

Instruction d'étalonnage d'un thermomètre à résistance

*Olivier Marloie*¹

Cet article décrit la méthode d'étalonnage par comparaison des chaînes de mesure de température (sonde à résistance associée à un transmetteur ou un convertisseur ou un indicateur). Les indications données par l'instrument de mesure sont comparées aux valeurs fournies par un étalon placé dans le même milieu (bain, four ou enceinte thermostatique). Ce document rappelle les recommandations normatives à suivre afin de mettre en place un dispositif d'étalonnage, de réaliser un mode opératoire et d'évaluer l'incertitude d'étalonnage. Un exemple d'étalonnage est donné.

Cet article a fait l'objet d'une présentation lors des Journées de la Mesure et de la Métrologie en octobre 2004.

Mots clés : métrologie, thermomètres à résistance, étalonnage, incertitude, mode opératoire

Références normatives

FD X07-029-1 : 2002, Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – partie 1 : procédure d'étalonnage et de vérification des sondes et thermomètres à résistance

FD X07-028 : 2002, Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres – Estimation des incertitudes sur les mesures de température

FD X 15-001 : 1997, Atmosphères normales de conditionnement et/ou d'essai – Spécifications

1. Introduction

Ce document s'applique pour les chaînes de mesure de température associant une sonde à résistance et un transmetteur ou un convertisseur ou un indicateur. Il reprend les recommandations définies par les normes FD X07-028 et FD X07-029-1. Celles-ci sont complétées ou précisées par des informations transmises par des fournisseurs de métrologie des températures ou par des prestataires d'étalonnage accrédités.

Ces recommandations sont valables quelle que soit l'exactitude de mesure recherchée et s'appliquent aux étalonnages réalisés pour n'importe quelles conditions d'environnement.

Les objectifs de ces recommandations sont :

- d'élaborer une méthode pratique et reproductible d'étalonnage,
- d'estimer une correction d'étalonnage et son incertitude associée.

¹ INRA, Unité Climat Sol Environnement -Domaine Saint Paul, Site Agroparc - 84914 Avignon Cedex 09
marloie@avignon.inra.fr

2. Méthode d'étalonnage

L'étalonnage consiste à comparer les indications données par un instrument de mesure aux valeurs fournies par un étalon placé dans le même milieu (bain, four ou enceinte thermostatique). Il permet d'éditer un certificat d'étalonnage dont l'utilisation peut être :

- soit d'appliquer des corrections aux résultats de mesure afin de diminuer l'incertitude des mesures réalisées
- soit de comparer les résultats aux limites d'Erreurs Maximales Tolérées (EMT) afin d'effectuer une vérification de l'instrument.

Le **tableau 1** montre un exemple de résultats d'étalonnage délivré par un laboratoire accrédité COFRAC pour l'étalonnage des thermomètres. Les corrections sont déterminées en fonction des points d'étalonnage réalisés et sont accompagnées de leur incertitude.

Température de référence (°C)	Indication de la chaîne de mesure (°C)	Correction à appliquer au thermomètre (°C)	Incertaince de l'étalonnage (°C)
-30.04	-30.06	0.02	± 0.065
-0.02	-0.03	0.01	± 0.055
24.90	24.89	0.01	± 0.055
49.94	49.94	0.00	± 0.055
80.16	80.15	-0.01	± 0.060

Tableau 1 : *exemple de résultats d'un étalonnage*

La température est alors : indication de la chaîne de mesure + correction d'étalonnage.

L'incertitude d'étalonnage représente l'incertitude de l'instrument dans les conditions d'étalonnage, à court terme, et en tenant compte de l'instrument. Cette incertitude sur la valeur de la correction sera utilisée lors de l'utilisation de l'instrument en vue de calculer l'incertitude composée associée aux résultats de mesure.

Le choix du dispositif d'étalonnage (thermomètre étalon et milieu de comparaison), le mode opératoire et la démarche conduisant à l'évaluation de l'incertitude vont dépendre de l'exactitude de mesure recherchée.

Pour une chaîne de mesure de température, deux classes d'exactitude sont définies (**tableau 2**).

Classe d'exactitude	Incertaince d'étalonnage	Démarche d'évaluation de l'incertaince
Exactitude de mesure courante	> 0.3 °C	Approchée
Meilleure exactitude de mesure	< 0.3 °C	Générale

Tableau 2 : *classe d'exactitude d'une chaîne de mesure de température*

3. Recommandations normatives

3.1 Environnement

La meilleure méthode consiste à se placer dans une atmosphère normale d'essai pour l'étalonnage des thermomètres. Ces conditions sont définies par la norme FD X 15-001 et adaptées pour ce type d'instrument.

Température ambiante : ce paramètre est souvent une grandeur d'influence des chaînes de mesure de température. L'utilisateur doit alors utiliser l'instrument dans les mêmes conditions de température que lors de son étalonnage. Dans la chaîne d'étalonnage nationale, la température ambiante adoptée est de 23 °C à $\pm 2^\circ\text{C}$ (tolérance courante).

Humidité relative : ce paramètre peut altérer les caractéristiques métrologiques d'un instrument de mesure (possibilité de condensation).

Rayonnement solaire : des précautions doivent être prises afin de protéger les étalons contre l'effet de ce paramètre (orientation des fenêtres vers le nord, protection par des stores ou films thermiques, positionnement des étalons loin des vitres).

Pression : l'étalonnage doit être effectué à la pression atmosphérique.

Lorsque les conditions d'environnement ne sont pas maîtrisées, il est nécessaire d'évaluer :

- l'influence des paramètres (température, humidité relative, pression atmosphérique, rayonnement) sur les bilans d'incertitudes ;
- les paramètres susceptibles de perturber les mesures (réseau électrique, compatibilité électromagnétique, vibrations, etc.).

3.2 Dispositif d'étalonnage

3.2.a. Etalon

Tout thermomètre dont l'étalonnage est traçable à des étalons nationaux peut être utilisé comme étalon. Son choix dépend de différents facteurs tels que :

- le domaine de température
- l'incertitude finale recherchée : compatibilité avec les composantes d'incertitude de l'étalon (incertitude d'étalonnage, dérive, fidélité, conditions d'utilisation, modélisation de la correction, conditions d'environnement, résolution) ;
- les conditions spécifiques de l'étalonnage (utilisation dans un bain liquide,...);
- la fonctionnalité de l'instrument (mémorisation, liaison PC,...)
- etc.

Le choix d'un étalon doit être accompagné de l'identification d'un prestataire d'étalonnage pour son raccordement aux étalons nationaux. Celui-ci doit posséder une chaîne d'étalonnage dont :

- le domaine de température correspond à celle couverte lors de l'utilisation de l'étalon
- l'incertitude d'étalonnage est compatible avec l'incertitude finale recherchée.

Si une meilleure exactitude de mesure est recherchée, un contrôle régulier de la stabilité de la sonde de référence entre deux raccordements externes doit être réalisé. La périodicité est fixée en fonction des conditions d'utilisation (fréquence, domaine de température, condition d'environnement,...).

Ce contrôle peut être effectué en :

- utilisant un point fixe de température (cellule point triple de l'eau par exemple);
- comparant directement avec un autre étalon de référence ayant la même résolution et possédant la même incertitude de raccordement aux étalons nationaux.

3.2.b. Milieu de comparaison

La qualité de la méthode par comparaison dépend fortement de la capacité à amener et à maintenir le thermomètre à étalonner et le thermomètre étalon à la même température.

Le **tableau 3** présente les principaux milieux de comparaison pouvant être utilisés pour différents domaines de température.

Milieu de comparaison		Domaine de température
Bain liquide à circulation	Iso-pentane	-160 °C à 0 °C
	Alcool éthylique	- 70 °C à 0 °C
	Eau + éthylène glycol	- 50 °C à 20 °C
	Eau	2 °C à 95 °C
	Huile silicone	- 60 °C à 295 °C
Enceinte climatique	Air	- 40 °C à 200 °C
Fours à résistance électrique	Air	200 °C à 1 000 °C

Tableau 3 : Milieux de comparaison par domaine de température

Lorsque l'incertitude finale recherchée est fine, le milieu de comparaison doit avoir d'excellentes caractéristiques thermiques (stabilité et homogénéité). Afin de faire un choix d'équipement, les caractéristiques thermiques doivent être analysées au regard des autres sources d'incertitudes du dispositif d'étalonnage, celles de l'étalon notamment.

Exemples de la contribution des caractéristiques du milieu de comparaison à l'incertitude finale :

Chaîne d'étalonnage : thermomètre étalon ayant 0.15 °C comme incertitude de mesure associé à un bain liquide dont les caractéristiques sont les suivantes :

Cas n° 1 : stabilité et homogénéité : 0.005 °C

La contribution est de 0.08% à l'incertitude finale égale à 0.1501 °C.

Cas n° 2 : stabilité et homogénéité : 0.05 °C

La contribution est de 7 % à l'incertitude finale égale à 0.155 °C.

A la vue de ces résultats, la différence en terme de contribution des caractéristiques des deux bains ne justifie certainement pas le surcoût lié à l'achat du bain n°1.

Au cours du temps ces caractéristiques peuvent évoluer et doivent donc être vérifiées périodiquement. La périodicité dépend de différents facteurs (fréquence d'utilisation, condition d'environnement, dégradation de la viscosité du fluide d'un bain, etc.). Dans tous les cas, cette caractérisation doit être réalisée après chaque intervention qui modifierait les caractéristiques thermiques (réparation ou changement de fluide d'un bain par exemple). Elle est réalisée avec le thermomètre étalon en le déplaçant sur l'ensemble du volume de travail du générateur.

La stabilité et l'homogénéité peuvent être améliorées par l'utilisation de blocs d'égalisation thermiques (blocs en métal, percés de puits permettant de positionner le capteur à étalonner et l'étalon). Le bloc ne doit pas provoquer des turbulences du fluide en circulation et être soumis à des perturbations thermiques provenant par exemple d'une résistance chauffante ou d'un bloc de réfrigération.

3.3. Le mode opératoire doit être établi afin de réaliser des étalonnages d'une manière reproductible.

Avant l'étalonnage, un examen visuel est réalisé ainsi qu'un nettoyage du capteur. Le temps de préchauffage des instruments électroniques doit être respecté. Dans les conditions d'étalonnage, il est important de prendre en compte la température ambiante, le fluide utilisé et la tension d'alimentation des différents moyens de mesure. Voici différents éléments permettant d'élaborer le mode opératoire :

- Le nombre de points d'étalonnage est fonction des conditions d'utilisation.

- Un point sert à contrôler la stabilité d'un thermomètre au cours du temps entre deux étalonnages ;
- Deux points sont suffisants pour étalonner un capteur servant à mesurer la température relativement constante d'un milieu (température ambiante d'un laboratoire par exemple);
- Trois points au minimum sont requis afin d'établir une modélisation de la correction d'étalonnage.

Si l'exactitude de mesure recherchée est fine, le programme doit inclure un point à une température proche ou égale de 0 °C. Celui-ci doit être réalisé au début et à la fin de l'étalonnage. Dans le cas où la chaîne à étalonner ne couvre pas cette température, le point peut être réalisé à une autre température.

- La profondeur d'immersion du capteur dans le milieu doit être adaptée à la longueur de l'élément sensible et aux caractéristiques thermiques du milieu de comparaison (profil thermique dans les puits des fours d'étalonnage par exemple). La différence des dimensions des éléments sensibles du thermomètre étalon et du capteur à étalonner peut entraîner des erreurs importantes (en particulier si le milieu de comparaison est un four). Afin de s'assurer que la profondeur d'immersion est suffisante, celle-ci doit être modifiée d'une longueur au moins égale à l'élément sensible. La variation de température entraînée doit rester nettement inférieure à l'incertitude finale recherchée. Dans la mesure du possible, la sonde doit être immergée d'une profondeur d'au moins 10 fois son diamètre (règle empirique).

- Les perturbations thermiques liées au capteur à étalonner : Les caractéristiques thermiques du milieu de comparaison peuvent dépendre du nombre de capteurs présents. Ceux-ci ne doivent pas modifier la répartition des températures (perturbation de l'écoulement du fluide) afin de correspondre aux conditions dans lesquelles le milieu a été caractérisé.

-Le temps de stabilisation : un temps de stabilisation minimum doit être déterminé en fonction des caractéristiques du milieu de comparaison (temps de réponse). La température du milieu est considérée comme stable lorsque les variations locales de la température mesurée par le thermomètre étalon sont inférieures au critère de stabilité recherché. Il est alors important de respecter un temps d'attente avant de réaliser les relevés de mesure. Ce temps permet de s'assurer que les différents capteurs en présence sont à la même température. En règle générale, ce temps est fixé à n fois le temps de réponse maximum des capteurs présents dans le milieu (prendre n entre 10 et 20).

- Vitesse d'acquisition des mesures : La recherche d'une meilleure exactitude de mesure impose plusieurs acquisitions de l'étalon et de la chaîne, sur une durée compatible avec la dynamique du système (régulation du milieu de comparaison). Les relevés de mesure (3 au minimum) sont réalisés en fonction du temps de réponse des capteurs (2.5 à 5 fois temps de réponse de l'instrument à étalonner).

- Traitement des données brutes : Pour chaque point d'étalonnage, on calcule la moyenne pour chaque série de mesures.

La correction d'étalonnage est alors : $C_i = T_i - L_i + Ce_i$

- C_i : correction de la chaîne à étalonner ;
- T_i : indication de l'étalon ;
- L_i : indication de la chaîne à étalonner ;
- Ce_i : correction d'étalonnage de l'étalon.

4. Composantes d'incertitude et leur méthode d'évaluation

La première étape consiste à lister les différentes causes d'incertitudes. Ensuite, les incertitudes types sont estimées suivant deux méthodes :

- Type A : détermination par analyse statistique de séries de mesure
- Type B : à partir de toutes les informations disponibles, détermination des étendues des valeurs possibles et de leur distribution *a priori*.

La norme FD X07-028 définit une liste de sources d'incertitudes ainsi que leurs composantes pour une chaîne de mesure de température (**tableau 4**).

La démarche d'évaluation de l'incertitude d'étalonnage dépend de l'exactitude de mesure recherchée. La démarche générale doit être appliquée dès lors que l'on vise une exactitude inférieure à 0.3 °C.

Concernant la démarche approchée, certaines composantes sont considérées comme négligeables (ne contribuent pas significativement au résultat). On ajoute au résultat une incertitude forfaitaire pour tenir compte des incertitudes négligées (en augmentant au minimum de 20 % la valeur de l'incertitude composée). Cette méthode d'évaluation doit être validée en comparant les résultats dans le cadre d'une comparaison inter laboratoires avec un laboratoire ayant appliqué la démarche générale (**cf. § 6**).

La démarche générale impose de prendre en compte toutes les composantes. Celles-ci relèvent souvent de l'observation de précautions particulières concernant les conditions d'étalonnage, de fonctionnement des instruments et de traitement des résultats.

Source	Composantes	Démarche générale	Démarche approchée
Etalon	Incertitude d'étalonnage	•	•
	Interpolation	•	Négligeable
	Calculs	•	Négligeable
	Reproductibilité	•	Négligeable
	Dérive	•	•
Instrument de mesure	Fidélité	•	•
	Résolution	•	•
	Erreur d'origine thermique	•	Négligeable
Opérateur	Erreur de lecture	•	•
Milieu de comparaison	Stabilité	•	•
	Homogénéité	•	•
Environnement	Alimentation électrique	•	Négligeable
	Perturbations électromagnétiques	•	Négligeable
	Température ambiante	•	Négligeable
	Humidité relative	•	Négligeable

(• à prendre en compte)

Tableau 4 : Composantes d'incertitude concernant un thermomètre à résistance

4.1. Etalon

4.1.a. Exploitation du certificat d'étalonnage : L'incertitude type est calculée en divisant par 2 (coefficient d'élargissement) l'incertitude d'étalonnage.

4.1.b. Composante liée aux méthodes d'interpolation et aux modélisations : Pour un nombre de points de température, le certificat d'étalonnage délivre des corrections à appliquer. Il est nécessaire de modéliser les résultats ou de les interpoler lors de l'utilisation. Le choix de la méthode dépend du nombre de points d'étalonnage, de l'étendue entre deux points, de la résolution de l'instrument et plus généralement de l'incertitude recherchée. L'extrapolation des résultats en dehors du domaine d'étalonnage est à proscrire.

Interpolation linéaire

Pour la température T_m comprise entre les points d'étalonnage $[T_i, T_j]$, la correction C_m est calculée par une interpolation linéaire entre les corrections C_i et C_j .

$$C_m = C_i + \frac{(C_j - C_i)}{(T_j - T_i)} \times (T_m - T_i)$$

L'incertitude type associée u_{int} peut être calculée à partir de l'incertitude de répétabilité u_{rep} de l'étalon :

$$u_{\text{int}} = \sqrt{2} \times u_{\text{rep}}$$

Modélisation

A partir de trois points d'étalonnage, la correction d'étalonnage peut être modélisée sur toute l'étendue de mesure de température indiquée par l'instrument en fonction de la lecture directe. Le type d'équation pour établir la relation mathématique est choisi en faisant des hypothèses sur la loi de comportement de l'instrument.

L'incertitude due à l'utilisation d'une modélisation est estimée à partir de l'étude des résidus :

- Répartition aléatoire : la courbe passe par tous les points d'étalonnage élargis de leurs incertitudes. L'incertitude u_{mo} est alors déterminée par une méthode de type A appliquée aux résidus (écart type des résidus).
- Répartition non aléatoire : la courbe ne recoupe pas tous les domaines d'incertitude des points d'étalonnage. L'utilisation du modèle introduit des erreurs qui ne sont plus aléatoires mais ont un caractère systématique. De ce fait, la valeur absolue maximale des résidus doit être sommée à l'incertitude d'étalonnage du thermomètre.

- 4.1.c. Calculs : Les logiciels (acquisition, calcul, tableur,..) doivent :

- être protégés contre des manipulations qui viendraient invalider les mesures.
- faire l'objet d'une validation (comparaison inter-laboratoires à partir des mêmes données de base ; comparaison des résultats issus d'un tableur et ceux calculés par un autre moyen).

- 4.1.d. La reproductibilité caractérise l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure. Cette incertitude peut être déterminée en calculant l'écart type des mesures répétées de la température d'un point fixe.

4.1.e. Dérive

1 – Il n'y a pas de suivi de l'étalon dans le temps : L'étendue maximale δD liée à la dérive de l'étalon doit être estimée :

- soit à partir des données constructeur ;
- soit en tenant compte des informations disponibles sur ce type d'appareil.

L'incertitude type correspondante est alors $u_d = \delta D$.

2 – Il y a un suivi de l'étalon dans le temps : L'incertitude type u_d est estimée à partir des derniers certificats d'étalonnage. La variation maximale δD sur l'ensemble des dérives entre deux étalonnages successifs est retenue. En supposant que la loi de distribution est uniforme, l'incertitude type est :

$$u_d = \frac{\delta D}{\sqrt{3}}$$

4.2. Instrument de mesure

4.2.a. Stabilité de l'affichage :

Cette composante de type A n'est pas listée par la norme FD X 07-028 (citée par ailleurs par la norme FD X 07-029-1). Elle peut être une source d'erreur importante et révéler un problème de l'instrument (montage, panne, alimentation,..). Elle est estimée en calculant l'écart type des relevés pour chaque point d'étalonnage.

4.2.b. Fidélité

Pour estimer la fidélité, le capteur doit être retiré du milieu de comparaison, amené à la température ambiante puis replongé dans ce même milieu suivant la même séquence.

Deux estimateurs peuvent être utilisés pour déterminer la fidélité :

1) l'écart type expérimental

La fidélité est estimée à partir de la valeur maximale des écarts types calculés sur les valeurs moyennes des relevés aux différents points d'étalonnage.

2) l'étendue

Généralement peu de mesures pour chaque point de température sont disponibles pour estimer correctement l'écart type expérimental.

L'étendue est utilisée pour estimer la fidélité. L'étendue est la différence entre la plus grande et la plus petite des indications obtenues pour une même température. La fidélité est estimée à partir de la valeur maximale des étendues calculées aux différents points d'étalonnage. Cette valeur est divisée par un coefficient d_n (coefficient dépendant du nombre n de mesures en chaque point, voir tableau n° 5).

$$u_{\text{fidélité}} = \frac{\text{MAX}(T_{i,\text{max}} - T_{i,\text{min}})}{d_n}$$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_n	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08	3.17	3.26

Tableau 5 : Valeur de d_n en fonction de n

Pour un nombre n de mesure inférieur à 12, il faut prendre l'estimateur majorant l'incertitude liée à la fidélité de l'instrument.

4.2.c. Résolution

1) Résolution d'un indicateur analogique :

Cette incertitude est due à une erreur de lecture de l'opérateur (cf § 8.3)

2) Résolution d'un indicateur numérique :

La résolution est considérée comme un incrément du nombre sur l'indicateur numérique, dès lors que l'indication ne fluctue pas de plus d'un incrément.

En supposant que la loi de distribution est uniforme, l'incertitude type est :

$$u_r = \frac{r}{2\sqrt{3}} \text{ avec } r \text{ résolution de l'instrument de mesure}$$

4.2.d. Erreur d'origine thermique

L'indication du thermomètre est la température propre de l'élément sensible (inséré généralement dans une gaine et maintenu par du liant). Les échanges thermiques entre cet élément et le milieu s'opèrent par conduction, convection ou rayonnement. Ils doivent être favorisés afin que l'écart de température soit le plus faible possible. Pour cela, il faut (lorsque c'est possible) minimiser les fuites thermiques :

- augmenter la profondeur d'immersion ;
- diminuer la section des conducteurs (problème de conduction de la chaleur par les câbles et connecteurs) ;
- éviter de placer le capteur devant une source lumineuse ou une paroi absorbante.

Si malgré ces précautions, il existe toujours une erreur, celle-ci doit être appliquée comme correction aux résultats d'étalonnage ou sommée linéairement aux autres composantes d'incertitudes.

4.3. Opérateur

Cette incertitude est liée à l'erreur de lecture de l'opérateur et plus précisément à l'interpolation entre 2 graduations. Elle est applicable pour un thermomètre à indicateur analogique. Cette incertitude est égale à :

$$u_r = \frac{r}{2\sqrt{3}} \text{ en supposant une loi de distribution uniforme}$$

avec r = erreur d'interpolation définie comme une fraction entre deux repères de l'indicateur analogique. Elle est liée à l'acuité de l'opérateur à réaliser une lecture en fonction de la largeur de la graduation, l'épaisseur de l'aiguille, la parallaxe,...

4.4. Milieu de comparaison

4.4.a. La stabilité est délivrée par le certificat de caractérisation du milieu. Elle correspond, en régime établi, à la variation maximale de la température dans l'espace de travail.

L'incertitude type est :

$$u_{st} = \frac{\text{stabilité}}{2\sqrt{3}} \text{ en supposant une loi de distribution uniforme}$$

Les constructeurs donnent souvent le critère de stabilité sous forme d'une variation de $\pm t$ °C. La stabilité est alors $2t$.

4.4.b. L'homogénéité est délivrée par le certificat de caractérisation du milieu. Elle correspond, en régime établi, à la différence des températures extrêmes dans l'espace de travail. L'incertitude type est :

$$u_{ho} = \frac{\text{homogénéité}}{2\sqrt{3}} \text{ en supposant une loi de distribution uniforme}$$

Les constructeurs donnent souvent le critère d'homogénéité sous forme d'une variation de $\pm t$ °C. L'homogénéité est alors $2t$.

4.5. Environnement

4.5.a. Alimentation électrique

Cette incertitude a deux origines : la stabilité de l'alimentation électrique et la mesure de la tension d'alimentation. Elle est négligeable pour les thermomètres à résistance. Cependant, il est conseillé d'utiliser l'instrument avec la même tension d'alimentation que celle utilisée lors de son étalonnage (ou inversement).

4.5.b. Perturbations électromagnétiques

La norme précise qu'il est illusoire de vouloir quantifier cette incertitude. Il est nécessaire de mettre en place des protections (filtrage, blindage, etc.) en cas d'influences non négligeables. Cependant, pour une utilisation en environnement « normal », on peut considérer qu'un thermomètre sensible aux perturbations électromagnétiques est un mauvais instrument. Dans le cas d'une utilisation en environnement sévère, des essais d'immunité doivent être réalisés selon les normes établies par la CEI, le CENELEC ou d'autres organismes.

4.5.c. Conditions ambiantes

Température : l'étalon doit être utilisé dans les mêmes conditions que lors de son étalonnage. Si ce n'est pas le cas, il faut corriger celui-ci de l'effet de la température. Si cette correction n'est pas effectuée, il faut alors sommer linéairement cette erreur aux autres sources d'incertitudes.

Humidité relative : elle doit être mesurée. Il faut s'assurer qu'elle n'entraînera pas de problème de condensation sur les instruments de mesure.

5. Estimation de l'incertitude d'étalonnage

La méthode consiste, à partir des incertitudes types u_i des différentes sources d'incertitudes, à calculer l'incertitude composée u_c . L'incertitude d'étalonnage est donnée par l'incertitude élargie U .

5.1. Incertitude type composée u_c

En faisant l'hypothèse que ces sources sont non corrélées, l'incertitude composée u_c s'obtient en sommant quadratiquement les incertitudes types des composantes d'incertitudes.

$$u_c = \sqrt{\sum (u_i^2)}$$

Dans le cadre d'une démarche approchée, cette incertitude est augmentée de 20% de manière à prendre en compte les composantes négligées.

5.2 - Incertitude élargie U

L'incertitude élargie U représente l'intervalle autour du résultat de mesure dans lequel on peut espérer trouver une large fraction des valeurs qui pourraient être attribuées à la grandeur mesurée. Elle s'obtient en multipliant l'incertitude composée, par un facteur d'élargissement k généralement pris égal à 2 :

$$U = k \cdot u_c$$

Dans le cas de corrections non appliquées (erreur d'origine thermique, effet de la température sur l'étalon, erreur de calcul d'un logiciel...), elles doivent être sommées linéairement à U .

6. Comparaison inter laboratoires

Cette comparaison est nécessaire lorsque l'incertitude d'étalonnage est évaluée par la démarche approchée. Elle permet également de valider une procédure d'étalonnage. Elle est réalisée en étalonnant une première fois un instrument dans le laboratoire pilote, puis dans le laboratoire interne, et une nouvelle fois dans le laboratoire pilote afin d'estimer l'incertitude liée à sa dérive pendant la durée de comparaison.

Les résultats permettent de comparer, par rapport à une valeur de référence, les valeurs délivrées par l'instrument et les incertitudes d'étalonnages associées aux deux laboratoires.

On calcule ensuite l'erreur normalisée E_n :

$$E_n = \frac{\Delta x}{U_{\Delta x}} = \frac{\Delta x}{2 \times \sqrt{\frac{(U_1)^2}{4} + \frac{(U_2)^2}{4}}}$$

avec : Δx : écart entre les deux mesures effectuées par les laboratoires

U_1 : incertitude élargie du laboratoire n°1

U_2 : incertitude élargie du laboratoire n°2

Cette erreur normalisée doit être inférieure à 1 pour valider la méthode du calcul d'incertitude. Si ce n'est pas le cas, il faut augmenter l'incertitude forfaitaire proposée.

7. Exemple d'un étalonnage

Objectif de l'étalonnage : comparaison en un point à 25 °C de l'indication de l'instrument à étalonner à la température de référence donnée par un thermomètre étalon

Étalon : Thermomètre numérique

- Résultats de l'étalonnage (réalisé par un laboratoire accrédité COFRAC) : voir tableau n° 1

- Dérive : 0.01 °C

La modélisation des résultats nous permet d'établir la relation entre la correction observée et la température lue : $C_t = -0.00026.T_{lue} + 0.0125$

Milieu de comparaison : bain

- Stabilité : ± 0.02 °C

- Homogénéité : ± 0.01 °C

- Fluide : eau

Instrument à étalonner : thermomètre numérique associant une sonde à résistance et un indicateur

- Résolution 0.01 °C

- Alimentation : pile 9V

- Étendue de mesure : -20 °C à 130 °C

Conditions ambiantes dans le local d'essai

- Température : 23 °C \pm 3 °C

- Humidité relative : 50 % \pm 30 %

- Pression : atmosphérique

Mode opératoire : La profondeur d'immersion dans le bain est de 400 mm. Les instruments sont centrés dans l'espace de travail. Lorsque l'équilibre thermique est atteint, on relève une série de 10 mesures sur le thermomètre de référence et sur la chaîne de mesure.

Les relevés s'effectuent toutes les 60 secondes. La chaîne de mesure est sortie du bain, puis immergée à nouveau. Un nouveau cycle est réalisé afin de déterminer la fidélité de la chaîne de mesure. La moyenne des mesures pour chaque série est retenue.

Relevé de mesures

Série	Indication du thermomètre de référence (°C)	Indication du thermomètre à étalonner (°C) moyenne / écart type
1	25.16	25.29 / 0.016
2	25.16	25.31 / 0.014

L'écart entre les deux moyennes du thermomètre de référence doit être inférieur à l'incertitude de stabilité du milieu afin d'accepter les résultats (critère d'acceptation).

La température de référence est égale à l'addition de la valeur lue et de la correction d'étalonnage du thermomètre étalon, soit :

$$Tr = 25.16 + (-0.00026 * 25.16 + 0.0125) = 25.17 \text{ °C}$$

La température lue sur l'instrument à étalonner est égale à la moyenne des 2 séries : 25.30 °C.

La correction d'étalonnage est alors : $Ce = Tr - T_{lue} = 25.17 - 25.30 = -0.13 \text{ °C}$.

Estimation de l'incertitude d'étalonnage : Certaines composantes ne peuvent pas être estimées dans cet exemple. En conséquence, la démarche approchée est adoptée sachant que cette méthode doit être validée par une comparaison inter laboratoire.

Source	Composantes	Type	données	Contribution
Etalon	Incertitude d'étalonnage	B	0.055 °C k = 2	0.0275 °C (50.14 %)
	Dérive	B	0.01 °C	0.0058 °C (2.23 %)
Instrument de mesure	Stabilité de l'affichage	A	0.016 °C	0.016 °C (16.97 %)
	Fidélité	A	0.02 °C n = 2	0.0177 °C (20.77 %)
	Résolution	B	0.01 °C	0.0029 °C (0.56 %)
Milieu de comparaison	Stabilité	B	0.04 °C	0.0115 °C (8.77 %)
	Homogénéité	B	0.02 °C	0.0029 °C (0.56 %)

L'incertitude composée est la somme quadratique des incertitudes types. On l'augmente de 20 % en raison des composantes négligées.

L'incertitude composée est alors $u_c = 0.047 \text{ °C}$. L'incertitude d'étalonnage correspond à l'incertitude élargie $U = k * u_c = 0.094 \text{ °C}$ (k=2).

Résultat de l'étalonnage

Température de référence (°C)	Indication de la chaîne de mesure (°C)	Correction à appliquer au thermomètre (°C)	Incertitude d'étalonnage (°C)
25.17	25.30	-0.13	± 0.094

8. Conclusion

Le choix d'un dispositif d'étalonnage, l'élaboration d'un mode opératoire et l'estimation de l'incertitude d'étalonnage sont des opérations difficiles à mener. En terme de moyens et de temps, certaines composantes d'incertitudes peuvent être difficiles à évaluer en fonction des conditions d'étalonnage. Les comparaisons inter laboratoires sont un bon moyen pour valider une méthode d'estimation de l'incertitude d'étalonnage.

Réaliser une instruction d'étalonnage basée sur ces recommandations permet :

- d'aboutir à une méthode simple et reproductible d'étalonnage ;
- d'estimer une correction d'étalonnage ;
- de limiter les sources d'erreurs et d'estimer leurs incertitudes associées ;
- d'estimer une incertitude qui quantifie raisonnablement le degré de notre ignorance de la correction d'étalonnage ;
- de justifier la méthode d'estimation de l'incertitude.

Les auteurs de la norme FD X 07-028 insistent sur les difficultés de l'estimation des incertitudes *qui sont liées à une analyse correcte du processus de mesure et à la mise en évidence des causes d'erreurs. L'estimation doit être justifiée en se basant sur des méthodes structurées et reconnues. Ces méthodes ne doivent cependant pas se substituer à la réflexion qui s'appuie sur l'observation et l'analyse de l'instrument et de son environnement.*

Il est important également de rappeler que lors de l'utilisation de l'instrument, l'incertitude d'étalonnage ne représente qu'une partie de l'incertitude associée aux résultats de mesure. Afin d'estimer celle-ci, il est nécessaire de prendre en compte les composantes spécifiques de l'application (environnement, montage et méthode) et la composante de stabilité à long terme (dérive).

Remarque concernant l'étalonnage de sonde à résistance seule :

Les recommandations restent les mêmes que celles décrites dans le document. Il faut cependant prendre en compte dans les composantes d'incertitude, les éléments suivants : incertitudes liées au système utilisé pour mesurer la résistance électrique présentée par la sonde (incertitude d'étalonnage, résolution, dérive, fidélité, résistances ou tensions parasites liées à la connectique et scrutateur de voie, etc.), incertitude liée à l'auto échauffement de la sonde.