnage d'un couple thermoélectrique dans un point fixe de température raccordé par ailleurs aux références nationales.

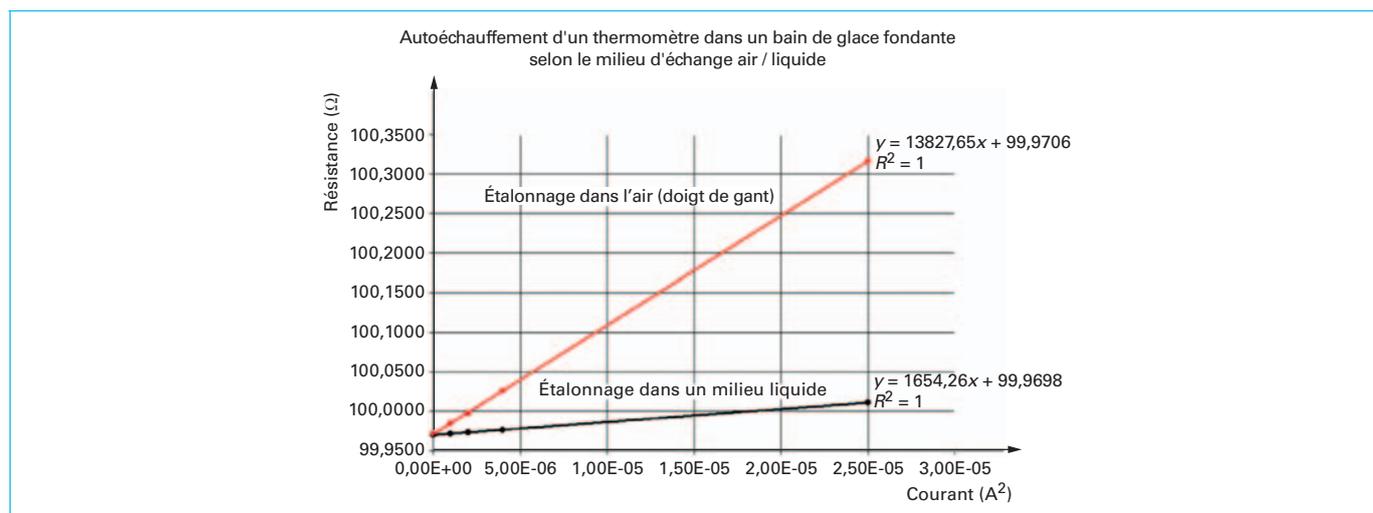


Figure 15 – Autoéchauffement d'un thermomètre à résistance de platine

Tableau 9 – Bilan d'incertitudes – Étalonnage par comparaison d'une chaîne intégrant une sonde à résistance de platine par rapport à une chaîne étalon dans un bain liquide à 100 °C

Composantes d'incertitude	u_i (en °C)
Chaîne étalon	
Dispersion des résultats (répétabilité)	0,010
Incertitude d'étalonnage	0,010
Incertitude liée à la dérive entre deux raccordements	0,020
Incertitude liée à la reproductibilité	0,010
Incertitude liée à la résolution	0,003
Incertitude sur l'interpolation linéaire sur la correction à appliquer entre deux points d'étalonnage	0,005
Origine thermique	
Incertitude liée à l'homogénéité en température du milieu de comparaison	0,015
Incertitude liée à la stabilité en température du milieu de comparaison	0,010
Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde étalon	0,005
Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde à étalonner	0,005
Chaîne à étalonner	
Dispersion des résultats (répétabilité)	0,020
Incertitude liée à la reproductibilité	0,020
Incertitude liée à la résolution	0,003
Incertitude liée à l'autoéchauffement dans les conditions d'étalonnage	0,003
Incertitude type composée	0,044
Incertitude élargie ($k = 2$)	0,088

Encadré 2 – Sources d'incertitude affectant l'étalonnage d'un couple thermoélectrique dans un point fixe

- Répétabilité de la lecture ;
- Reproductibilité de la lecture ;
- Résolution de l'appareil de mesure de la f.é.m. aux bornes du couple ;
- Étalonnage de l'appareil de mesure de la résistance f.é.m. aux bornes du couple ;
- Dérive de l'appareil de mesure de la résistance f.é.m. aux bornes du couple ;
- Hétérogénéités présentées par le couple en étalonnage (voir § 5.2.2) ;
- Adjonction d'un câble de compensation ou d'extension ;
- Incertitude liée à la température de la jonction froide ;
- Connectique (utilisation d'un scanner par exemple) ;
- Réalisation locale du point fixe (impact des impuretés éventuelles, composition isotopique, dérive du palier de changement de phase...) ou/et étalonnage de la température matérialisée par la cellule au point fixe ;
- Flux thermiques indésirables.

5.2.2 Étalonnage par comparaison

■ Localisation des hétérogénéités

Il est important de rappeler les deux conditions nécessaires à la génération d'une force électromotrice :

- la présence de deux métaux de nature différente ;
- la présence d'un gradient de température.

Ces deux conditions sont à l'origine de la principale composante d'incertitude liée à l'utilisation des couples thermoélectriques. La force électromotrice (f.é.m.) est en fait « générée » sur toute la longueur des fils et si l'un des fils (ou les deux) du couple thermoélectrique n'est pas parfaitement homogène dans sa structure métallique, une force électromotrice « parasite » sera générée en présence d'un gradient de température. Il est donc indispensable de localiser ces éventuels défauts d'homogénéité afin d'éviter de les placer dans un gradient de température.

Cette manipulation (figure 16) peut être réalisée à l'aide d'une source de chaleur ponctuelle (canon à chaleur). En maintenant la jonction de mesure et la jonction de référence à température constante, l'opérateur déplacera cette source de chaleur sur toute la longueur du couple thermoélectrique. Les variations de f.é.m. observées localiseront les zones hétérogènes du couple thermoélectrique.

La figure 17 montre le défaut d'homogénéité d'un couple thermoélectrique situé à environ 300 mm de la jonction de mesure. Cette zone hétérogène ne devra pas être placée dans un gradient de température lors de l'étalonnage.

Préalablement à l'étalonnage d'un couple thermoélectrique, l'opérateur devra donc s'informer, auprès de l'utilisateur, des conditions d'utilisation du capteur, afin de déterminer l'immersion du thermomètre lors de l'étalonnage.

■ Incertitude liée à la présence d'hétérogénéités

La méthode proposée précédemment est qualitative, elle ne permet pas de quantifier les défauts d'homogénéité. Pour estimer expérimentalement cette composante d'incertitude, une méthode consiste à modifier de quelques centimètres la profondeur d'immersion du couple thermoélectrique à étalonner et du couple thermoélectrique étalon à la température la plus élevée (le couple thermoélectrique étalon devra être exempt de défaut d'homogénéité).

La variation des réponses du couple thermoélectrique à étalonner est utilisée pour quantifier à la fois la composante d'incertitude liée aux hétérogénéités et celle associée aux éventuelles fuites thermiques.

■ Incertitude type liée à la jonction de référence du couple thermoélectrique

Si le couple thermoélectrique n'est pas associé à un indicateur de température avec compensation de soudure froide (CSF) active, le dispositif utilisé pour réaliser la jonction de référence devra être caractérisé (glace fondante) ou étalonné (boîtier de jonction de référence). Il conviendra d'appliquer les éventuelles corrections et l'incertitude type d'étalonnage devra être composée aux autres composantes d'incertitudes de la chaîne de mesure.

■ Incertitude type liée à l'utilisation d'un câble de compensation ou d'extension

Les câbles de compensation et d'extension utilisés pour l'étalonnage des couples thermoélectriques devront être étalonnés dans des conditions thermiques proches des conditions de leur utilisation. Il conviendra, éventuellement, d'appliquer les corrections nécessaires pour ramener leurs relations $f.é.m./température$ à celle d'un couple normalisé. L'incertitude type associée à cet étalonnage devra être introduite dans le bilan d'incertitudes. Si le laboratoire choisit de ne pas appliquer de correction, il ne devra pas oublier

que sa non-prise en compte implique d'ajouter linéairement la valeur de cette correction à l'incertitude élargie pour obtenir l'incertitude finale. Il est souhaitable que le certificat d'étalonnage mette en garde l'utilisateur sur la nécessité d'utiliser un câble de compensation étalonné.

Le tableau 10 donne un exemple de bilan d'incertitudes affectant l'étalonnage d'un couple thermoélectrique à 800 °C. L'étalonnage est réalisé dans un four multi-enroulement, équipé d'un bloc d'égalisation thermique ; la chaîne étalon intègre un couple type S et la chaîne en étalonnage un couple type K.

5.3 Thermomètres à dilatation de liquide

Les thermomètres à dilatation de liquide (TDL) doivent être visuellement vérifiés avant tout étalonnage pour déceler d'éventuels défauts tels que :

- fêlures dans le réservoir ou la tige ;
- liquide restant dans la chambre d'expansion ;
- discontinuité dans la colonne de liquide.

La reproductibilité d'un TDL sera évaluée en le plaçant périodiquement dans un bain de glace fondante. Cette opération sera réalisée en début du cycle d'étalonnage et régulièrement pendant le cycle, en particulier après avoir réalisé la mesure à la température la plus élevée du domaine concerné. La reproductibilité du TDL sera estimée à partir des variations de lecture observées.

■ Correction de colonne émergente du thermomètre et incertitude associée

Un thermomètre à immersion totale doit être positionné dans le milieu de comparaison de telle manière que le niveau du liquide thermométrique coïncide avec le niveau supérieur de ce milieu ; il

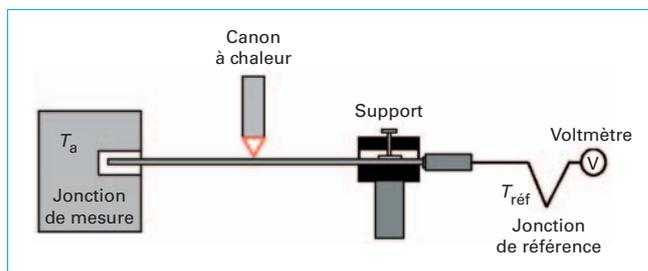


Figure 16 - Détection des défauts d'homogénéité d'un couple thermoélectrique

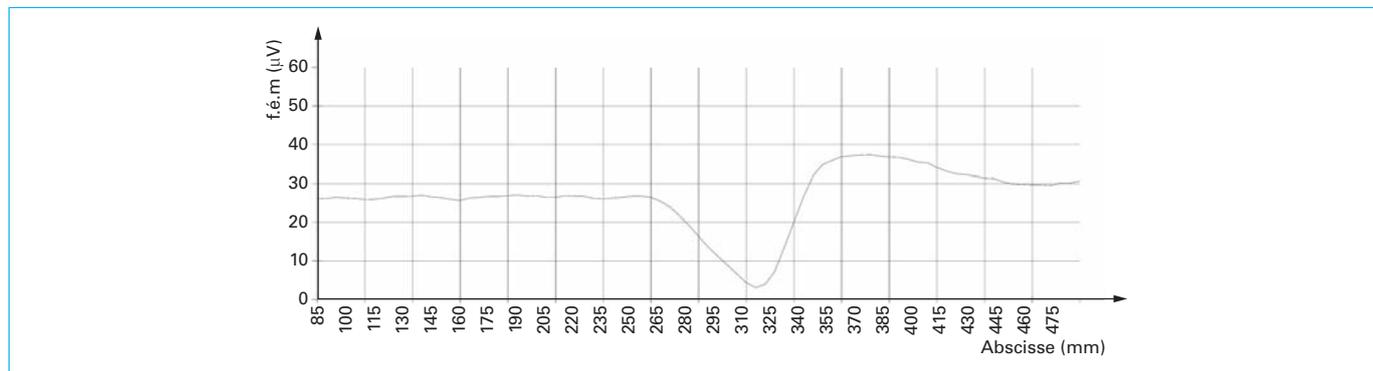


Figure 17 - Localisation des hétérogénéités : variation de la f.é.m. du couple thermoélectrique

Tableau 10 – Bilan d'incertitudes ; étalonnage d'une chaîne de température intégrant un couple thermoélectrique type K à 800 °C et une compensation interne de jonction froide dans un four multi-enroulement

Composantes d'incertitude	u_i (en °C)
Chaîne étalon	
Dispersion des résultats (répétabilité)	0,06
Incertitude d'étalonnage	0,05
Incertitude liée à la dérive entre deux raccords	0,20
Incertitude liée à la reproductibilité	0,10
Incertitude liée à la résolution	0,01
Incertitude liée aux hétérogénéités présentées par le couple étalon	0,20
Incertitude liée aux f.é.m. parasites affectant la mesure aux bornes du couple étalon et à l'utilisation du câble de compensation	0,05
Incertitude sur l'interpolation linéaire sur la correction à appliquer entre deux points d'étalonnage	0,10
Incertitude liée à la température de la jonction de référence (point de glace fondante)	0,01
Origine thermique	
Incertitude liée à l'homogénéité en température du milieu de comparaison	0,20
Incertitude liée à la stabilité en température du milieu de comparaison	0,20
Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde étalon	0,10
Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde à étalonner	0,10
Chaîne à étalonner	
Dispersion des résultats (répétabilité)	0,10
Incertitude liée à la reproductibilité	0,10
Incertitude liée à la résolution	0,10
Incertitude liée aux hétérogénéités présentées par le couple en étalonnage	0,30
Incertitude liée à la température de la jonction froide (compensation électronique)	0,05
Incertitude type composée	0,58
Incertitude élargie ($k = 2$)	1,16

est donc préférable de disposer d'un bain à débordement (figure 18) qui facilite la visée du niveau supérieur de la colonne de liquide.

Afin d'éviter de commettre une erreur de parallaxe, la lecture doit être faite dans un plan perpendiculaire au capillaire du thermomètre. Pour augmenter la résolution de la lecture, on peut utiliser une lunette de visée.

Lorsque le thermomètre est étalonné à immersion totale (degré lu), afin de pouvoir effectuer les lectures du thermomètre, il faudra tenir compte qu'une faible partie (quelques millimètres) de la colonne émergente du liquide thermométrique se situe au-dessus

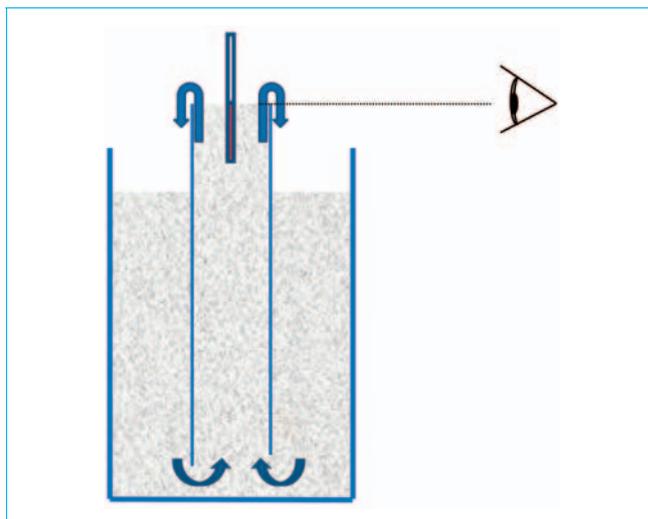


Figure 18 – Schéma de principe d'un bain à débordement

Tableau 11 – Valeur du coefficient de dilatation volumique apparente du liquide thermométrique dans le verre

Liquide	Valeur de α (°C ⁻¹)
Pentane	0,0015
Alcool éthylique	0,0010
Toluène	0,0010
Mercure	0,00016
Mercure-thallium	
Mercure-gallium	

de l'interface liquide/air du bain d'étalonnage. L'incertitude type correspondante, difficilement estimable, pourra être considérée comme étant équivalente à l'incertitude type d'interpolation.

Lorsque le bain ne permet pas une immersion totale, une correction de colonne émergente devra être appliquée et l'incertitude type correspondante devra être composée à l'incertitude finale. Cette correction de colonne émergente $\Delta\theta$ est déterminée de la manière suivante :

$$\Delta\theta = \alpha \cdot (t_l - t_m) \cdot (t_l - t_e)$$

avec α coefficient de dilatation volumique apparente du liquide thermométrique dans le verre. Ce coefficient dépend de la nature du liquide et du type de verre utilisé. Les valeurs de α pour différents liquides thermométriques dans du verre sont présentés dans le tableau 11,

- t_l température lue,
- t_m température moyenne de la colonne émergente,
- t_e température gravée sur le thermomètre au niveau où il émerge du bain.

Cette correction est donc proportionnelle au coefficient de dilatation apparent, au nombre de degrés émergés du thermomètre et à la différence de température entre le bain et la colonne émergente.

La température moyenne de la tige émergente peut être mesurée en utilisant :

- un thermomètre « Faden », c'est-à-dire un thermomètre à réservoir allongé ;
- plusieurs petits TDL auxiliaires, suspendus près de la colonne émergente. Cette solution est moins satisfaisante car on ne peut accéder qu'à une approximation de la température de la colonne émergente.

La correction calculée est affectée d'une incertitude provenant pour l'essentiel de la méconnaissance de la température de la colonne émergente.

Lorsque le thermomètre est étalonné à une immersion fixée, le certificat d'étalonnage devra mentionner la température moyenne de la colonne émergente pour permettre à l'utilisateur final d'appliquer, si nécessaire, une correction et d'estimer l'incertitude correspondante. Une manipulation peut être réalisée pour estimer l'incertitude liée à la colonne émergente. Celle-ci consiste à comparer les réponses du thermomètre à immersion totale et à immersion fixée.

■ Incertitude type liée à la lecture du thermomètre

La qualité de l'interpolation entre les divisions d'un thermomètre à dilatation dépend de la qualité de la gravure de la tige en verre, de l'utilisation d'une lunette de visée, de l'acuité visuelle de l'opérateur.

Selon les cas, l'interpolation entre les graduations pourra être égale à 1/2, 1/5, voire 1/10 de division. L'incertitude type correspondante sera calculée de la même manière (loi de distribution uniforme) que l'incertitude type de résolution d'un indicateur numérique.

■ Incertitude type liée à la dilatation du verre de la tige du thermomètre

Le phénomène physique appelé « **dépression du zéro** » est une modification de la masse volumique du verre. Lorsque le thermomètre est soumis à des changements de température, il y a un réarrangement cristallin du verre qui produit une variation du volume du réservoir de liquide et peut impliquer une erreur sur toute l'échelle.

Pour mettre en évidence ce phénomène, la procédure d'étalonnage pourra prévoir plusieurs mesurages à 0 °C, au cours de l'étalonnage. Les informations recueillies lors de ce cycle permettront à l'utilisateur final de déterminer une incertitude type correspondant à la dépression du zéro.

■ Flux de chaleur parasites affectant l'étalon

L'immersion possible des TDL peut être très faible (immersion < 50 mm) ; dans ce cas, il est préférable que les thermomètres étalons soient des sondes à résistance de platine soudées.

Le tableau 12 présente un bilan d'incertitudes associé à l'étalonnage d'un thermomètre à mercure à immersion totale dans un bain à débordement à 50 °C. La chaîne étalon est la même que celle utilisée dans l'exemple précédent (tableau 9). Néanmoins, l'immersion de la sonde étalon étant plus faible dans ces conditions d'étalonnage, l'incertitude liée aux flux thermiques parasites est plus élevée. Afin de rendre possible la lecture, la position du TDL est telle qu'il existe une colonne émergente ($n = 5$ °C). L'opérateur n'a pas choisi d'appliquer une correction de colonne émergente car celle-ci est très faible (0,01 °C). Dans le cas d'une correction non appliquée, la valeur de cette correction s'ajoute linéairement à l'incertitude élargie pour obtenir l'incertitude finale (voir tableau 12).

Tableau 12 – Bilan d'incertitudes associé à l'étalonnage d'un thermomètre à mercure à immersion totale dans un bain à débordement à 50 °C

Composantes d'incertitude	u_i (en °C)
Chaîne étalon	
Dispersion des résultats (répétabilité)	0,010
Incertitude d'étalonnage	0,010
Incertitude liée à la dérive entre deux raccordements	0,020
Incertitude liée à la reproductibilité	0,010
Incertitude liée à la résolution	0,003
Incertitude sur l'interpolation linéaire sur la correction à appliquer entre deux points d'étalonnage	0,005
Origine thermique	
Incertitude liée à l'homogénéité en température du milieu de comparaison	0,015
Incertitude liée à la stabilité en température du milieu de comparaison	0,010
Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde étalon	0,005
Incertitude liée aux flux thermiques parasites affectant la sonde à étalonner	0,005
Thermomètre à étalonner	
Dispersion des résultats (répétabilité)	0,100
Incertitude liée à la lecture	0,110
Incertitude liée à la reproductibilité	0,110
Incertitude liée à la reproductibilité du thermomètre à mercure à 0 °C	0,150
Incertitude sur la correction de colonne émergente	0,005
Incertitude type composée	
Correction de colonne émergente non appliquée ajoutée linéairement	0,010
Incertitude type composée finale	
Incertitude élargie ($k = 2$)	
	0,54

5.4 Thermistance

Il est recommandé que le courant de mesure traversant une thermistance soit suffisamment faible pour que son autoéchauffement soit négligeable. Par exemple, selon la résistance présentée par la thermistance, l'utilisation d'un courant de 1 mA peut conduire à une erreur allant jusqu'à 0,3 °C sur la détermination de la relation *résistance-température*. Un courant de quelques microampères est généralement le plus adapté dans ce cas. Dans 90 % des cas, un

capteur à thermistance est associé à un indicateur de température ; dans ce cas, le courant qui la traverse est généralement suffisamment faible pour ne pas créer un autoéchauffement excessif lorsque l'étalonnage est réalisé dans un milieu liquide. Avant d'entreprendre l'étalonnage, l'opérateur devra s'assurer que la thermistance sera bien utilisée par la suite dans le même type de milieu, l'autoéchauffement dans un liquide et dans l'air pouvant être notablement différent.

Si la thermistance n'est pas intégrée à une chaîne de mesure de température, elle doit être raccordée à un multimètre délivrant un courant électrique adapté. La valeur du courant de mesure doit être reportée dans le certificat d'étalonnage et l'utilisateur mis en garde contre l'application d'un courant plus élevé dans ces conditions expérimentales.

Comme pour les thermomètres à résistance de platine, les composantes d'incertitude liées aux éventuelles fuites thermiques et à la reproductibilité du thermomètre seront à prendre en compte.

5.5 Capteurs autonomes

Lors de l'étalonnage, la température est enregistrée dans une mémoire du thermomètre, cette mémoire est ensuite lue sur le circuit maître (PC). Il faut donc s'assurer de la fréquence et du temps d'acquisition afin de faire correspondre la température étalon et la température enregistrée dans la mémoire du capteur autonome.

Plusieurs capteurs peuvent être connectés sur le circuit maître, l'adresse physique de chaque capteur doit être absolument maîtrisée et tracée.

Ces capteurs sont utilisés pour mesurer la température de l'air (pièce climatisée, réfrigérateur, caisson réfrigéré...), l'étalonnage doit être réalisé dans un milieu d'échange identique, idéalement dans une enceinte climatique caractérisée (norme NF X 15-140).

Il conviendra de préciser, dans le certificat, que l'étalonnage en température ne donne aucune information sur la qualité de l'horloge interne, ni sur son exactitude.

La composante d'incertitude de résolution est prépondérante, elle doit être maîtrisée.

La position du capteur au sein de la pastille n'est généralement pas connue. Il conviendra de considérer l'ensemble de la pastille comme un capteur.

De par leur conception, ces instruments peuvent présenter une constante de temps relativement longue et donc masquer des oscillations rapides de la température.

Chaque fois que cela est possible, il conviendra de se procurer une documentation complète du capteur autonome. Cette documentation décrit :

- le domaine de température ;
- la configuration de la résolution ;
- la fréquence et le temps d'acquisition ;
- le type de capteur utilisé (transistor, diode, quartz...).

Les capteurs autonomes doivent être considérés comme des chaînes de mesure de température. Les composantes d'incertitude liées au milieu de comparaison (enceinte climatique), au thermomètre étalon (étalonnage, dérive entre deux étalonnages, interpolation...), à la résolution des thermomètres, à la répétabilité, seront déterminées de la même manière que celles décrites dans les paragraphes 2.2.2 et 2.2.3 de ce document.

6. Rédaction et utilisation des certificats d'étalonnage

Lorsqu'on réalise un étalonnage, il est souhaitable d'établir une feuille de mesure à usage interne qui permettra d'assurer la traçabilité des mesures. Sur cette feuille de mesure il est nécessaire de reporter les informations suivantes :

- identification du demandeur ;
- identification de la chaîne de mesure ou du capteur à étalonner ;
- date des mesures ;
- nom de l'opérateur ;
- méthode d'étalonnage utilisée ;
- matériel utilisé (étalon de température, bain, four, éventuellement multimètre, scanner...) ;
- immersion des capteurs étalon et à étalonner ;
- résultats bruts de mesure.

Cette feuille de mesure sera utilisée pour rédiger le certificat d'étalonnage en respect avec la norme FD X 07-012 ; il reprendra les mêmes informations. En fonction du type de capteur étalonné, il est souhaitable que le certificat intègre des informations complémentaires :

- sonde à résistance de platine et thermistance étalonnées seules : courant de mesure ;
- couple thermoélectrique seul ou intégré dans une chaîne : profil de température dans le four d'étalonnage ;
- thermomètre à dilatation de liquide : température de la colonne émergente pour les thermomètres à dilatation de liquide à immersion partielle et spécifiée, longueur de la colonne émergente sauf pour les thermomètres à immersion complète et à immersion spécifiée.

La nature du milieu d'étalonnage (air, eau...) devra également être indiquée dans le certificat d'étalonnage.

Les résultats de mesure seront reportés, accompagnés des incertitudes associées.

Le certificat d'étalonnage d'un instrument de mesure est un document essentiel pour son utilisateur à qui il procure une connaissance des caractéristiques métrologiques de cet instrument. La diffusion de ce document ne doit pas se restreindre aux personnes concernées par le système qualité de l'entreprise mais être à la disposition de l'utilisateur. Celui-ci doit prendre connaissance de la totalité des informations contenues dans le certificat d'étalonnage. Si les conditions d'utilisation sont significativement différentes des conditions d'étalonnage, une composante d'incertitude supplémentaire devra être prise en compte. Elle sera estimée en fonction des paramètres d'influence concernés (nature du milieu, courante de mesure...).

7. Conclusion

Toute personne qui étalonne ou qui utilise un capteur de température ne doit jamais oublier que :

- l'information délivrée par ce capteur 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 ;

- 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.

Avant l'étalonnage, il est bon de prendre connaissance de la nature du capteur. Un couple thermoélectrique et une thermistance gainée métallique peuvent présenter des aspects extérieurs proches. Néanmoins, les technologies mises en œuvre sont très différentes. Lors de l'opération d'étalonnage, il faudra respecter les précautions adaptées à chacun de ces capteurs.

L'industriel qui souhaite faire étalonner une chaîne thermométrique ou un capteur de température devra toujours s'assurer qu'il y a cohérence entre :

- l'incertitude finale recherchée ;

- la nature du capteur à étalonner ;
- les conditions d'environnement du capteur dans son site d'utilisation ;
- la procédure d'étalonnage mise en œuvre ;
- le nombre de points d'étalonnage effectués ;
- la fonction d'interpolation utilisée.

Le bilan d'incertitude affectant l'étalonnage devra être établi en tenant compte des propriétés métrologiques du capteur en étalonnage, sans oublier l'impact que celui-ci peut avoir sur les caractéristiques thermiques du milieu de comparaison.

On accédera toujours à une incertitude plus faible en faisant étalonner une chaîne de température dans son ensemble plutôt que de traiter séparément les éléments la constituant.

Enfin, il faut garder à l'esprit que le capteur le plus cher associé à la procédure d'étalonnage la plus sophistiquée ne constituent pas forcément la meilleure réponse aux besoins de l'utilisateur.



Étalonnage et vérification des thermomètres

Techniques d'étalonnage

par **Eliane RENAOT**

Ingénieur

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

et **Dominique JOUIN**

Ingénieur

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

Sources bibliographiques

CHIRON (Ed.). – *Monographie BNM N° 14, Techniques simplifiées permettant d'approcher l'Échelle Internationale de Température de 1990*. Paris (1991).

CHIRON (Ed.). – *Monographie BNM N° 17, Compléments d'information à l'Échelle Internationale de température de 1990*. Paris (1998).

ROBIN (Ed.) et BENTLEY (E.). – *Handbook Temperature Measurement*. Volumes 1-3, (1998).

NICHOLAS (J.V.), WHITE (D.R.) et WILEY (Ed.). – *Traceable Temperatures : An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*. 2nd Edition, ISBN : 978-0-471-49291-7 (2001).

CHARKI (A.), LOUVEL (D.), RENAOT (E.), MICHEL (A.) et TIPLICA (T.). – *Incertitude de mesure : applications concrètes pour les étalonnages*. Tome 1, Chapitre 1 « Étalonnage par

comparaison de capteurs de température entre – 80 °C et 1 600 °C », Ed. EDP Sciences, ISBN 978-2-7598-0594-5 (2011).

RENAOT (E.), ELGOURDOU (M.) et BONNIER (G.). – *Mise en place de l'EIT (suite) entre 0 °C et 419,527 °C*. Bulletin du BNM N° 90, p. 23-32.

À lire également dans nos bases

SADLI (M.). – *L'échelle internationale de température (EIT-90)*. [R 2 510], base Mesures physiques (2006).

BONNIER (G.) et DEVIN (E.). – *Couples thermoélectriques – Caractéristiques et mesure de température*. [R 2 590], base Mesures physiques (1997).

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

BONNIER (G.) et RONSIN (H.). – *Thermistance CTN et autres thermomètres à semi-conducteur*. [R 2 580], base Mesures et contrôle (1991).

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 Archives Génie énergétique (1999).

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

AUTRAN (J.-M.). – *Thermomètre à résistance métallique*. [R 2 570], base Mesures et Contrôle (1985).

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).

JOUIN (D.) et RENAOT (E.). – *Étalonnage et vérification des thermomètres – Généralités et descriptive d'instruments*. [R 2 520v2], base Mesures physiques (2012).

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>

Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (JCGM 200:2008), disponible sur le site web du BIPM :

<http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>

Vocabulaire international de métrologie – Concept fondamentaux et généraux et termes associés (JCGM 200:2008), disponible sur le site web du BIPM :

<http://www.bipm.org/fr/publications/guides/vim.html>

Normes et standards

AFNOR					
FD X07-007	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.	NF B 35-504			Thermomètre de précision, à échelle protégée, type long.
		NF B 35-505			Thermomètre de précision, à échelle protégée, type court.
		NF B 35-506			Thermomètre sur tige d'usage général.
FDX07-011	Métrologie – Essais – Métrologie dans l'entreprise – Constat de vérification des moyens de mesure.	NF B 35-508			Thermomètre à échelle protégée d'usage général.
		NF B 35-509			Thermomètre sur tige pour calorimètre.
FDX07-012	Métrologie – Métrologie dans l'entreprise – Certificat d'étalonnage des moyens de mesure. Constat de vérification des moyens de mesure.	NF B 35-509			Thermomètre sur tige pour calorimètre à échelle protégée.
		NF C42-323			Appareils de mesurage électrique – Identification des couples thermoélectriques.
NF ENV 13005	Guide pour l'expression de l'incertitude (indice de classement X07-020).	NF EN 50112			Mesure, commande, régulation – Capteurs électriques de température – Tubes protecteurs métalliques pour assemblage de couples thermoélectriques.
NF X 07-001	Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de Métrologie.	NF EN 50113			Mesure, commande, régulation – Capteurs électriques de température – Tubes isolants pour couples thermoélectriques.
FD X 07-028	Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – estimation des incertitudes sur les mesures de température.	NF EN 50212			Connecteurs pour couples thermoélectriques.
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.	NF EN 61515			Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dit « chemisés ».
		NF X 15-140			Mesure de l'humidité de l'air – Enceintes climatiques et thermostatiques – Caractérisation et vérification.
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.	CEI			
		CEI 60751	2008		Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine (publié par l'AFNOR).
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.	CEI 60068-3-5	2002		Essais d'environnement – partie 3-5 : documentation d'accompagnement et guide – Confirmation des performances des chambres d'essais en température.
NF EN 60751	(2008) Thermomètres à résistance de platine industriels et capteurs thermométriques en platine.	CEI 60068-3-6	2002		Essais d'environnement – partie 3-6 : documentation d'accompagnement et guide – Confirmation des performances des chambres d'essais en température et humidité.
NF C42-324	Câbles d'extension et de compensation pour couples thermoélectriques – Composition, nature des matériaux, essais de fabrication.	CEI 60068-3-11	2007		Essais d'environnement – partie 3-11 : documentation d'accompagnement et guide – Calcul de l'incertitude des conditions en chambres d'essais climatiques.
NF EN 60584-1	Couples thermoélectriques – Partie 1 : tables de référence.	ISO/CEI GUIDE 98-1	2009		Incertitude de mesure – Partie 1 : introduction à l'expression de l'incertitude de mesure (publié par l'AFNOR).
NF EN 60584-2	Couples thermoélectriques – Partie 2 : tolérances.	ISO/CEI GUIDE 98-3	2008		Incertitude de mesure – Partie 3 : guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995) (publié par l'AFNOR).
NF EN 62460	Tableaux température – Force électromotrice (E.E.M) pour les combinaisons de couples thermoélectriques à éléments purs.	Guides EURAMET			
FD X 07-013	Critères de choix entre vérification et étalonnage, utilisation et conservation des résultats de mesure.	July 2007			Calibration of Thermocouples, EURAMET/cg-08/v.01, Previously EA-10/08.
NF X 07-015	Métrologie – Essais – Métrologie dans l'entreprise – Raccordement des résultats de mesure aux étalons.	July 2007			Guidelines on the calibration of temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement, EURAMET/cg-11/v.01, Previously EA-10/11.
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.	July 2007			Guide EURAMET, Calibration of Temperature, Block calibrators, EURAMET/cg-13/v.01, Previously EA-10/13.
NF B 35-500	Thermomètre de laboratoire à dilatation de liquide dans une gaine de verre – principe de conception de construction et d'utilisation.	ASTM			
		ASTM E77			Standard test method for inspection and verification of thermometers.
NF B 35-501	Thermomètres à échelle protégée ajustable.	UTE			
NF B 35-502	Thermomètre de précision, sur tige, type long.	UTE C46-201			Mesure et commande dans les processus industriels – Capteurs de température à couples thermoélectriques – Prescription de qualification.
NF B 35-503	Thermomètre de précision, sur tige, type court.				

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