

GUIDE D'ETALONNAGE des capteurs de température de surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures

Ce document a été élaboré avec la participation de :

- Pyrocontrôle Chauvin-Arnoux
- Laboratoire National d'Essais
- Electricité De France
- Apave Lyonnaise
- Airbus
- AOIP
- BMI

dans le cadre d'un projet AQCEN, financé par le Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie.

0. SOMMAIRE

0. SOMMAIRE	2
1. AVANT-PROPOS	3
2. DOMAINE D'UTILISATION	3
3. DEFINITIONS, TERMINOLOGIE	4
4. MESURE D'UNE TEMPERATURE DE SURFACE PAR CONTACT	4
5. METHODE D'ETALONNAGE	6
6. CONDITIONS SPECIFIQUES D'APPLICATION	6
6.1. SURFACE DE REFERENCE	6
6.2. ENVIRONNEMENT	7
6.3. INSTRUMENTS CONCERNES	7
7. ETALONNAGE D'UNE CHAINE DE MESURE DE TEMPERATURE DE SURFACE	8
7.1. RECOMMANDATIONS	8
7.2. PRINCIPES DE DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE REFERENCE	8
7.2.1. CAS OU LE BLOC EST EQUIPE DE DEUX CAPTEURS	8
7.2.2. CAS OU LE BLOC EST EQUIPE D'UN SEUL CAPTEUR	9
7.3. MODE OPERATOIRE	10
7.4. EXPRESSION DU RESULTAT	11
7.5. DETERMINATION DE L'INCERTITUDE D'ETALONNAGE	12
7.6. PRESENTATION DES RESULTATS	13
7.7. EXEMPLES	14
8. BIBLIOGRAPHIE	17

1. AVANT-PROPOS

De nombreuses applications industrielles nécessitent le recours aux mesures de température de surface par contact.

La mise en œuvre des capteurs de température de surface paraît simple : non intrusifs, ces capteurs ne nécessitent pas de dispositifs de mise en place particulier (trou ou doigt de gant par exemple comme pour les capteurs intrusifs classiques). En réalité, leur utilisation est délicate, notamment en raison des difficultés d'interprétation des résultats de mesure.

Ce guide a pour objet de définir une procédure d'étalonnage des capteurs de température de surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures. Il fait partie d'un ensemble de deux fascicules visant à l'amélioration de la qualité et de la fiabilité des mesures par capteurs de température de surface [19] (Guide 2 : « Guide d'utilisation des capteurs de température de surface – Validation de la méthode par des cas concrets d'application en milieu industriel »).

Ce document s'adresse aux utilisateurs de capteurs de température de surface, en particulier les prestataires d'étalonnage dans ce domaine et les industriels ayant recours à ce type d'instruments dans leurs processus de fabrication et/ou de surveillance.

Ce document a été élaboré par un groupe de travail constitué par PYRO-CONTROLE Groupe CHAUVIN ARNOUX, le LABORATOIRE NATIONAL D'ESSAIS, EDF, APAVE LYONNAISE, AIRBUS, AOIP et BMI.

2. DOMAINE D'UTILISATION

Les instruments de mesure concernés sont des chaînes de mesure de température de surface. Cette appellation désigne un thermomètre qui comprend un élément sensible adapté à une application de surface, par exemple un couple thermoélectrique connecté par l'intermédiaire d'un ou plusieurs éléments (câble d'extension, câble de compensation, transmetteur, convertisseur) à un indicateur. Cet ensemble constitue une chaîne qui est étalonnée et utilisée sans dissocier les différents éléments.

Certains capteurs de température de surface sont fixés de façon permanente sur un processus. D'autres sont amovibles et appliqués directement sur la surface à mesurer.

Ce document se focalise sur l'étalonnage de ces capteurs mais ne traite pas de façon exhaustive les technologies existantes et les techniques de fixation (capteurs fixes). Pour ces points, il est conseillé de se rapprocher des « Techniques de l'Ingénieur ».

Ces différents capteurs peuvent être utilisés pour :

- connaître une température de surface (vitres de fours, armoires électriques, convecteurs, plaques de cuisson, ...);
- déduire une température au cœur d'un dispositif (température d'un produit en sortie de four, température interne d'un aliment, ...);
- contrôler des capteurs non accessibles (processus de fabrication, boucle de chauffage, ...);
- surveiller un processus (régulation, processus de fabrication, ...).

Contrairement aux capteurs de température classiquement immergés dans le milieu à mesurer, l'élément sensible des capteurs de température de surface est placé à l'interface entre deux milieux de températures différentes. Leur présence perturbe systématiquement

l'équilibre thermique du matériau mesuré pour atteindre une nouvelle température qui dépend notamment des conditions ambiantes et de la nature du matériau. Il est dès lors évident que les mesures de température de surface au moyen de ces capteurs nécessite un étalonnage et une utilisation par des méthodes appropriées.

En l'état actuel des connaissances, le domaine d'étalonnage est le suivant :

- gamme de température : de l'ambiante jusqu'à 300°C ;
- nature de la paroi de référence : « bon » conducteur thermique (métal ou alliage métallique) et « bon » état de surface.

La procédure définie n'est applicable que pour les instruments décrits ci-après et dans des conditions spécifiques d'application (description au § 6 : « conditions spécifiques d'application »).

3. DEFINITIONS, TERMINOLOGIE

Température de surface : température en un point d'une surface représentée par celle d'un petit élément de matière immédiatement sous-jacent à l'élément d'aire dS centré en ce point et appartenant à la frontière immatérielle matériau-extérieur.

Température de surface mesurée (par un capteur de température de surface) : température entachée d'une erreur systématique majoritairement liée à la perte thermique provenant de la mise en contact du capteur avec la paroi à mesurer du fait de l'écart de température initial entre les deux éléments.

Surface de référence : surface, dont la température est connue, dédiée à l'étalonnage de capteurs de température de surface.

Paroi de référence : bloc de nature définie permettant la matérialisation d'une surface de référence.

Capteur de température de surface fixe : capteur appliqué sur la paroi à mesurer au moyen d'un dispositif de fixation externe (montage mécanique, colle, scotch, pâte, ...).

Capteur de température de surface amovible : capteur appliqué et maintenu manuellement sur la paroi à mesurer par l'opérateur.

Homogénéité thermique : différence obtenue en régime établi entre les valeurs extrêmes de température de la surface de référence.

Stabilité thermique : différence obtenue en régime établi entre les valeurs extrêmes de température en un même point de la surface de référence.

4. MESURE D'UNE TEMPERATURE DE SURFACE PAR CONTACT

La température de surface peut être estimée :

- par mesure indirecte, à partir d'une ou plusieurs mesures effectuées au sein du matériau ;
- par mesure directe, en appliquant un capteur à la surface du matériau.

La mesure directe sur laquelle se basent les capteurs de surface est entachée d'erreurs relativement importantes liées à la mise en contact du capteur et du matériau (Figure 1).

Les sources d'erreur proviennent majoritairement de la conjonction de trois effets (Figure 1) :

- la macrostriction (convergence des lignes de flux thermique vers la zone de contact) ;
- la résistance de contact à l'interface milieu-thermomètre (imperfection du contact résultant des irrégularités de surface) ;
- l'effet d'ailette par le capteur.

En pratique, ces erreurs sont très variables d'un capteur à l'autre et dépendent des paramètres suivants :

- rugosités à l'interface capteur-surface ;
- caractéristiques géométriques et nature du matériau (caractéristiques thermophysiques) ;
- température du matériau ;
- conditions ambiantes ;
- technologie du capteur de température de surface utilisé.

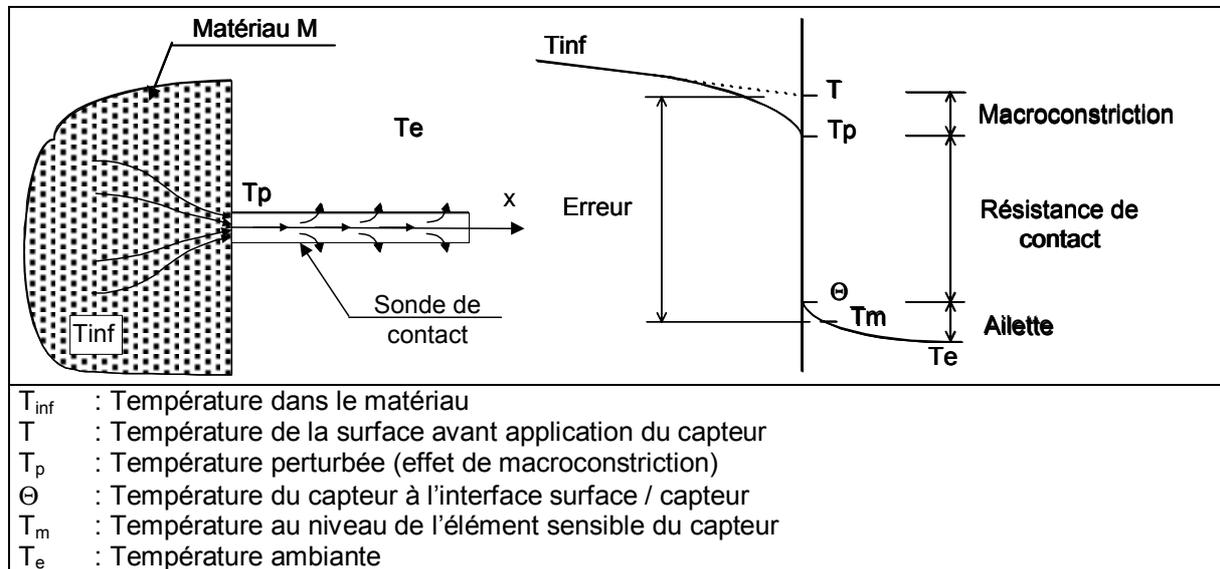


Figure 1 : Effets perturbateurs liés à l'application d'un capteur de température de surface

Il peut être démontré [14] que l'erreur de mesure ($T_m - T$) liée à ces effets peut être exprimée de la manière suivante :

$$(T_m - T) = - \frac{r_m + r_c + r_x}{r_m + r_c + r_e} (T - T_e)$$

où

- r_m résistance thermique de macrostriction ($K.m^2.W^{-1}$)
- r_c résistance thermique de contact ($m^2.K.W^{-1}$)
- r_x résistance thermique entre l'interface surface / capteur et l'élément sensible du capteur ($m^2.K.W^{-1}$)
- r_e résistance thermique globale entre la surface de contact et le milieu extérieur ($m^2.K.W^{-1}$)

Ces effets perturbateurs peuvent être minimisés : un capteur de température de surface doté d'une surface d'application importante et d'une faible masse thermique permet de réduire les résistances thermiques de contact et les fuites thermiques, la chute de température liée à la résistance thermique de macrostriction est d'autant plus faible que le matériau mesuré est bon conducteur thermique. L'erreur ($T_m - T$) peut être corrigée par un étalonnage.

5. METHODE D'ETALONNAGE

L'étalonnage consiste à comparer les indications de la chaîne de mesure à étalonner à la température d'une surface de référence de la paroi sur laquelle elle est appliquée. La température de cette surface de référence est déterminée avant application du capteur.

Le domaine de validité (conditions d'étalonnage requises, capteurs concernés) pour la méthode d'étalonnage décrite dans le présent document est précisé dans la suite du document (§ 6.).

6. CONDITIONS SPECIFIQUES D'APPLICATION

6.1. SURFACE DE REFERENCE

La température de surface peut être matérialisée à l'aide d'un bloc cylindrique dont l'une des faces est maintenue à température constante. La face opposée est soumise à des conditions d'échange libres (convection naturelle, rayonnement), et matérialise une surface de référence sur laquelle les capteurs à étalonner peuvent être appliqués.

Afin de déterminer la température de surface, les générateurs de température sont généralement équipés d'un ou plusieurs capteurs placés dans le bloc.

Les résultats de l'étalonnage d'un même capteur sont affectés par les caractéristiques de la paroi matérialisant la surface de référence, notamment la nature du matériau et l'état de surface.

Les exigences liées aux caractéristiques de la paroi de référence sur laquelle le capteur est appliqué sont les suivantes :

- La nature de la paroi matérialisant la surface doit exclusivement être en métal ou alliage métallique (aluminium, acier inoxydable : $105 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \leq \lambda_{\text{aluminium}} \leq 268 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \leq \lambda_{\text{inox}} \leq 30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des températures comprises entre 10°C et 500°C [13][17][18]). La conductivité thermique minimale requise est de $15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- L'épaisseur minimale [13] de la paroi est de 10 mm ;
- La surface d'application du capteur est plane et lisse. L'état de surface requis doit au moins correspondre à un usinage courant (rugosités moyennes de l'ordre de 1 µm). La présence d'oxydation superficielle liée à la mise en œuvre du dispositif n'est pas réhabilitaire pour des parois en aluminium ou en acier inoxydable ;
- La surface doit être en position horizontale (les capteurs sont appliqués verticalement sur la surface).

La face supérieure de la paroi de référence permet l'application d'un capteur de température de surface. La configuration géométrique du dispositif n'entrave pas les échanges thermiques par convection avec l'air ambiant : la Figure 2 présente un exemple de configurations géométriques requise et à éviter (effet de puits...).

Exemple de configuration requise :

Exemple de configuration à éviter :

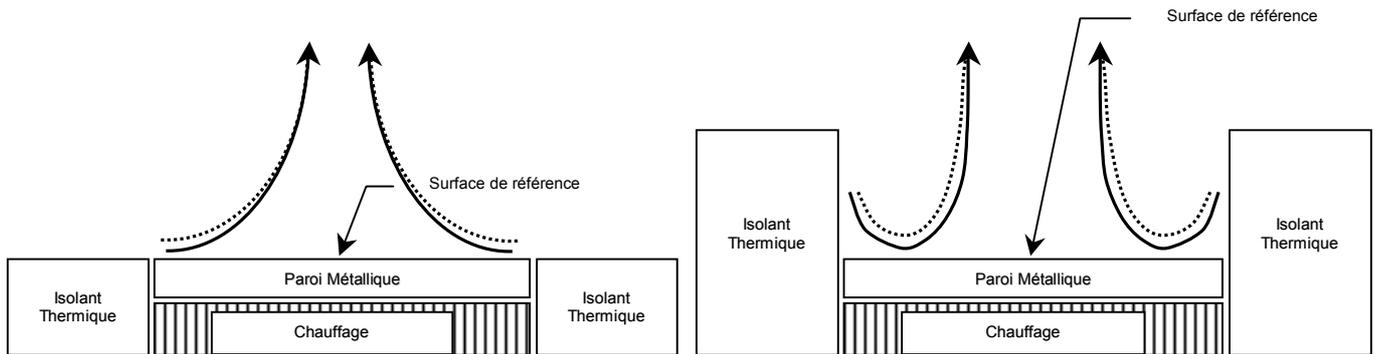


Figure 2 : Exemple de configuration requise et de configuration à éviter

6.2. ENVIRONNEMENT

Les conditions d'environnement de l'étalonnage à prendre en compte correspondent d'une part aux conditions ambiantes de laboratoire usuellement spécifiées (température, hygrométrie) et d'autre part aux facteurs d'influence spécifiques à ces mesures :

- vitesse de l'air ambiant du laboratoire autour du dispositif ;
- absence d'apport de chaleur externe au dispositif (rayonnement ...) ;
- régime de convection naturel (différent selon que la paroi se trouve en position horizontale ou verticale).

Ces conditions correspondent à des échanges de la surface avec son environnement sans perturbations thermiques externes : le dispositif d'étalonnage ne doit pas être situé à proximité d'une source de chaleur convective ou radiative susceptible de perturber les mesures (éclairage halogène proche, rayonnement solaire direct, four à air pulsé, ...).

Autour du dispositif, la vitesse résiduelle de l'air ambiant des locaux doit être faible et, tant que possible, ne pas dépasser 0,4 m/s (limite de sensation de gêne par l'être humain liée à un courant d'air dans les locaux).

L'indicateur numérique de la chaîne de mesure à étalonner doit être placé dans les conditions atmosphériques du laboratoire au moins une heure avant l'étalonnage.

6.3. INSTRUMENTS CONCERNES

Les capteurs de température de surface pour lesquels il est justifié et pertinent d'établir un certificat d'étalonnage doivent répondre aux critères suivants :

- capteurs en contact avec la paroi générant la température de surface (possibilité d'utilisation d'une substance améliorant le contact thermique) ;
- capteurs dont la correction d'étalonnage Corr, incertitude incluse, est inférieure aux valeurs indiquées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Critères d'acceptabilité d'étalonnage des capteurs de surface en termes de correction d'étalonnage

température de surface (T_{surf})	$ \text{Corr} + U$, U en (k=2), inférieure ou égale à :
$T_{\text{ambiante}} < T_{\text{surf}} < 100^{\circ}\text{C}$	4,5°C pour application sur une paroi en aluminium 6°C pour application sur une paroi en acier inoxydable
$100^{\circ}\text{C} < T_{\text{surf}} < 300^{\circ}\text{C}$	[4,5 °C + 4,5% x (T_{surf} -100)] pour une paroi en aluminium [6 °C + 6,5% x (T_{surf} -100)] pour une paroi en acier inoxydable (T_{surf} en °C)

7. ETALONNAGE D'UNE CHAÎNE DE MESURE DE TEMPERATURE DE SURFACE

7.1. RECOMMANDATIONS

La mesure des températures de surface est délicate et requiert une prise en compte attentive des conditions dans laquelle elle est réalisée.

Afin d'établir la traçabilité des mesures dans ce domaine, ce document propose une méthode d'étalonnage des chaînes de mesure de température de surface dont le principe repose sur la comparaison à une surface de référence (température connue).

Les facteurs d'influence prédominants pour ce type de mesure nécessitent la prise en compte de conditions spécifiques afin d'assurer un étalonnage correct des capteurs de température de surface (conditions décrites au § 6.).

Les conditions spécifiées lors de l'étalonnage doivent être reportées dans le certificat d'étalonnage associé.

7.2. PRINCIPES DE DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE REFERENCE

7.2.1. Cas où le bloc est équipé de deux capteurs

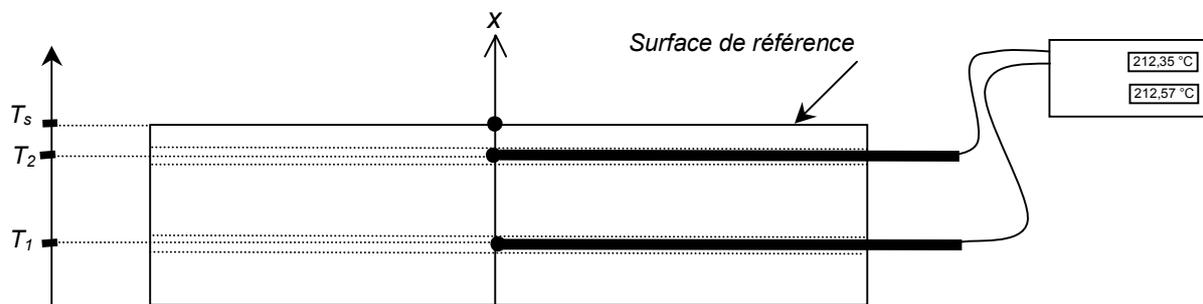


Figure 3 : Détermination de la température de surface au moyen de deux capteurs

La présence de deux capteurs dans le bloc (associés au dispositif) permet la connaissance de la température de surface par extrapolation linéaire (Figure 3).

La température de surface au centre du bloc est déterminée par la mesure des températures T_1 et T_2 aux épaisseurs respectives x_1 et x_2 .

L'hypothèse d'un flux thermique monodimensionnel suivant l'axe x permet d'établir la relation suivante (répartition linéaire des températures dans le bloc) :

$$\frac{e - x_1}{T_s - T_1} = \frac{x_2 - x_1}{T_2 - T_1}$$

La température de surface de référence au centre de la paroi est donc donnée par :

$$T_s = \frac{(T_2 - T_1) \times (e - x_1)}{x_2 - x_1} + T_1$$

Cette méthode suppose l'étalonnage préalable des deux capteurs de température ainsi que la détermination des positions respectives x_1 et x_2 où les températures T_1 et T_2 sont mesurées.

La méthode présentée au paragraphe suivant constitue une alternative simplifiée à cette méthode de mise en œuvre et d'exploitation complexe.

7.2.2. Cas où le bloc est équipé d'un seul capteur

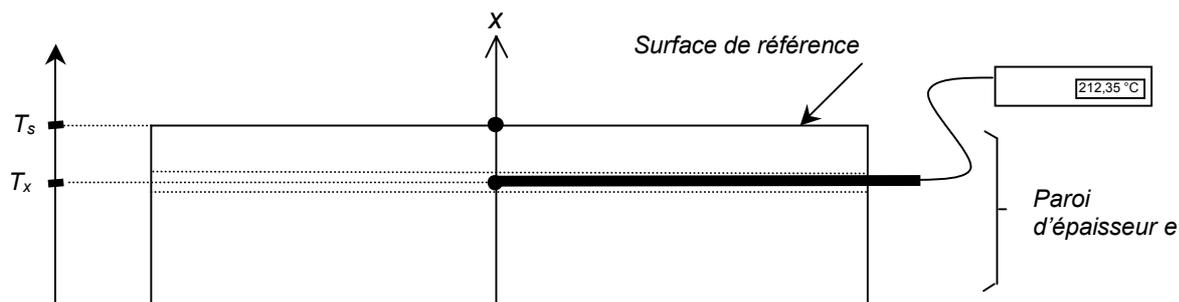


Figure 4 : Détermination de la température de surface au moyen d'un seul capteur

La présence d'un seul capteur dans le bloc (Figure 4) ne permet pas la connaissance de la température de surface par extrapolation ; seule une caractérisation de l'ensemble du dispositif permet de déterminer cette température. Le capteur associé au dispositif est étalonné et ne doit pas être remplacé par un autre.

La température de surface est donc déterminée par un raccordement préalable du générateur de température de surface.

La caractérisation du dispositif permet de déterminer, pour une température donnée, la différence de température $\delta T_x = T_x - T_s$ entre les épaisseurs e et x du centre du bloc.

La température de surface de référence au centre de la paroi est donc donnée par :

$$T_s = T_x - \delta T_x$$

7.3. MODE OPERATOIRE

L'opérateur s'assure que les conditions requises pour l'étalonnage sont réunies (conditions spécifiques définies au § 6.).

Avant de débiter l'étalonnage, l'opérateur contrôle le bon état apparent de l'élément sensible du capteur de température de surface et sa propreté et suit le mode opératoire une première fois afin de se familiariser avec le capteur à étalonner ; les mesures ne sont pas retenues.

L'étalonnage débute à la température la plus élevée. Pour chaque température nominale d'étalonnage, le mode opératoire proposé ci-après correspond au mode opératoire minimum :

Cas des capteurs amovibles :

- a. détermination de la température de surface de référence (cf § 6.2.) – série de 3 mesures sans capteur appliqué (s'assurer préalablement que le régime thermique du dispositif est établi, sans capteur appliqué) ;
- b. préchauffage du capteur de la chaîne de mesure de température de surface à étalonner par application sur la paroi – 15 minutes minimum (un dispositif mécanique, pince par exemple, est conseillé) ;
- c. lecture de la chaîne de mesure de température de surface à étalonner : le capteur est maintenu sur la surface manuellement dans l'orientation optimum permettant la lecture de la température la plus élevée – série de 3 lectures entre lesquelles le capteur est brièvement retiré et de nouveau appliqué ;
- d. retrait du capteur de température de surface et attente du retour de la surface de référence à des conditions thermiques stables comparables à celles de l'étape a ;
- e. réitérer l'étape a.

Il est nécessaire de répéter l'ensemble du mode opératoire 2 fois à la température la plus élevée afin d'apprécier la reproductibilité de l'instrument étalonné.

Cas des capteurs fixes :

- a. détermination de la température de surface de référence (cf § 7.2.) – série de 3 mesures sans capteur appliqué (s'assurer préalablement que le régime thermique du dispositif est établi, sans capteur appliqué) ;
- b. appliquer le capteur associé à son dispositif sur la surface et attendre son préchauffage durant au moins 15 minutes ;
- c. lecture de la chaîne de mesure de température de surface à étalonner - série de 3 lectures ;
- d. retrait du capteur de température de surface et attente du retour de la surface de référence à des conditions thermiques stables comparables à celles de l'étape a ;
- e. réitérer l'étape a.

Il est nécessaire de répéter l'ensemble du mode opératoire 2 fois à la température la plus élevée afin d'apprécier la reproductibilité de l'instrument étalonné.

7.4. EXPRESSION DU RESULTAT

L'étalonnage des chaînes de mesure de température de surface consiste à déterminer, pour une température nominale donnée, la valeur de la correction C à appliquer aux lectures de l'instrument.

Dans la suite du document, on fera l'hypothèse d'un dispositif équipé d'un seul capteur (cas le plus fréquent des dispositifs existants).

L'expression de la correction est donnée par :

$$C = \underbrace{\bar{T}_x - \delta T_x + c_{stab} + c_{hom} + c_d}_{\text{température de surface}} - \underbrace{(\bar{T}_{lue} + c_{rés})}_{\text{instrument étalonné}} + \underbrace{(c_{mat} + c_{cond.amb} + c_{op})}_{\text{méthode}}$$

avec :

\bar{T}_x température moyenne mesurée à l'épaisseur x du centre du bloc (moyenne entre les mesures des étapes a. et e. identifiées au § 7.3.)

δT_x écart de température entre la lecture de la température dans la paroi et la surface (grandeur déterminée par caractérisation du générateur de température de surface)

c_{stab} terme correctif lié à la stabilité de la température de surface au centre du bloc

c_{hom} terme correctif lié à l'homogénéité de la température de surface en différents points du bloc

c_d terme correctif lié à la dérive du capteur de température associé au dispositif générateur de températures de surface

\bar{T}_{lue} température moyenne lue sur la chaîne de mesure de température de surface à étalonner

$c_{rés}$ terme correctif lié à résolution de la chaîne de mesure de température de surface à étalonner

c_{mat} terme correctif lié à la conductivité thermique du matériau constituant la paroi

$c_{cond.amb}$ terme correctif lié aux variations de température ambiante au cours de l'étalonnage

c_{op} terme correctif lié à l'effet de l'opérateur (traduisant la capacité de celui-ci à retrouver le même résultat de mesure)

7.5. DETERMINATION DE L'INCERTITUDE D'ETALONNAGE

L'incertitude d'étalonnage correspond à l'incertitude sur la détermination de la correction C. Le résultat est annoncé à 2 incertitudes-types.

Les différents termes constituant l'expression n'étant pas corrélés entre eux, la formule de propagation des incertitudes appliquée au modèle de correction donne :

$$u(C) = 2 \times \sqrt{u^2(\bar{T}_x) + u^2(\delta T_x) + u^2(c_{stab}) + u^2(c_{hom}) + u^2(c_d) + u^2(\bar{T}_{lue}) + u^2(c_{rés}) + u^2(c_{mat}) + u^2(c_{cond.amb}) + u^2(c_{op})}$$

Les différents termes d'incertitude-type peuvent être déterminés de la façon suivante :

- $u(\bar{T}_x)$ écart-type expérimental
- $u(\delta T_x)$ détermination à partir des résultats de la caractérisation du dispositif
- $u(c_{stab})$ estimation à partir des résultats de la caractérisation du dispositif
- $u(c_{hom})$ estimation à partir des résultats de la caractérisation du dispositif
- $u(c_d)$ détermination par analyse de résultats d'étalonnage successifs du capteur de température placé dans la paroi
- $u(\bar{T}_{lue})$ écart-type expérimental
- $u(c_{rés})$ estimation à partir de la résolution R de l'appareil : $R/(2 \cdot \sqrt{3})$ (la résolution obéit à une loi de type uniforme)
- $u(c_{mat})$ l'estimation de cette incertitude-type repose sur un modèle d'évolution de la correction d'étalonnage des capteurs de température de surface en fonction de la conductivité thermique, ainsi que sur la détermination de la gamme de conductivité thermique correspondant au matériau considéré - les incertitudes-types à prendre en compte pour ces matériaux sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Incertitude-type liée à la nature du matériau

Température	$u(c_{mat})$ (°C)	
	Aluminium	Acier inoxydable
≤ 100 °C	0,18	0,34
≤ 200 °C	0,36	0,67
≤ 300 °C	0,54	1

- $u(c_{cond.amb})$ l'estimation de cette incertitude-type repose sur la détermination de l'influence de la température ambiante sur la température lue sur l'instrument à étalonner, soit :

$$u(c_{cond.amb}) = \left(T_{\text{ambiante max}} - T_{\text{ambiante min}} \right) \times \left(\frac{C_{T_s=T_{max}} - C_{T_s=T_{amb}}}{T_{max} - T_{amb}} \right) \times \frac{1}{2\sqrt{3}}$$

$$u(c_{cond.amb}) = 0,013 \times \left(T_{\text{ambiante max}} - T_{\text{ambiante min}} \right) \quad (\text{configuration la plus pessimiste})$$

$u(c_{op})$ estimation lors de la caractérisation de la méthode (incertitude-type liée à l'effet du changement d'opérateur ou de la capacité d'un même opérateur à retrouver le même résultat de mesure - écart-type expérimental par exemple)

7.6. PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats d'étalonnage sont présentés dans un certificat d'étalonnage conforme au document FD 07-012 [4].

Conformément à ce qui est indiqué dans ce document, les éléments suivants doivent figurer dans le certificat d'étalonnage :

- les conditions spécifiées, en particulier la surface de référence utilisée et les conditions d'environnement ;
- dans le tableau final, la surface associée à chaque résultat doit être rappelée.

7.7. EXEMPLES

Exemple 1 : étalonnage du capteur 'A' à 200°C sur une surface en aluminium

Il s'agit d'un capteur amovible étalonné à la température nominale de 200°C dans un laboratoire où la température est maintenue à (20 ± 2) °C. La correction et son incertitude associée présentés dans le Tableau 3 correspondent typiquement aux résultats généralement obtenus à ces niveaux de température, déjà élevées pour ce type de capteurs. Les composantes d'incertitude contribuant majoritairement à l'incertitude finale sont liées au moyen d'étalonnage, à la répétabilité du capteur, à la nature du matériau, à l'effet opérateur.

Tableau 3 : Budget des incertitudes relatif à l'étalonnage du capteur de température de surface A.

Grandeur (X_i)	Résultat (x_i)	Loi de probabilité	Etendue	Incertitude-type $u(x_i)$	Coeff. De sensibilité (c_i)	Composante d'incertitude $ c_i \cdot u(x_i) $
\bar{T}_x	198,84	normale (s)	/	0,22	1	0,22
δT_x	-0,73	U/k	/	0,40	-1	0,40
C_{stab}	0,0	normale (s)	/	0,73	1	0,73
C_{hom}	0,0	uniforme	1,4	0,40	1	0,40
C_d	0,0	uniforme	0,2	0,06	1	0,06
\bar{T}_{lue}	195,2	normale (s)	/	0,41	-1	0,41
$C_{rés}$	0,0	uniforme	0,1	0,03	-1	0,03
C_{mat}	0,0	uniforme	cf guide 1	0,36	1	0,36
$C_{cond.amb}$	0,0	uniforme	0,18	0,05	1	0,05
C_{op}	0,0	normale (s)	/	0,24	1	0,24
Grandeur (Y)	Résultat (y)				Incertitude élargie $\left(U = 2 \times \sqrt{\sum [c_i \cdot u(x_i)]^2} \right)$	
C	4,4 °C				2,5 °C	

Exemple 2 : étalonnage du capteur 'A' de 30°C à 300°C

Les résultats issus de l'étalonnage du capteur A de l'exemple 1 sont présentés dans le Tableau 4 et la Figure 5 ci-dessous. Pour la majorité des capteurs de surface :

- la correction d'étalonnage est de signe positif et augmente de façon régulière lorsque la température de surface augmente ;
- la correction issue d'un étalonnage sur une paroi en acier inoxydable est plus élevée que celle issue d'un étalonnage sur une paroi en aluminium.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des résultats d'étalonnage du capteur de température de surface A

Nature de la surface	Température de surface de référence	Température lue sur la chaîne de mesure de température à étalonner	Correction à ajouter aux lectures de la température	Incertitude sur la détermination de la correction $\pm U$ (k=2)
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
aluminium	30,6	30,3	0,3	0,9
aluminium	99,9	98,6	1,3	1,9
aluminium	199,6	195,2	4,4	2,5
aluminium	299,1	290,9	8,2	3,2
acier inoxydable	30,4	30,0	0,4	1,2
acier inoxydable	99,7	98,1	1,6	2,4
acier inoxydable	199,5	193,8	5,7	3,3
acier inoxydable	298,8	287,9	10,9	4,5

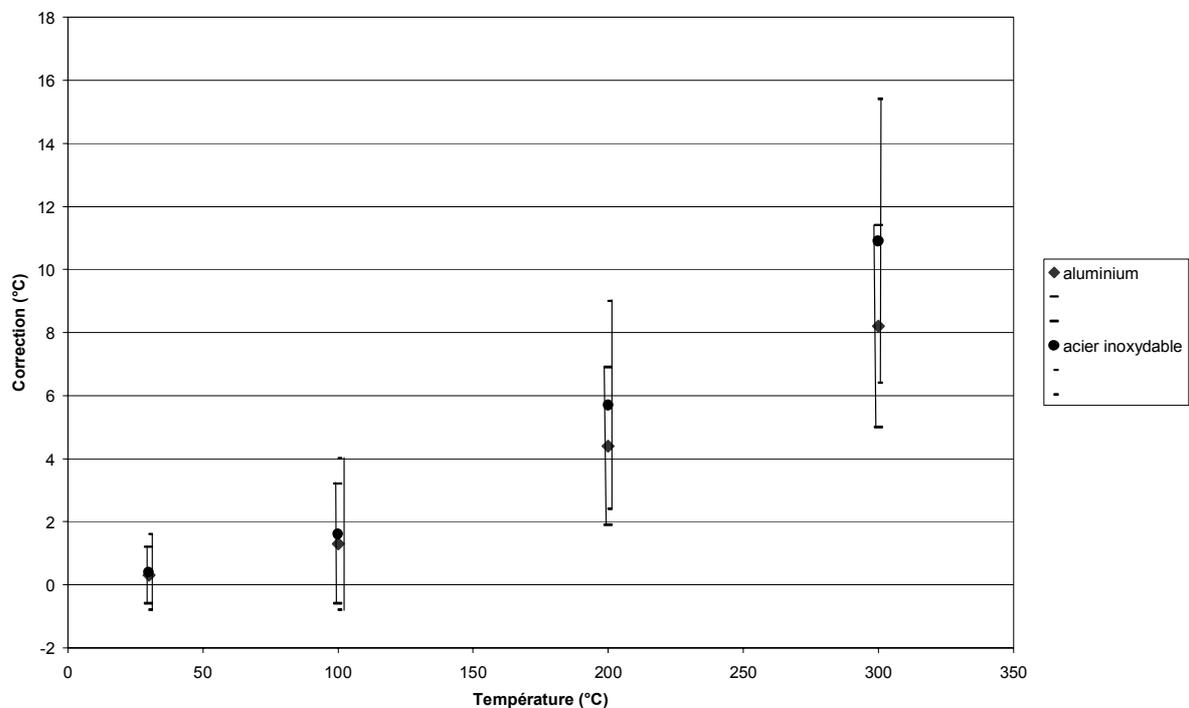


Figure 5 : Correction d'étalonnage du capteur A en fonction de la température de surface (aluminium et acier inoxydable)

Exemple 3 : Cas d'un capteur sortant des critères de l'étalonnage

Les résultats obtenus au moyen d'un capteur de température de surface sortant des critères d'étalonnage définis au paragraphe 6.3. du présent document sont présentés Figure 6.

Dans ce cas, cet instrument n'est pas considéré comme un instrument de mesure. En conséquence les résultats obtenus ne peuvent faire l'objet d'un certificat d'étalonnage. Ils pourront être reportés dans un rapport d'essai.

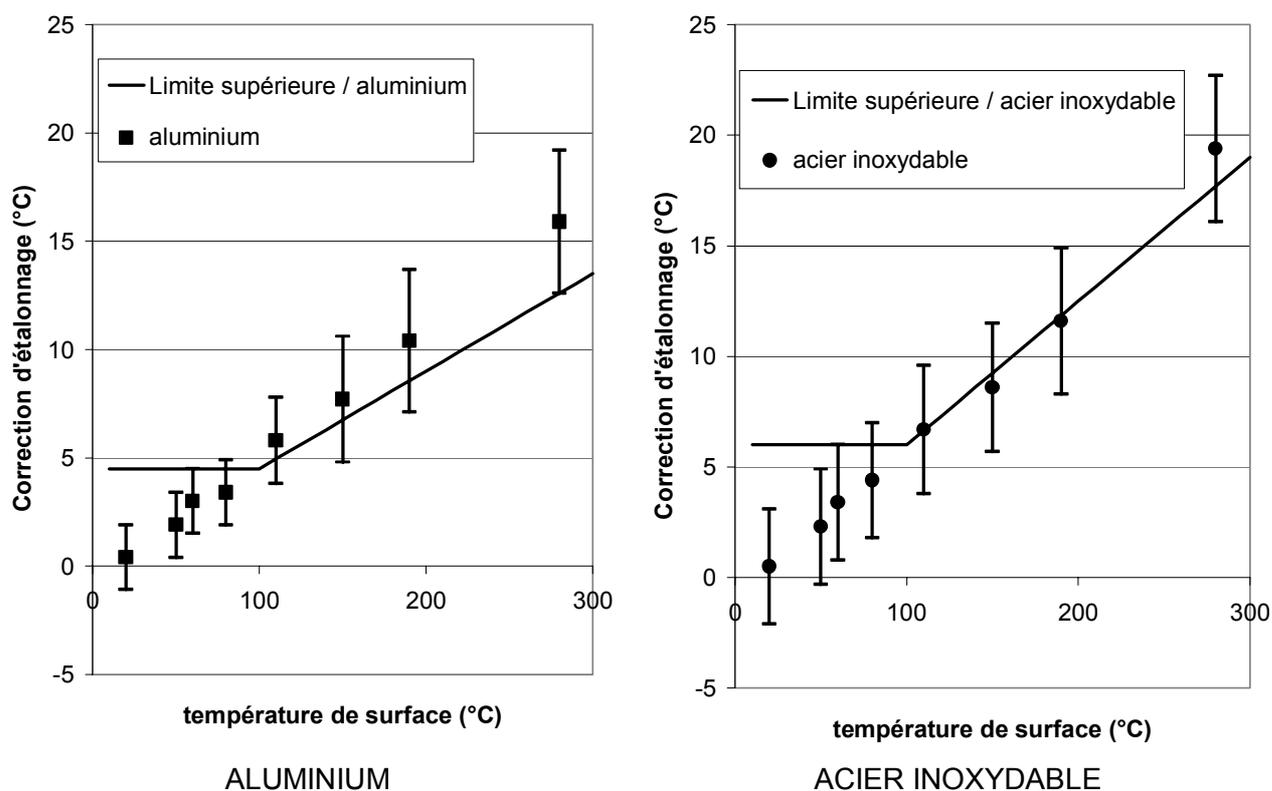


Figure 6 : Correction d'étalonnage d'un capteur de température de surface en fonction de la température de surface, cas d'un capteur sortant des critères admissibles

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF X 07-001 – Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de Métrologie
- [2] NF ENV 13005 – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
- [3] NF EN ISO 10012 – Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure
- [4] FD X 07-012 – Métrologie – Certificat d'étalonnage des moyens de mesure
- [5] NF EN 60751 – Capteurs industriels à résistance thermométrique de platine
- [6] NF EN 60584-1 – Couples thermoélectriques – Partie 1 : Tables de référence
- [7] FD X 07-029 – Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres - Partie 2 : procédure d'étalonnage et de vérification des couples thermoélectriques seuls et des thermomètres à couple thermoélectrique
- [8] NF EN ISO 7730 – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique
- [9] NF EN 13202 - Ergonomie des environnements thermiques - Températures des surfaces tangibles chaudes - Lignes directrices pour la fixation de valeurs limites de température de surface dans les normes de produit à l'aide de l'EN 563
- [10] NF EN 563 - Sécurité des machines - Températures des surfaces tangibles - Données ergonomiques pour la fixation de températures limites des surfaces chaudes
- [11] Document COFRAC 2266 : Guide technique pour un dossier d'accréditation température
- [12] Document COFRAC 2066 : Exigences spécifiques de la CPA Température
- [13] Comparison of the reference surface apparatus at NMIs by comparison of transfer surface temperature standards, Rapport final de la comparaison du projet Euromet 635, nov. 2003
- [14] Document R2730 (Techniques de l'Ingénieur) : Température de surface – Mesure par contact, 09-1998
- [15] R. Morice, E. Devin, La mesure par contact des températures de surface : étalonnage des capteurs de surface et traçabilité des mesures, Actes du congrès Français de Thermique SFT2000, Lyon, mai 2000
- [16] R. Morice, E. Andras, E. Devin, T. Kovacs, Contribution to the calibration and use of surface temperature sensors, Actes du congrès Tempmeko'01, Berlin, janvier 2001
- [17] Cooperation report : uncertainty in calibration of surface contact sensors, Rapport BNM, août 2001.
- [18] E. Andras, R. Morice & al, Interlaboratory comparison of reference surface temperature apparatus at NMIs, Proceedings of Tempmeko 2004, publication en cours.
- [19] Guide d'utilisation des capteurs de température de surface – Validation de la méthode par des cas concrets d'application en milieu industriel, guide 2, nov 2004.