

Good practices for the implementation of surface temperature measurements / Bonnes pratiques pour la mise en œuvre des mesures de températures de surface

JO. Favreau ^a, E. Geogin, B. Savanier

Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT), 25 Av. des Arts, 69603 Villeurbanne, France

Abstract. This paper presents physical principles involved and main errors encountered when performing surface temperature measurements, in contact thermometry. Two concepts are defined: direct temperature measurements where the objective is to evaluate the surface temperature that prevailed prior to the application of the sensor and indirect measurements using surface sensors to assess, for example, the internal temperature of a fluid flowing in a pipe or within a wall. It is important to define the quantity of interest, *i.e.* the measurand, because the same sensor can be used but implemented differently. For example, for direct measurement, sensors can be calibrated on surface temperature calibrator and should be applied directly on the surface that should be measured. Whereas, for indirect measurements, improving the thermal contact can be achieved by using a thermal dough or sensor insulation and calibration should be realized on site. To illustrate these situations and these phenomena, various measurements of industrial surface temperature are provided. For example, it is important, in an industrial mixing process, to control the mixer surface temperature to ensure the quality of the finished mixed product. The temperature of the machine housings has also to be controlled to prevent the risk of burns. Energy audits can also be based on such measures. Surface temperature sensors are more and more present in the controls of heating and air-conditioning systems such as heat pumps, boilers ... Surface temperature often help saving time during manufacturing and during maintenance operations. Over the past decade, the performances of such sensors has been much improved.

This article outlines the precautions and best practices for implementation of the contact temperature sensors. The environmental effects are studied in order to quantify the impact on the measurements. The concepts developed by Bardon, Cassagne and Sacadura are used to explain the effects present at the interface. The effects of an air flow, the radiation, thermal conductivity of the wall, the fixing system of the sensor are studied for an optimal implementation of relevant solutions. The paper offers an overview of current implementations techniques and possible performance levels.

1 Introduction

Pour des raisons de facilité/commodité d'installation et économique, les capteurs de températures de surface, en thermométrie de contact, sont largement utilisés dans l'industrie. En raison d'importantes erreurs de mesures constatées par les utilisateurs, les laboratoires nationaux de métrologie ont développé de nouvelles références adaptées à ce type de mesures. Le LNE pour la France a développé en 2003 deux générateurs de température permettant l'étalonnage des capteurs de température de surface [1]. Ces moyens ont conduit à l'amélioration de l'étalonnage et une réduction des erreurs de justesse de ce type de chaîne de mesures. En parallèle, la qualité métrologique de ces capteurs s'est largement améliorée. Toutefois, leur mise en œuvre présente encore quelques difficultés [2]. Afin d'apporter des éléments de réponse, un guide de bonnes pratiques a été rédigé par le

CETIAT [3]. Il permet aux utilisateurs de mieux comprendre les principes physiques mis en jeu ainsi que les principaux facteurs d'influence susceptible de perturber la mesure. Les capteurs de température de surface, en thermométrie de contact, sont utilisés soit pour connaître la température d'une surface avant l'application du capteur; soit pour déterminer la température, d'une zone ou d'un fluide, dont l'accès direct est impossible. Il est important de bien définir l'objectif final de mesure, *i.e.* le mesurand [4], car les effets pouvant perturber la mesure ainsi que les bonnes pratiques de mise en œuvre peuvent être différents. Dans cet article sont rappelés succinctement les principes et les pratiques présentées dans le guide.

^a Corresponding author : jacques-olivier.favreau@cetiat.fr

2 Principes physiques mis en œuvre

L'idée même de température de surface en thermométrie de contact pose problème. Le concept de température peut être associé à l'agitation des particules d'un volume élémentaire constituant le milieu. Plus la vitesse d'agitation des particules considérées est grande, plus la température du milieu sera élevée. Alors comment définir la température d'une interface solide/air? Pourtant, il est possible de réaliser des mesures de température de surface avec des capteurs de contact!

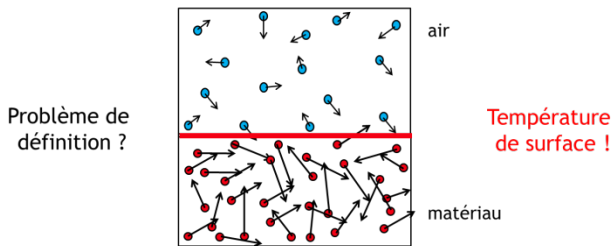


Figure 1: Définition de la température de surface basée sur le concept de l'agitation moléculaire. La partie supérieure représente les molécules d'air, la ligne matérialise l'interface avec le solide sur la partie inférieure.

Pour définir la température de surface nous faisons l'approximation que la température surfacique correspond à celle d'un volume élémentaire appartenant au milieu solide situé à l'interface avec l'air ambiant, tel que présenté sur le schéma ci-dessous:

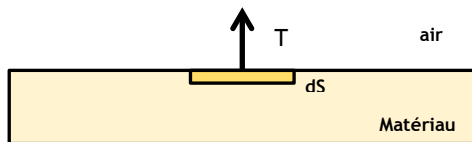


Figure 2 : Représentation d'un volume élémentaire situé à l'interface avec l'air appartenant au solide. La température de surface (T_s) correspond à celle de ce volume.

Ce volume est soumis aux transferts thermiques de conduction, de convection et de rayonnement que l'on retrouve classiquement dans les problèmes de thermique. A ces effets vont se rajouter des phénomènes spécifiques pouvant conduire à des erreurs de mesure sur la température surfacique; ceux-ci ont notamment été décrits par Bardon et Cassagne [5, 6, 7, 8].

La macro constriction consiste en une déformation locale des isothermes de température du milieu solide en raison de l'application du capteur. Le capteur va favoriser, localement, l'échange de chaleur en intensifiant le flux vers la surface où a été appliqué le capteur (voir Figure 3). Cet effet va contribuer à abaisser, ou à augmenter, la température du milieu en favorisant les échanges avec le milieu ambiant via le capteur.

La résistance thermique de contact entre le matériau et le capteur est liée au contact non idéal (rugosité notamment) entre la surface à mesurer et l'élément sensible du capteur; la résistance thermique s'opposant à la diffusion de la chaleur. Cet effet s'oppose à la macro-constriction.

L'effet d'ailette (radiateur) est lié à l'augmentation de la surface d'échange entre la gaine (du capteur) et l'air favorisant le refroidissement du capteur.

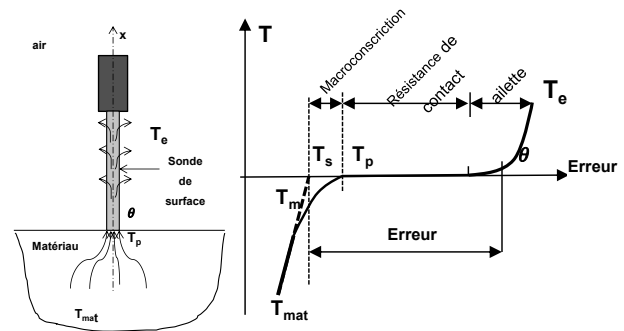


Figure 3 : Schéma des trois effets parasites lors des mesures de température de surface.

L'effusivité thermique, présentée par Sacadura [9], caractérise la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement. Cette propriété justifie la difficulté de mesurer la température de surface d'un matériau isolant avec cette technique. Plus le matériau est isolant moins il laissera passer le flux de chaleur. Sur un isolant l'erreur de mesure est trop importante pour être représentative de la température de contact. Les mesures de température surfacique en thermométrie de contact auront une erreur d'autant plus grande que la conductivité thermique sera faible.

2.1 Mesures "directes" de température de surface

Ce paragraphe traite des mesures dites "directes" de température de surface. On cherche à mesurer la température qui régnait sur une surface avant l'application du capteur.

Lorsque l'on souhaite mesurer une température surfacique par contact direct, il faudra s'assurer d'un état de surface du matériau correct: propreté, limiter la présence de rugosités ou d'aspérités, ainsi que de peinture ou de vernis...etc... Pour ce type de mesure, l'utilisation de pâte thermique est déconseillé en raison de la modification de l'état de la surface conduisant à : une diminution de la résistance thermique et une augmentation de la macro constriction.

Dans ce type de mesure les effets de convection, de conduction et de rayonnement vont influencer la mesure, il faudra veiller à les limiter en utilisant des déflecteurs et des écrans thermiques.

Le thermomètre utilisé devra être le plus possible "transparent" sur le plan thermique. Privilégier les thermomètres ayant une masse thermique faible et un temps de réponse rapide. Les couples thermoélectriques sont souvent utilisés en raison de leur robustesse, ils présentent en outre l'avantage d'avoir une zone de mesure située directement au niveau de la jonction chaude. Il peut être également noté que des capteurs récents équipés

de Pt 100 de petite dimension produisent des résultats intéressants.

2.2 Mesures "indirectes" de température de surface

Ce paragraphe traite des mesures dites "indirectes" de température de surface. Dans cette configuration, le capteur est utilisé pour déterminer la température, d'une zone ou d'un fluide, dont l'accès direct est impossible. Par exemple, il peut s'agir de mesurer la température interne d'une canalisation d'eau ou de l'intérieur d'une pompe... Les utilisateurs ont recours à cette méthode pour des raisons techniques, telles que parois trop fines ou pas/peu accessibles, ou économiques, telles que installation facile, rapide.

Par contre la mise en œuvre de ces capteurs nécessite un certain nombre de précautions. Pour ce type de mesure on cherchera en premier lieu à isoler le capteur de l'environnement extérieur. En effet, l'objectif est d'être le plus proche possible de la température du milieu et non d'être à celle de l'interface qui régnait avant l'application du capteur. L'utilisateur cherchera à améliorer le contact thermique, en rajoutant par exemple de la pâte thermique tout en veillant à ce qu'il n'y en est pas de trop. L'apport de la pâte vise à combler l'air des cavités présentes en raison de la rugosité des surfaces en contacts (capteur, matériau). La pâte thermique, quoique plus conductrice que l'air, reste malgré tout plus isolante que l'inox!

3 La représentativité de la mesure

Les capteurs de température de contact peuvent être étalonnés sur des générateurs de température de surface de référence [9] ou par immersion dans des bains thermostatés. L'étalonnage permet d'obtenir la correction à appliquer aux mesures ainsi que l'incertitude associée.

Dans le cas d'un étalonnage, d'un capteur de température de contact, sur un générateur de surface l'incertitude sera typiquement d'environ 1 °C pour une consigne de température de l'ordre de 100 °C. L'intérêt de cet étalonnage est que la correction ainsi délivrée prend en compte l'effet de la méthode et celui des conditions de mise en œuvre (matériaux, conductivité, position, environnement...). Lors de l'utilisation du capteur en situation de mesures industrielles, la correction à appliquer ainsi que l'incertitude seront alors très voisines de celles obtenues lors de l'étalonnage.

Dans le cas d'un étalonnage "classique", d'un capteur de température de contact, en immersion l'incertitude sera typiquement inférieure à 0,1 °C pour une consigne de 100 °C. Cet étalonnage permettra seulement de déterminer l'erreur instrumentale intrinsèque au capteur. Les effets liés à la mise en œuvre du capteur et son environnement de mesure devront être pris en compte lors de l'évaluation des résultats de mesures en situation

industrielles. . Ainsi, à la correction d'étalonnage seront ajoutées celles décrites au paragraphe 2.

L'omission de l'application des corrections dues aux conditions de mise en œuvre peut conduire à des erreurs de mesures significatives. Il est donc important que les conditions d'étalonnage soient les plus proches possibles de celles des mesures finales, pour limiter le risque d'erreur.

Pour les mesures directes, l'étalonnage sur générateurs paraît adapté, pour les mesures indirectes, cela dépendra des situations. On veillera à réaliser ces étalonnages dans des conditions représentatives des mesures finales, condition d'environnement, état de surface, isolation thermique, utilisation de pâte thermique, position...

4 Conclusions

Les mesures de températures surfaciques en thermométrie de contact font intervenir des effets thermiques spécifiques. Il est important, avant le déploiement des capteurs, de bien identifier l'objet de la mesure et son environnement. Bien que les capteurs puissent être identiques, leurs mises en œuvre devront être adaptées soit aux mesures de type direct soit de type indirect. Les mesures directes étant généralement manuelle l'effet opérateur sera important, la paroi sera non modifiée. Il est judicieux d'étalonner ces capteurs sur des générateurs de surface pour en optimiser l'utilisation.

Les mesures "indirectes", demanderont la modification de la surface par la pose de pâte thermique, d'isolant et de systèmes de fixation. Ces mesures, demandent une attention particulière sur l'influence des conditions de mise en œuvre sur les mesures. En fonction des possibilités d'étalonnage des corrections supplémentaires sont à réaliser.

Ces mesures restent encore délicates avec des incertitudes relativement importantes. Toutefois l'application de "bonnes pratiques" permettra encore d'améliorer la qualité de ces mesures qui sont de plus en plus utilisées.

Références

1. E.Andras - Tempmeko 1017 - 1023 (2004) – Interlaboratory comparison of reference surface temperature apparatus at NMIs
2. R.Morice - Guide LNE (téléchargeable sur le site du LNE) - Guide d'utilisation des capteurs de surface
3. JO.Favreau - Guide CETIAT (téléchargeable sur le site du Cétiat) – Mesure des températures par thermométrie de contact de surface Guide des bonnes pratiques industrielles
4. JCGM 200 - Vocabulaire international de métrologie (VIM 3e édition) 2012 – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés
5. B.Cassagne, G.Kirsch, J-P.Bardon - Int. J. Heat Mass Transfer – vol.23; pp1207-1217 (1980) - Analyse théorique des erreurs liées aux transferts de chaleur

parasites lors de la mesure d'une température de surface par contact

6. B.Bourouga ; J-P Bardon - hr. J. Hem Mass Transfer. Vol. 35, No. 2, pp. 361-373 (199)2 - 0017-9310 - Mesures des résistances thermiques superficielle et de contact au moyen de la constante de temps fondamentale
7. J-P Bardon, M. Raynaud, Y.Scudeller - Rev Gén Therm (HS95) 34 pp 15-35 – Mesures par contact des températures de surface
8. J-P. Bardon, B.Cassagne - Techniques de l'Ingénieur- r2730 pp 1-22(1981) - Température de surface - Mesure par contact
9. J-F Sacadura - Tec & Doc Lavoisier 445-446 (2000) - Initiation aux Transferts thermiques
10. F. Arpino • V. Fericola • A. Frattolillo • L. Rosso - Int J Thermophys 30 : 306-315 DOI 10.1007/s10765-008-0451-8 (2009) - A CFD Study on a Calibration System for Contact Temperature Probes
11. Norme NF EN ISO 13732-1- relative aux méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces