

MESURE DES TEMPÉRATURES DE SURFACE PAR THERMOMÉTRIE DE CONTACT

GUIDE DES BONNES PRATIQUES INDUSTRIELLES



Jacques-Olivier Favreau
Chargé d'études et de formation
Pôle Mesures et Instrumentation du CETIAT

Cet ouvrage a été publié en octobre 2015 dans le cadre d'une action collective du Cetiati.

Merci aux membres du groupe de travail "Mesures et Instrumentation", issus des sociétés :

ALDES
ATLANTIC
CARRIER
CIAT
DE DIETRICH
FRISQUET
TRANE

ainsi qu'à EDF qui a cofinancé ce travail.

Merci aux collègues qui m'ont aidé à la rédaction de ce guide :

François DURIER
Eric GEORGIN

Les illustrations de ce guide proviennent du CETIAT sauf indication contraire.

Préface

La mesure de température fait partie de notre quotidien ; en cuisine, pour diagnostiquer une maladie, pour choisir nos vêtements en fonction de la météo.... Mesurer une température, quoi de plus simple !

Il suffit d'utiliser un thermomètre et le tour est joué !

A y regarder de plus près, cette mesure courante pose cependant des problèmes. L'environnement, la qualité du capteur font qu'une mesure de température n'est pas si simple à réaliser.

Que veut-on mesurer ? Avec quelle précision ? La température est-elle stable ? Mon instrument est-il juste ? Comment vais-je m'y prendre ?

Comme pour toute mesure, il ne suffit pas d'avoir un chiffre, encore faut-il être capable d'indiquer la fiabilité du résultat obtenu (incertitude de mesure).

Il est primordial de se poser ces questions avant la réalisation d'une mesure, dont découlera la pertinence des décisions prises en fonction du résultat.

Les mesures de température de surface, cas particulier, permettent une utilisation facilitée des thermomètres. Un capteur de surface est plus rapide et simple à implanter sur une machine qu'un capteur immergé par exemple. Les mesures de température de surface sont de plus en plus utilisées en production industrielle.

Le présent guide ne prétend pas répondre à tous les cas de figure rencontrés mais en ce qui concerne les mesures des températures de surface, il permet de s'interroger sur les méthodes employées et de faire un choix plus judicieux.

Nos remerciements donc au CETIAT et plus particulièrement à Jacques-Olivier FAVREAU et au Groupe de Travail "Mesures et Instrumentation" qui ont permis à cet ouvrage de voir le jour.

Pierre HENRY (CIAT)

Président du GT "Mesures et Instrumentation"
du CETIAT

Sommaire

- 1. Introduction : Le contexte7
 - 1.1. Définition du besoin : mesures directes / indirectes8
 - 1.2. Exemples industriels de mesures de température de surface 10
 - 1.2.1. Exemples de mesures directes10
 - 1.2.2. Exemples de mesures indirectes.....13
- 2. Éléments théoriques 15
 - 2.1. Flux thermiques15
 - 2.1.1. Conduction thermique:15
 - 2.1.2. Convection thermique16
 - 2.1.3. Rayonnement.....16
 - 2.2. Notion de température17
 - 2.2.1. Définition empirique de la température17
 - 2.2.2. Température de surface ou mesure à l'interface matériau / air18
 - 2.3. Effets parasites des mesures de contact 19
- 3. Capteurs et considérations pratiques23
 - 3.1. Technologies disponibles23
 - 3.1.1. Les sondes à résistance de platine (Pt100).....23
 - 3.1.2. Les couples thermoélectriques ou thermocouples.....24
 - 3.1.3. Les thermistances à coefficients négatifs (CTN).....24
 - 3.1.4. Autres technologies.....25
 - 3.2. Représentativité des mesures27
 - 3.3. Traçabilité des mesures.....29
 - 3.3.1. Exemple 1 : étalonnage par immersion31
 - 3.3.2. Exemple 2 : étalonnage sur générateur de température de surface31
 - 3.3.3. Synthèse31
- 4. Bonnes pratiques de mise en oeuvre33
 - 4.1. Mise en œuvre des mesures de température de surface directes.....33
 - 4.1.1. Influence des effets parasites lors des mesures directes.....33
 - 4.1.2. Effet de l'environnement.....35
 - 4.1.3. Amélioration de la mesure.....38
 - 4.1.4. Choix du capteur de mesure39
 - 4.1.5. Traçabilité / étalonnage41
 - 4.1.6. L'effet de l'opérateur41
 - 4.1.7. Conclusion41
 - 4.2. Mise en œuvre des mesures de température de surface indirectes42
 - 4.2.1. Influence des effets parasites lors des mesures indirectes42
 - 4.2.2. Effet de l'environnement.....44
 - 4.2.3. Amélioration de la mesure.....45
 - 4.2.4. Choix du capteur de mesure48
 - 4.2.5. Traçabilité / étalonnage51

4.2.6.	L'effet de l'opérateur	51
4.2.7.	Conclusion	51
5.	Annexes	52
5.1.	Photos de capteurs en situation industrielle	52
5.2.	Exemples de chaînes de mesure de températures de surface directes	53
5.3.	Calcul de la chute de température à travers une paroi.....	54
5.3.1.	Données expérimentales :.....	54
5.3.2.	Schéma de principe de la mesure de température de contact	54
5.3.3.	Mode opératoire	55
5.3.4.	Modèle physique de détermination de la température de l'eau	55
5.3.5.	Calcul de la chute de température dans la paroi (Cdep).....	55
5.3.6.	Application numérique.....	56

1. INTRODUCTION : LE CONTEXTE

Ce guide des bonnes pratiques concerne les mesures de température de surface en thermométrie de contact. Il résulte d'une action collective menée par le CETIAT pour le compte de ses adhérents industriels. Il vise à présenter les mises en œuvre de ce type de mesures en milieu industriel.

Préalablement à la rédaction de ce guide, une enquête a été réalisée auprès des industriels ressortissants du CETIAT. Les dix-neuf réponses reçues (voir figure 1) ont permis d'évaluer les types de capteurs utilisés ainsi que les étendues de températures rencontrées.

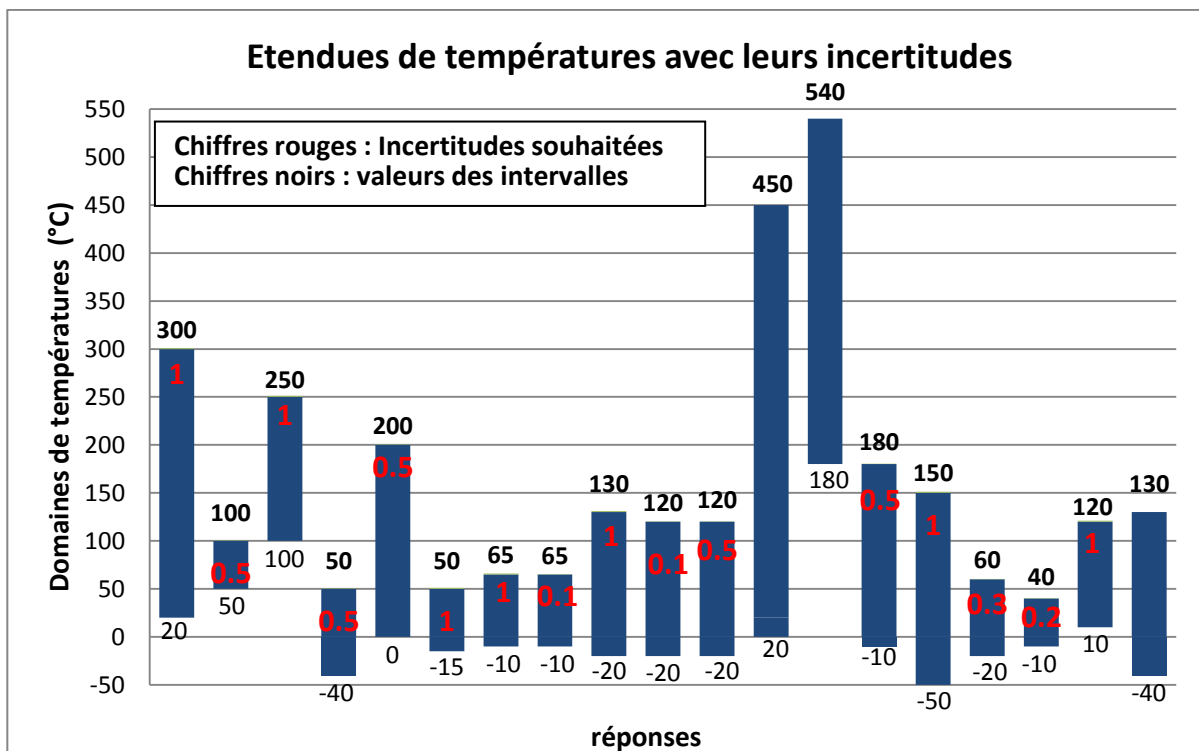


Figure 1 : Graphique issu du sondage réalisé en 2013 par le CETIAT

Trois types de capteurs sont concernés par ce guide :

- Les sondes à résistance de platine (Pt 100)
- Les thermistances (CTN)
- Les couples thermoélectriques (thermocouples de type K, J, N,T,...)

Les objectifs consistent à diffuser les bonnes pratiques concernant la mise en œuvre de cette méthode de mesures¹, ainsi qu'à indiquer les niveaux de performance possibles selon les conditions d'environnement (facteurs d'influence). Nous traiterons ici des capteurs de température de surface en thermométrie de contact, excluant ainsi la thermométrie sans contact (employant des thermomètres infra-rouge par exemple). Dans la suite du document, nous utiliserons l'expression "**capteurs de surface**" pour désigner les capteurs de température de contact utilisés pour mesurer une température surfacique.

1.1. Définition du besoin : mesures directes / indirectes

Que cherche-t-on à mesurer ? Mesures directes ou mesures indirectes ?

Les mesures de température sont employées depuis longtemps par les industriels ; l'un des exemples les plus emblématiques est celui de la mesure de la température d'eau à l'entrée et à la sortie d'un échangeur, d'une chaudière ou d'une pompe à chaleur... Plus la connaissance de ces températures sera fiable, plus le système de régulation ou de contrôle sera performant, permettant ainsi des optimisations énergétiques et la réduction de coûts d'exploitation.

Historiquement, beaucoup de mesures thermiques étaient réalisées grâce à des sondes de températures placées dans des doigts de gant² sur les canalisations, pouvant entraîner des difficultés techniques (risque de fuite au niveau de la soudure) et des surcoûts de fabrication. Une méthode plus économique consiste à utiliser une traversée de paroi étanche pour faire passer la sonde de température au travers de la tuyauterie. Dans ce cas la gaine métallique du capteur est directement en contact avec le milieu dont on veut mesurer la température, mais il faut arrêter le débit lors du remplacement du capteur.



Figure 2 : Photos de doigts de gant

¹ VIM : JCGM 200:2012; Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM); 3e édition. Voir définition 2.5 méthode de mesure : description générique de l'organisation logique des opérations mises en œuvre dans un mesurage

² Doigt de gant : Tube de faible diamètre fermé à une extrémité à l'intérieur duquel est introduite la sonde de température. Il permet d'effectuer une mesure de température sans exposer directement la sonde dans le milieu étudié.



Figure 3 : Photos de traversées de parois et de leur mise en œuvre (source Trane)

L'utilisation de capteurs de température de surface fixés directement sur la face externe de la paroi simplifie l'installation et permet une réduction des coûts. Ces capteurs sont rapides à installer, faisant gagner du temps sur les chaînes de fabrication et lors des opérations de maintenance. Ces capteurs de surface sont de plus en plus utilisés. Nous verrons si ce gain est aussi intéressant qu'il y paraît.

Les industriels emploient fréquemment les capteurs de surface pour connaître la température d'un fluide circulant dans une canalisation. La finalité n'est donc pas ici de mesurer directement la température surfacique. Les capteurs de surface permettent de déduire la température du fluide que l'on cherche à déterminer. Il s'agit donc d'une méthode de mesure indirecte de la température du fluide. La détermination de la température interne d'un fluide dépendra des caractéristiques de la paroi et de l'environnement aussi bien externe qu'interne.

L'utilisation d'un même type de capteur de surface pour mesurer une température surfacique ou celle d'un milieu interne est à l'origine d'incompréhensions. Afin d'être le plus clair possible, nous allons définir les concepts de mesures de température de surface directes et indirectes.

Nous appellerons "**mesures de température de surface directes**" celles qui sont réalisées avec un thermomètre de surface pour mesurer la température surfacique qui régnait avant l'application de l'instrument à l'interface solide / air. Cette terminologie correspond à la théorie de ce type de mesure. Elle est reprise ici pour l'explication théorique des effets parasites, ainsi que pour l'identification des facteurs d'influence.

Nous appellerons "**mesures de température de surface indirectes**" celles qui sont réalisées avec un thermomètre de surface pour évaluer la température interne d'un matériau ou d'un fluide circulant dans une canalisation par exemple. La température de ce matériau ou de ce fluide est déduite d'un calcul. Une approximation souvent faite consiste à considérer que la température lue sur le thermomètre de contact correspond à celle du matériau ou du fluide, ce qui n'est rigoureusement pas exact. Nous évaluerons par la suite l'erreur de mesure de ce type de mesure. Nous verrons aussi que des bonnes pratiques de mise en œuvre sont spécifiques à ce type de mesures, les facteurs d'influence prépondérants étant différents de ceux des mesures directes.

1.2. Exemples industriels de mesures de température de surface

Pour illustrer ces deux types de mesures (directes et indirectes), nous décrivons ci-après quelques exemples de mesures de température de surface.

1.2.1. Exemples de mesures directes

La connaissance de la température de surface est un paramètre important dans les procédés industriels de mise en œuvre de produits tels que les pâtes alimentaires, les plastiques, les caoutchoucs. Dans ce cas, la température des parois en contact avec la matière à mélanger ou à mettre en forme a un impact direct sur la qualité du produit fabriqué et la productivité.

1.2.1.1. Cylindres

Les mélangeurs de type "cylindres" sont constitués de deux cylindres chauffés tournant en sens inverse et entre lesquels le produit travaillé va passer. S'ils sont trop chauds, le produit va se dégrader ("cuire") avant sa mise en œuvre. S'ils sont trop froids, par exemple dans le cas du caoutchouc, ils risquent de casser. Pour garantir la qualité de la production, les cylindres sont régulés à une température constante afin de permettre la mise en forme correcte du produit. En cours de procédé, la température est contrôlée directement sur les cylindres avec des capteurs de surface de type couples thermoélectriques (thermocouples) supportés par des roulettes, tel que cela est montré sur la figure ci-dessous. Le capteur de température glisse sur la surface des cylindres. Ces mesures permettent, le cas échéant, d'ajuster les valeurs de consigne des régulateurs afin d'optimiser le procédé.

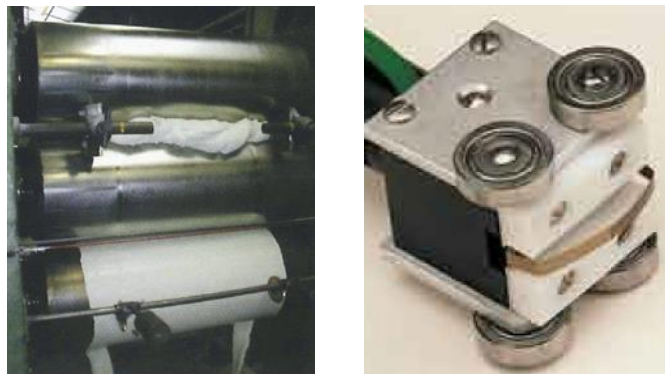


Figure 4: Photos d'un mélangeur et d'un capteur de température de surface (source TI)

1.2.1.2. Extrudeuses

Un autre exemple concerne le formage de matières plastiques en utilisant une extrudeuse. Des billes de polymère, ainsi que d'éventuels adjuvants et additifs sont introduits en amont d'une vis hélicoïdale permettant leur mélange. Celle-ci pousse ce mélange à travers une filière permettant sa mise en forme (tube par exemple). Ici encore, la maîtrise de la température permet une mise en forme optimale sans dégradation des constituants du mélange. Dans ce cas, il est intéressant de mesurer la température de la filière pour optimiser l'état de surface de l'extrudat.



Figure 5: Photo d'une extrudeuse (source extrusion-relative.com)

1.2.1.3. Moule de compression

Lors des moulages en compression dans un moule, l'évaluation de la température de la paroi de l'empreinte est importante à maîtriser pour garantir la qualité du produit final. L'injection d'une pièce plastique dans un moule trop froid ou trop chaud risque par exemple d'entraîner des défauts d'aspect ou des difficultés de démoulage.

La régulation thermique des moules est réalisée sur la base de mesures obtenues par des capteurs positionnés à l'intérieur de ces derniers. Des contrôles manuels par des mesures directes sont réalisés avec des capteurs de surface lorsque le moule est ouvert pour valider et optimiser les réglages.



Figure 6: Photo d'un moule de bouteille plastique

1.2.1.4. Sécurité

La mesure de la température de surface est aussi très utilisée pour garantir la sécurité ou le confort des personnes. La température des carters de machine ne doit pas dépasser une certaine température. Au-delà de cette température, il y a risque de brûlure. Sur les machines dégageant de la chaleur, des contrôles de la température des carters directement accessibles sont réalisés avant la mise sur le marché.

La norme NF EN ISO 13732-1 de décembre 2008 [12] fixe un certain nombre de températures maximales de contact de surfaces chaudes permettant, notamment en fonction du temps d'exposition, de déterminer des seuils de brûlure. Parmi les points de repères indiqués, on peut noter que le seuil de brûlure d'un adulte en bonne santé est de 51°C pour une durée de contact de 1 minute avec une surface en métal nu ou revêtu et de 56°C pour une surface en céramique, verre ou pierre. De même, on peut observer que ce seuil est de 48°C, quel que soit le matériau touché, pour une durée de contact de 10 minutes.

Des inspections permettent de contrôler la température d'une plaque de cuisson par exemple ou celle d'un émetteur de chaleur.



Figure 7: Contrôle de la température d'une plaque de cuisson et d'un radiateur

1.2.1.5. Diagnosics énergétiques

Les diagnostics énergétiques sont largement basés sur des mesures de température. La mesure des températures de surface des parois, parfois réalisée avec des caméras infra-rouge ou des thermomètres infra-rouge, peut aussi être réalisée avec des thermomètres de contact. A partir de la mesure de la température de paroi sur les deux faces d'une paroi ou d'un mur, il est possible d'en déduire le flux de chaleur le traversant et d'en évaluer la qualité de l'isolation....

Le recours à un thermomètre de contact est illustré ci-dessous au travers de la mesure directe de la température de paroi. Le cas échéant, cette mesure permet de vérifier le bon fonctionnement d'installations telles que des chauffe-eau.



Figure 8 : Mesure de la température d'un mur et d'une paroi d'un ballon d'eau chaude

1.2.2. Exemples de mesures indirectes

Les mesures indirectes concernent toutes les situations mettant en œuvre des mesures de température surfaciques afin de déduire la température d'un milieu solide ou d'un fluide dont la mesure directe à cœur n'est pas possible (épaisseur de paroi trop fine, difficulté d'accès...).

1.2.2.1. Mesure de la température d'un fluide dans une canalisation

La connaissance de la température des fluides aux bornes d'un échangeur de chaleur ou d'une machine thermique permet d'évaluer la puissance thermique échangée et contribue au bon fonctionnement des systèmes, à la régulation, au déclenchement du seuil de sécurité, à la validation des performances, à la détection des défauts.

Ci-après, un exemple d'installation de capteurs de température de surface installés sur un échangeur de chaleur d'un système industriel.

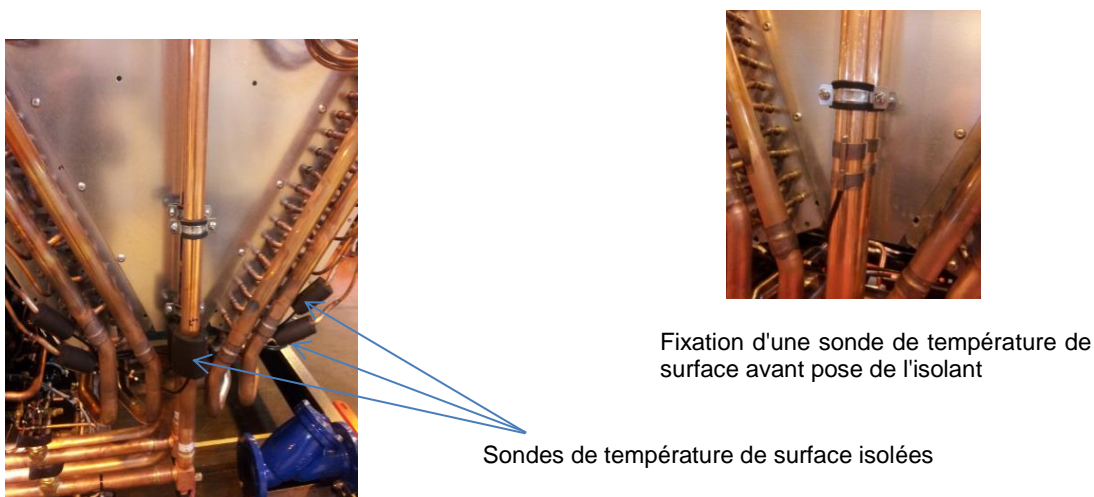


Figure 9 : Implantation de capteurs de surface sur un échangeur (source CIAT)

La mesure de température de surface sur les canalisations permet de déterminer les pertes thermiques, de détecter d'éventuelles anomalies telles que la présence de bouchons, d'encrassement ou des problèmes d'écoulement.

1.2.2.2. Mesure de la température de fluide dans un appareil

Pour évaluer la température de l'eau au sein d'une chaudière à eau chaude, il est possible de procéder soit à des mesures directes avec des capteurs de température installés dans le circuit d'eau, soit de procéder à des mesures indirectes en plaçant des capteurs sur la paroi pour en déduire la température du fluide. Un opérateur peut aussi appliquer ponctuellement un capteur de surface sur la paroi, de préférence à un endroit non isolé.



Figure 10 : Photo d'une chaudière Frisquet

1.2.2.3. Mesure de la température sur des pièces en rotation

Pour évaluer la température de certaines pièces internes mobiles, une solution peut être d'utiliser des capteurs de température de surface. En effet ce type de situation ne permet pas d'instrumenter directement la zone étudiée, une mesure réalisée dans un emplacement davantage propice à l'installation de capteurs peut permettre d'en déduire la température. Par exemple, pour évaluer la température à l'intérieur d'une pompe, l'utilisation des capteurs de surface peut être une solution.



Figure 11 : Photo d'une pompe

2. ÉLÉMENTS THÉORIQUES

Ce chapitre rappelle les éléments de théorie mis en œuvre lors des mesures de température de surface [3, 5, 12, 13, 14]. Nous rappelons les modes de transfert de chaleur ainsi que les facteurs d'influence s'exprimant lors de cette méthode de mesures. Ces quelques éléments ont pour but d'aider à la compréhension des phénomènes intervenant lors des mesures. Ainsi, les bonnes pratiques qui en découlent seront plus faciles à comprendre. Il s'agit ici d'éléments de base que le lecteur pourra compléter si besoin en consultant les articles donnés en bibliographie.

2.1. Flux thermiques

Les mesures de températures de surface mettent en œuvre les trois modes de transfert de chaleur :

- conduction
- convection
- rayonnement

Nous rappelons les principes qui sont présents lors de ce type de mesures.

2.1.1. Conduction thermique:

La conduction thermique correspond au transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Fourier rappelée ci-après :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \cdot S \cdot \vec{\nabla}(T)$$

Dans le cas d'une paroi, considérée comme unidimensionnelle (1D), cette équation devient :

$$\phi = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$

Le flux (Φ) en Watts dépend d'un paramètre caractérisant la conductivité thermique du matériau (λ), de la surface considérée (S), de l'écart de température ($T_1 - T_2$) entre les deux faces de la paroi et de son épaisseur (Δx).

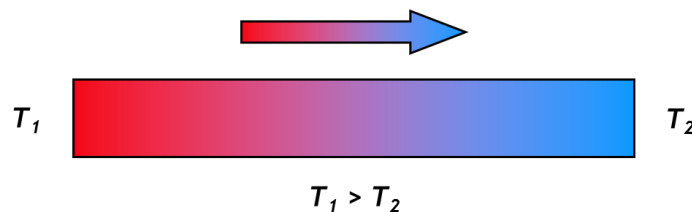


Figure 12 : Illustration de la conduction thermique

2.1.2. Convection thermique

La convection correspond au transfert de chaleur entre un solide et un fluide en déplacement (liquide ou gaz).

Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Newton présentée ci-après:

$$\phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_a)$$

Le flux (Φ) en Watts dépend d'un paramètre de convection thermique (h) entre le fluide et la paroi, de la surface considérée (S) et de l'écart de température ($T_p - T_a$) entre la surface du solide et le fluide.

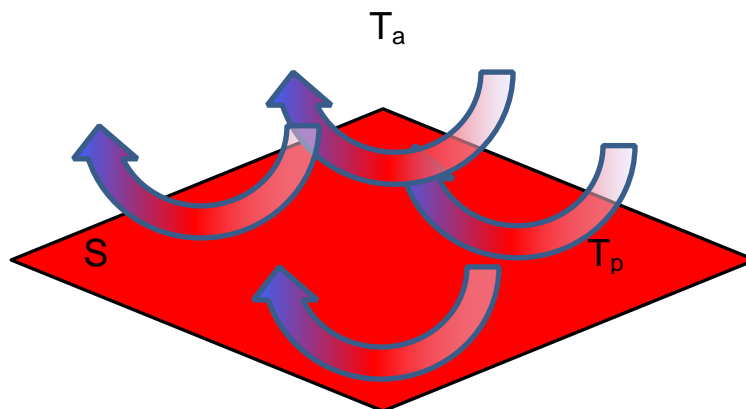


Figure 13 : Illustration de la convection

2.1.3. Rayonnement

Le rayonnement correspond au transfert de chaleur, sous la forme d'onde électromagnétique, émis par une surface.

Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Stefan exprimée ici sous forme de flux :

$$\phi = \sigma \cdot S \cdot \epsilon_p \cdot (T_p^4 - T_e^4)$$

Le flux (Φ) en Watts dépend de la constante de Boltzmann (σ), de la surface considérée (S), de l'émissivité de la surface (ϵ_p) et de l'écart de température ($T_p - T_e$) entre la surface de la paroi et la température moyenne de l'environnement à la puissance quatrième.

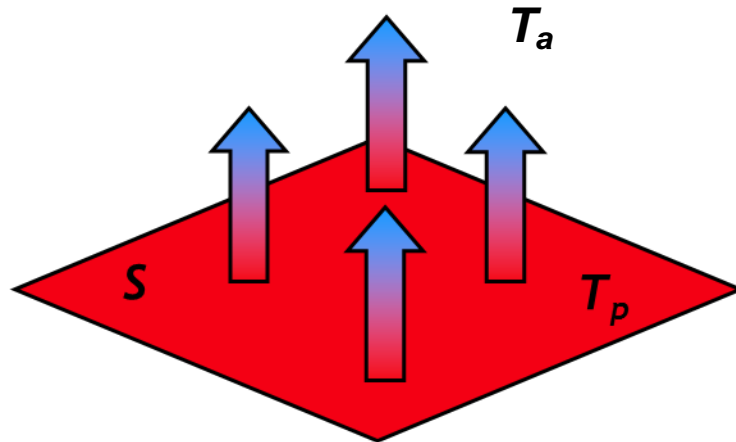


Figure 14 : Illustration du rayonnement thermique

2.2. Notion de température

2.2.1. Définition empirique de la température

La définition de la température fait l'objet de recueils de thermométrie conséquents. Nous proposons ici une définition simplifiée. La température est proportionnelle à l'agitation des particules présentes dans le volume considéré. Plus la vitesse d'agitation des particules considérées est grande, plus la température du milieu sera élevée. Les représentations suivantes illustrent ce propos.

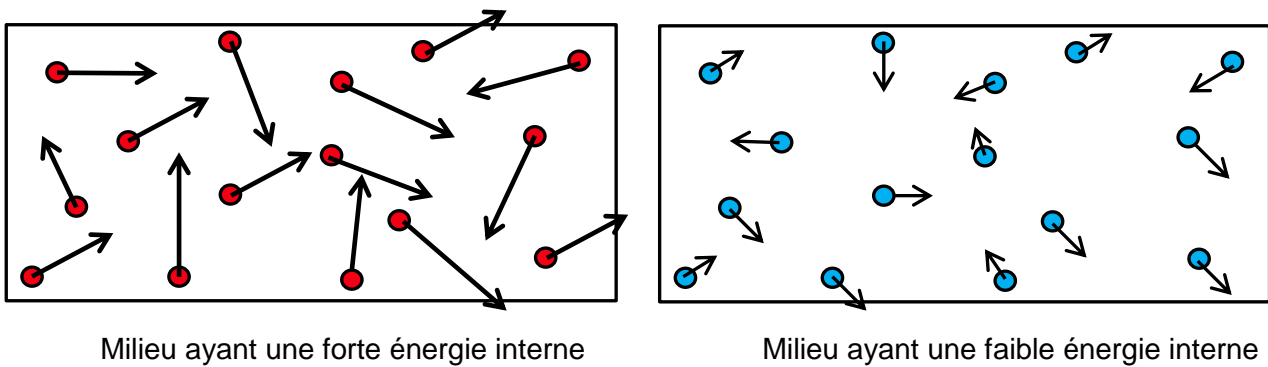


Figure 15 : Illustration de l'agitation moléculaire qui est proportionnelle à la température

La mesure de température se schématise par une mesure de l'énergie moyenne des particules en mouvement dans un liquide, un solide ou un gaz. Pour mesurer une température, il faut prendre en compte un volume suffisamment grand pour contenir assez de particules et suffisamment petit pour être considéré comme ponctuel.

2.2.2. Température de surface ou mesure à l'interface matériau / air

La température de surface correspond à celle de l'interface entre deux milieux de nature différente, l'un étant un solide, l'autre généralement de l'air. Conceptuellement, cela est délicat par rapport à la définition générale. Pour schématiser, nous juxtaposons les deux volumes définis précédemment, pour matérialiser la température à l'interface.

Nous faisons l'approximation que la température surfacique correspond à celle régnant dans le volume immédiatement situé sous l'interface solide/air, comme illustré sur la figure suivante. Cette approche est représentative de la méthode de mesure utilisée en thermométrie de contact. Cette température est issue de l'équilibre thermique entre les flux de conduction dans le matériau, de convection avec l'air et du rayonnement.

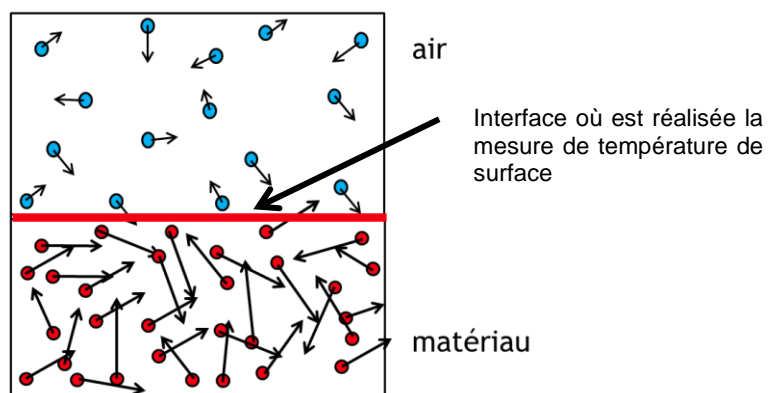


Figure 16 : Illustration de la température de surface par l'agitation particulaire

Le schéma ci-dessous illustre cette définition où la température de surface est matérialisée par un petit élément de matière dS , appartenant à la frontière matériau-air.

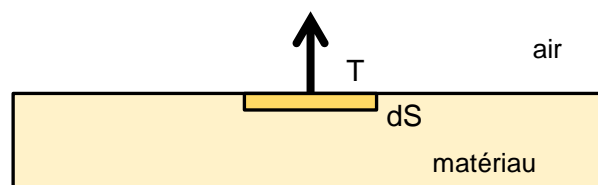


Figure 17 : Illustration de la matérialisation de la température de surface

Ce volume est le lieu de transferts thermiques qui vont s'équilibrer une fois le régime établi.

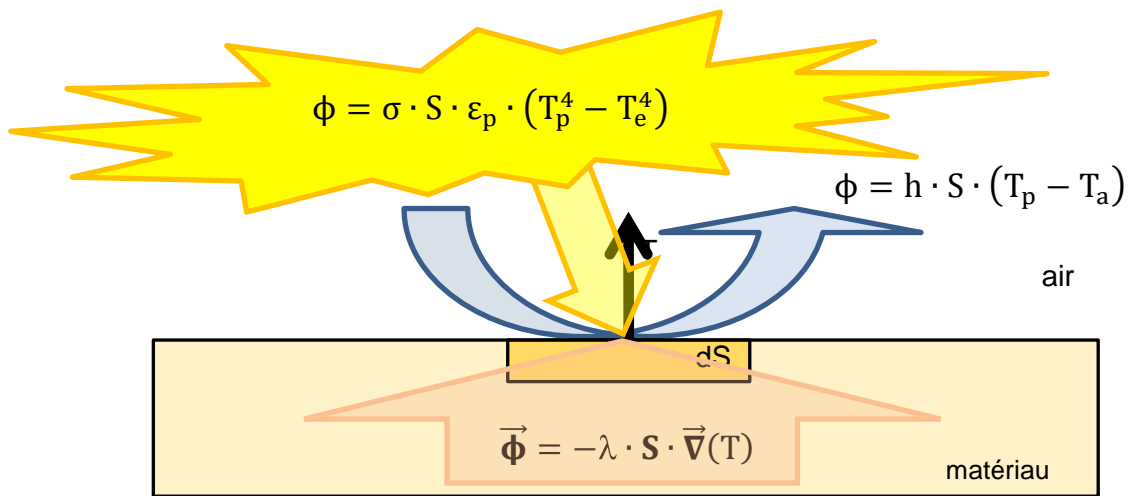


Figure 18 : Illustration des modes de transferts thermiques

L'application d'un thermomètre sur la surface va venir perturber cet équilibre thermique pour en créer un nouveau. Le nouvel équilibre thermique perturbé par le thermomètre sera l'objet de la mesure : il faudra donc identifier et quantifier les facteurs d'influence. Les corrections apportées à la mesure permettront de connaître la température d'équilibre qui régnait avant l'application du thermomètre.

2.3. Effets parasites des mesures de contact

L'application d'un thermomètre sur une surface chaude va entraîner des perturbations dans les transferts thermiques présentés au chapitre précédent. Le nouvel équilibre thermique de la surface peut se caractériser par des modifications internes au matériau, d'autres à l'interface avec le matériau et avec l'air ambiant. Ces effets parasites de l'équilibre thermique sont présentés dans ce chapitre. Nous verrons aussi l'impact de l'isolation sur les mesures surfaciques. Le schéma suivant illustre cette étape du raisonnement (voir figure 19).

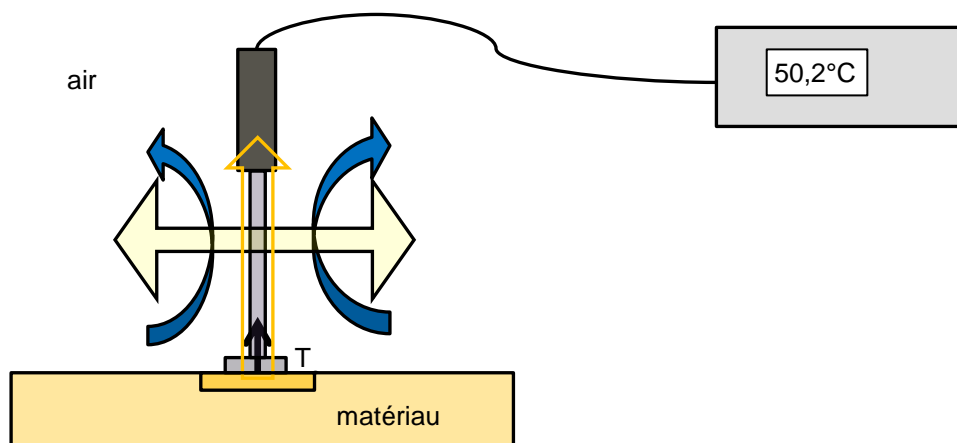


Figure 19 : Application du thermomètre sur la surface

B. Cassagne et J-P. Bardon [14] ont identifié et défini les trois effets parasites sur les mesures de température de surface provoqués par l'application du thermomètre sur la paroi :

- L'effet de macro-constriction
- La résistance de contact
- L'effet d'ailette

Nous reprenons ici les conclusions décrivant ces effets :

- L'effet de macro-constriction : conductance thermique due à l'application du thermomètre sur la surface qui favorise le flux thermique par conduction à l'intérieur du matériau.
- La résistance de contact : résistance thermique due aux cavités créées lors du contact. Les surfaces en vis-à-vis ont une certaine rugosité qui renferme de l'air. Une résistance thermique locale limite l'échange thermique.
- L'effet d'ailette : conductance thermique appelé aussi effet "radiateur" due à l'augmentation de la surface d'échange le long de la gaine du thermomètre.

La modification d'un de ces effets aura des répercussions sur les autres. L'utilisateur sensibilisé pourra en fonction de son besoin de mesure (directe/indirecte) intervenir sur l'(les) effet(s) le(s) plus perturbateur(s) pour minimiser l'erreur de mesure.

Il est primordial de bien comprendre ces effets et leurs impacts sur la mesure finale. Cela permettra au manipulateur de renforcer ou de réduire tel ou tel effet selon que l'on recherche une mesure directe ou indirecte de la température.

Le schéma suivant illustre ces effets et fournit un ordre de grandeur relatif de chaque effet sur le résultat final (dans le cas d'une mesure directe).

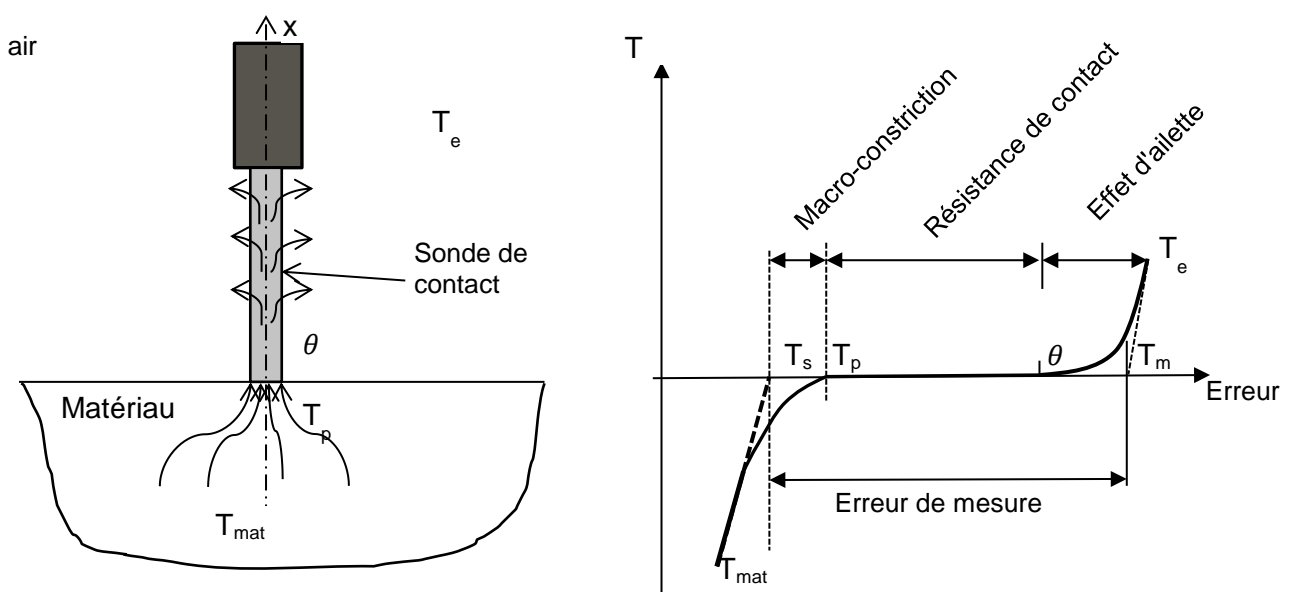


Figure 20 : Schéma des trois effets parasites d'après [14]

Le schéma de droite donne la part relative de chaque effet sur l'erreur de mesure finale. La résistance de contact est l'effet ayant l'impact prépondérant sur les résultats de mesure. L'effet d'ailette dépend de la conductivité de la gaine du thermomètre ainsi que des dimensions géométriques et de l'écart de température entre l'ambiance et la surface. La macro-constriction dépend des paramètres du matériau comme la conductivité, l'épaisseur.... Toutefois ces effets sont interdépendants. Par exemple, une forte conductivité thermique des matériaux favorisera la macro-constriction et l'effet d'ailette.

La correction de mesure globale peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$C(T_s - T_m) = \frac{(R_m + R_c + R_x)}{R_m + R_c + R_e} \cdot (\theta - T_e)$$

Où:

R_m : résistance thermique de macro-constriction ($K.m^2.W^{-1}$)

R_c : résistance thermique de contact ($K.m^2.W^{-1}$)

R_x : résistance thermique entre l'interface surface / capteur et l'élément sensible du capteur ($K.m^2.W^{-1}$)

R_e : résistance thermique globale entre la surface de contact et le milieu extérieur ($K.m^2.W^{-1}$)

Pour compléter, J-F. Sacadura introduit la notion d'effusivité thermique prenant en compte les aspects temporels.

L'effusivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement.

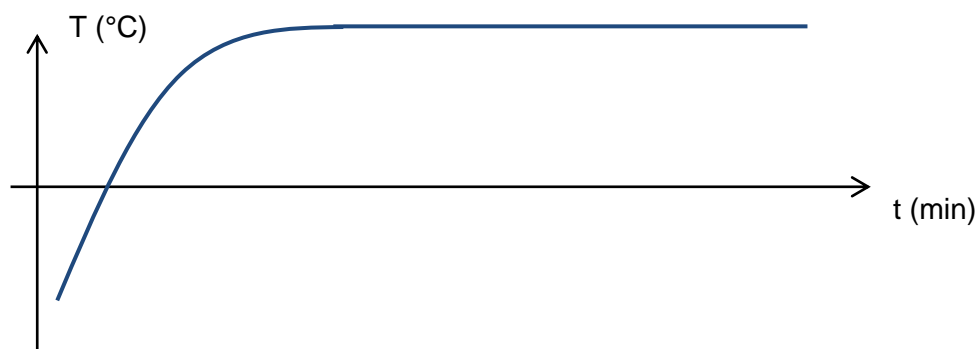


Figure 21 : Illustration de l'effusivité

Chaque flux thermique s'écrit (avec i l'indice du milieu) :

$$\varphi_i = \frac{b_i(T-T_1)}{\sqrt{\pi \cdot t}}$$

Avec l'effusivité $b_i = \sqrt{\lambda_i \cdot \rho_i \cdot c_i}$ fonction de la conductivité et de la chaleur volumique

La température de contact T_c s'écrira ("1" pour le milieu chaud et "2" pour le froid):

$$T_c = \frac{b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2}{b_1 + b_2}$$

Si les deux effusivités sont équivalentes alors la température stabilisée de contact sera

$$T_c = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Si l'effusivité du milieu 2 est importante par rapport au milieu 1 alors $T_c \approx T_2$

La mesure de température de surface sera d'autant plus délicate à réaliser que le matériau sera isolant.

3. CAPTEURS ET CONSIDÉRATIONS PRATIQUES

Ce chapitre rappelle les technologies disponibles sur le marché des capteurs de température de contact les plus utilisés, avec les avantages et inconvénients pour les mesures de températures de surface.

3.1. Technologies disponibles

3.1.1. Les sondes à résistance de platine (Pt100)

Il existe deux familles de sondes à résistance de platine. L'élément sensible en platine est constitué soit de l'enroulement d'un fil soit il est sérigraphié.

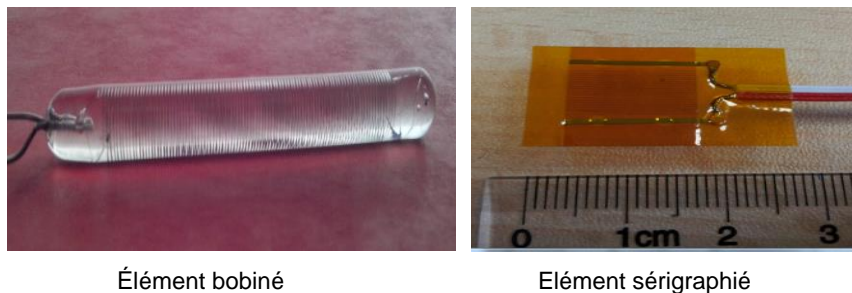


Figure 22 : Photos d'éléments sensibles en platine

La variation de la résistance électrique est proportionnelle à la température de l'élément sensible. Les sondes type Pt100 ont pour caractéristique de produire une résistance de 100 ohms à 0 °C pour une sensibilité d'environ 0,385 $\Omega/^\circ\text{C}$. Attention au biais de mesure liée à la résistance des fils en montage deux fils. On préférera les sondes en 4 fils qui minimisent cette erreur. Ce sont les capteurs les plus reproductibles (étalonnables).

Point faible : peu ponctuel, fragile, temps de réponse relativement long

Point fort : élément sensible fiable et reproductible, incertitudes maîtrisées

Avenir : les éléments sensibles sont de plus en plus petits

- temps de réponse court
- mesure très ponctuelle

Conclusion : bien adapté à la mesure statique et de bonne qualité

3.1.2. Les couples thermoélectriques ou thermocouples

Il existe deux familles de couples thermoélectriques utilisés pour les mesures de températures de surface : ceux sous forme de perles ou sous forme de lamelle.

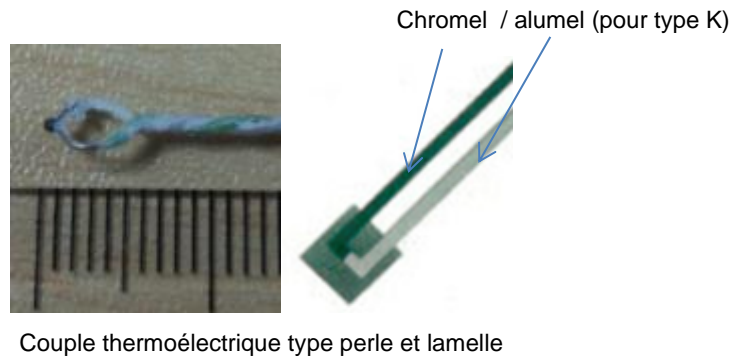


Figure 23 : Photos d'éléments sensibles de couples thermoélectriques

L'élément sensible est composé d'une jonction (dite chaude) réalisée en mettant en contact deux matériaux thermo-conducteurs différents. Cette technologie est basée sur l'effet Seebeck : deux matériaux de natures différentes placés dans un gradient de température produisent une force électromotrice aux bornes du circuit. Pour obtenir une température en degrés Celsius, il est nécessaire d'avoir une autre jonction de référence (dite jonction ou soudure froide). Cette jonction est généralement intégrée dans l'électronique sous le nom de "compensation de soudure froide" (CSF) ou matérialisée par un bain de glace fondante dans lequel est plongée la jonction de référence.

Point faible : risque d'erreurs (hétérogénéité, CSF), incertitudes intermédiaires

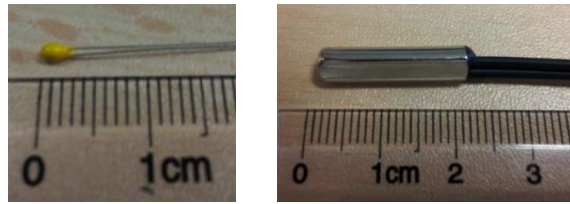
Point fort : élément sensible ponctuel, résistant, temps de réponse court, étalonnable

Avenir : retour d'expérience important en température de surface (étalonnage)

Conclusion : bien adapté aux mesures de surface industrielles et mesures dynamiques (cylindres de mélange par exemple, ...)

3.1.3. Les thermistances à coefficients négatifs (CTN)

Par leurs technologies de fabrication, les thermistances sont très répandues en électronique (présent sur processeurs, ...). L'élément sensible est composé d'oxyde métallique (technologie couche mince). La mesure de température est inversement proportionnelle à la valeur de résistance électrique de ces oxydes. La courbe de réponse est négative (CTN), la résistance diminue lorsque la température augmente.



Thermistance de type perle et conditionnée

Figure 24 : photos d'éléments sensibles de thermistances

Point faible : dérive dans le temps, généralement noyé dans une résine isolante qui biaise la mesure

Point fort : élément électronique très répandu, pas cher, conditionnement facile

Avenir : élément indicateur ou de sécurité

Conclusion : actuellement peu adapté aux mesures de surface

3.1.4. Autres technologies

3.1.4.1. Thermomètres Infra Rouge

La température est mesurée grâce au rayonnement de la surface. Un corps émet un rayonnement dont l'énergie et le spectre sont liés à sa température. C'est une mesure sans contact entre le détecteur IR et la surface.



Figure 25 : Photos d'un thermomètre infra rouge et d'un détecteur

Point faible : nécessité de connaître l'émissivité de la surface, impact de l'environnement, incertitudes fortes, difficulté d'étalonnage

Point fort : pas de contact avec la surface, mesure rapide

Avenir : prometteur...

Conclusion : adapté aux mesures de contrôle (en relatif), besoin d'un environnement maîtrisé

3.1.4.2. Les capteurs thermosensibles:

Ces capteurs sont constitués de matériaux sensibles à la chaleur. Généralement un seuil de température est matérialisé par un changement de couleur.



Figure 26 : photos d'éléments thermosensibles

Point faible : indicateur de température

Point fort : pas de contact avec l'extérieur, pas d'électronique, peu cher, effet mémoire

Avenir : utile pour un suivi de colis par exemple, sécurité de surchauffe

Conclusion : adapté aux indications de température, mais peu aux meures

3.2. Représentativité des mesures

La représentativité des mesures est un point important et pourtant trop souvent négligé. Il est utile avant de déployer une instrumentation de réfléchir sur le **mesurande**, sur l'objet de la mesure ainsi que sur l'influence de l'environnement. Que cherche-t-on à mesurer et avec quel niveau d'exactitude, d'incertitude ?

La définition du mesurande (2.3) est fournie par le VIM³ (Vocabulaire International de métrologie) : c'est la *grandeur que l'on veut mesurer*. La note 3 précise qu' *"il se peut que le mesurage, incluant le système de mesure et les conditions sous lesquelles le mesurage est effectué, modifie le phénomène, le corps ou la substance de sorte que la grandeur mesurée peut différer du mesurande. Dans ce cas, une correction appropriée est nécessaire."* Nous sommes dans ce cas.

De même, l'incertitude de mesure est donnée par la définition 2.26 : *"paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées. NOTE 3 L'incertitude de mesure comprend en général de nombreuses composantes. Certaines peuvent être évaluées par une évaluation de type A de l'incertitude à partir de la distribution statistique des valeurs provenant de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écarts-types. Les autres composantes, qui peuvent être évaluées par une évaluation de type B de l'incertitude, peuvent aussi être caractérisées par des écarts types, évalués à partir de fonctions de densité de probabilité fondées sur l'expérience ou d'autres informations."*

Les questions à se poser pour définir l'objet de la mesure peuvent être:

- son volume
- son matériau (propriétés thermiques)
- ses limites (géométriques...)

Ensuite, il est utile de réfléchir sur la méthode de mesure et les conditions d'environnement :

- recherche d'une température surfacique, ou d'une température interne ?
- Quel est le niveau de performance attendu (indication grossière, mesure indicative, mesure avec une forte exactitude) ?
- Quelles sont les influences du milieu sur la mesure (régime d'écoulement, conductivité thermique...)?
- Quels sont les facteurs extérieurs d'influence sur la mesure (courant d'air, rayonnement, vibration, conditions climatiques...)?
- Quels moyens a-t-on pour améliorer le mesurage (écrans, isolants....) ?

³ VIM : JCGM 200:2012; Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM); 3e édition

- Quelle instrumentation utiliser ? :
 - aspects de coût
 - aspects techniques (solidité, raccordement électrique, encombrement, temps de réponse, qualité métrologique ...)
 - aspects métrologiques (raccordement au SI⁴, étalonnage, vérification, erreur maximale tolérée (EMT) ...)
 - besoin de modélisation ?

Pour illustrer cette réflexion, nous proposons un exemple rencontré lors d'une étude. Il s'agissait de mesurer la température de l'eau circulant dans une canalisation.

Les questions que nous sommes posées portent sur les points suivants :

- le volume considéré (au centre, en moyenne ou sur les bords ?),
- le type de régime d'écoulement (turbulent, laminaire...)
- la conductivité thermique de la paroi
- l'épaisseur de la paroi
- la qualité de l'eau (conductivité, présence de boues, de particules...)
- l'état de surface au niveau du contact avec le capteur (peinture, rugosité, oxydation...)
- le type de capteurs utilisé et l'encombrement (temps de réponse, taille...)
- les conditions d'environnement (courant d'air, rayonnement) et les protections possibles (écran, pâte thermique...)
- l'environnement de l'instrumentation
- la traçabilité de l'instrumentation etc....

⁴ Système Internationale d'unité

3.3. Traçabilité des mesures

La définition 2.41 du VIM indique que la traçabilité métrologique est la "*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*".

Les mesures de température de surface présentent souvent des difficultés de traçabilité car les conditions environnementales lors de la mesure font que le raccordement au SI reste délicat pour garantir la fiabilité des mesures entre celle de l'instrument étalonné et son utilisation in situ. Pour garantir au mieux la fiabilité des résultats de mesures, il est préférable d'utiliser une procédure d'étalonnage plaçant l'appareil dans des conditions les plus proches possibles de celles utilisées lors des mesures sur site. Dans ce cas, l'erreur de justesse et l'incertitude de mesure seront du même ordre de grandeur que celles obtenues lors de l'étalonnage.

Afin d'étayer ce propos, examinons quelques éléments d'histoire. Avant 2003, les étalonnages des thermomètres étaient réalisés par comparaison à un thermomètre de référence positionné dans un milieu homogène thermiquement, par exemple de 30 à 300°C (bain thermostaté). Les thermomètres de surface étaient donc étalonnés de cette manière. Les erreurs de justesse ainsi que les incertitudes d'étalonnage étaient faibles conduisant à une correction de quelques dixièmes de degrés associée à une incertitude inférieure à 0,1 °C.

Suite à ce type d'étalonnage, il était courant d'obtenir lors des mesures industrielles des écarts importants entre la mesure attendue et la lecture du thermomètre (en tenant compte des corrections d'étalonnage). Les utilisateurs étaient surpris d'obtenir des erreurs de plusieurs dizaines de degrés pour une température de surface de l'ordre de 200 °C par exemple ! Cet écart s'explique par la différence de mise en œuvre entre l'étalonnage et la mesure sur site (les conditions de mesures étant très différentes entre un bain et une température de surface entre deux milieux). Dans ce cas, la justesse et l'incertitude sont très fortement dégradées lors des mesures de température de surface.

Pour répondre à ce besoin de traçabilité spécifique, le LNE a développé une nouvelle méthode d'étalonnage adaptée aux mesures de température de surface, l'objectif étant de se rapprocher des conditions de mesures industrielles. Pour ce faire, un générateur de température de surface et une méthode d'étalonnage ont été développés en 2003. Ce nouveau moyen permet la traçabilité aux étalons nationaux des chaînes de mesure de température de surface dans les conditions de mesures.

La figure ci-dessous présente des exemples de générateurs de température de surface.

Ces générateurs sont utilisés pour l'étalonnage des capteurs de température de surface.



Figure 27 : Générateurs de température de surface (LNE, Omega, Pyro-contrôle)

Nous avons pu constater au cours des années une diminution des erreurs de mesures de ce type de capteurs. Par exemple, pour une consigne de 200 °C, les erreurs de justesse ont évolué de quelques dizaines de degrés à quelques degrés, voire moins.

Pour garantir la traçabilité des mesures, il est important d'étalonner son instrumentation si possible auprès d'un organisme accrédité (par le Cofrac en France). Le logotype Cofrac garantit à l'utilisateur la traçabilité technique et documentaire au SI.

Pour aider à évaluer l'incertitude d'une mesure industrielle, il est judicieux d'étalonner l'instrumentation et si possible dans les mêmes conditions que celle de la mesure. Ensuite la méthode de mesure devra être évaluée afin d'identifier les facteurs d'influence et leurs quantifications. L'estimation de l'incertitude en milieu industriel sera déduite des données constructeurs, de l'étalonnage, des facteurs d'influence et de la répétabilité des mesures.

Dans le cas particulier des mesures de température de surface, l'utilisateur devra examiner s'il vaut mieux réaliser un étalonnage par immersion ou sur un générateur de température de surface.

Dans le premier cas, l'erreur de justesse et l'incertitude associée seront faibles, mais ensuite en conditions de mesures sur site, la correction de mesure sera plus importante et difficilement quantifiable. Dans le second cas, l'erreur de justesse et l'incertitude associée seront plus fortes mais en conditions de mesure sur site, elles seront du même ordre de grandeur que lors de l'étalonnage (faible dégradation due à la répétabilité).

Ci-après sont présentés deux schémas de traçabilité pour une mesure de température d'une paroi en cuivre à 94,3°C.

On trouvera en annexe un exemple d'estimation d'incertitude sur une canalisation d'eau chaude

3.3.1. Exemple 1 : étalonnage par immersion

Données de l'étude

- Information du certificat d'étalonnage :
 - erreur de justesse : 0,1 °C
 - incertitude d'étalonnage : 0,06 °C
- Information de l'étude industrielle :
 - lecture : 95,3 °C
 - mesure finale après correction d'étalonnage : 95,2 °C
 - incertitude de mesure : 4 °C (difficilement quantifiable sur site)
- **Erreur de mesure finale : $94,3 - 95,2 = 0,9$ °C**
- Conclusion : l'erreur de justesse du capteur et son incertitude sont dues principalement à la mise en œuvre industrielle. L'ensemble des paramètres d'influence devra être estimé. L'erreur de justesse de l'étalonnage a une faible part dans l'erreur de mesure. Dans ce cas, il existe un risque important que l'erreur de justesse du capteur en conditions de mesure soit mal quantifiée (plus importante que celle d'étalonnage).

3.3.2. Exemple 2 : étalonnage sur générateur de température de surface

Données de l'étude

- Information du certificat d'étalonnage :
 - erreur de justesse : 0,8 °C
 - incertitude d'étalonnage : 1 °C
- Information de l'étude industrielle :
 - lecture : 95,3 °C
 - mesure finale après correction d'étalonnage : 94,5 °C
 - incertitude de mesure : 1,3 °C (déterminée lors de la caractérisation du banc)
- **Erreur de mesure finale: $94,3 - 94,5 = 0,2$ °C**
- Conclusion : l'erreur de justesse du capteur et son incertitude sont déterminées lors de l'étalonnage, la mesure industrielle va dégrader l'incertitude mais peu. Dans ce cas, il existe un risque faible que l'erreur de justesse du capteur en conditions de mesure soit mal quantifiée (pratiquement prise en compte lors de l'étalonnage).

3.3.3. Synthèse

Ces deux méthodes aboutissent à des résultats comparables, sauf que le risque d'erreur est plus faible avec la deuxième méthode car l'identification et la quantification des paramètres d'influence sont évalués par le laboratoire réalisant l'étalonnage ! Il ne restera à ajouter à la correction d'étalonnage que l'effet de la résolution et de la répétabilité des mesures.

Dans le cas des mesures de températures indirectes, il n'existe pas à ce jour de méthode d'étalonnage validée par le Cofrac. Dans ce cas, l'utilisateur devra trouver une méthode d'évaluation de l'erreur de justesse et de son incertitude la mieux adaptée. Il pourra pour ce faire utiliser les méthodes suivantes :

- Bien définir son mesurande ainsi que la méthode de mesure
- Réaliser des essais préliminaires en laboratoire afin de caractériser les paramètres d'influence
- Réaliser des calculs thermiques des flux dans le liquide, à travers la paroi, ...
- Réaliser un étalonnage de l'instrumentation dans les conditions les plus proches possibles de l'utilisation.

Avant toute démarche, il est important de définir son besoin en termes de qualité de mesure ; recherche-t-on une indication approximative, plus fine ou de haute qualité ?

4. BONNES PRATIQUES DE MISE EN OEUVRE

Ce chapitre reprend les schémas théoriques présentés au chapitre 2 en les faisant évoluer pour présenter l'influence des effets parasites à chaque étape des mesures directes puis indirectes. Ceci permet de comprendre comment ces effets parasites se manifestent en fonction de l'environnement.

4.1. Mise en œuvre des mesures de température de surface directes

4.1.1. Influence des effets parasites lors des mesures directes

La première étape de la mesure consiste à définir la zone de la surface dont on souhaite connaître la température qui régnait avant l'application du capteur. Cependant, la mesure sera celle de la température d'un petit volume situé sous la surface (en orange sur la figure), dont on considère la température comme homogène. La mesure a lieu après stabilisation thermique de l'ensemble (matériau/surface/air).

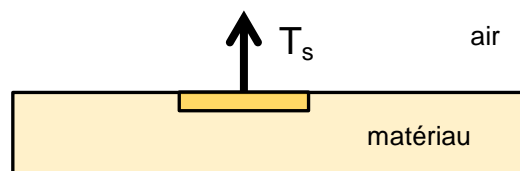


Figure 28 : Modélisation : température de surface directe avant application du capteur

La deuxième étape débute à l'application du thermomètre sur la surface à mesurer. Dès lors, un nouvel équilibre thermique va se créer avec les trois effets parasites (macro-constriction, résistance de contact, effet d'ailette). Si la surface est chaude, le thermomètre va la refroidir localement, modifiant la température qui y régnait avant son application. Un bon thermomètre de température de surface cherche à compenser cet effet. La mesure est réalisée après la stabilisation thermique (l'ordre de grandeur étant généralement d'une dizaine de minutes). Si cette étape est négligée, une erreur sera faite sur le résultat dépendant du thermomètre

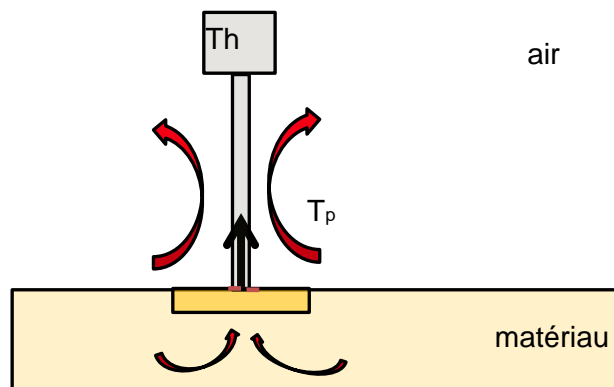


Figure 29 : Modélisation : température de surface directe pendant l'application du capteur

La troisième étape commence à l'enlèvement du thermomètre, la température revenant progressivement à la valeur initiale.

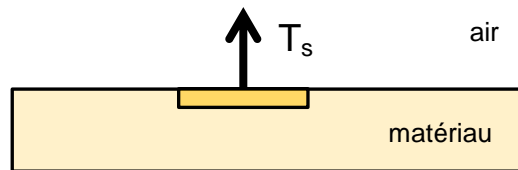


Figure 30 : Matérialisation : température de surface directe après l'enlèvement du capteur

Le schéma suivant fournit les ordres de grandeur des effets parasites sur l'erreur de mesure. Nous constatons que l'erreur relative prépondérante provient de la résistance de contact. Il faut minimiser cet effet par l'emploi d'un capteur le plus ponctuel possible. Nous déconseillons l'emploi de pâte thermique pour ce type de mesure. Elle favorise aussi la macro-constriction et l'effet d'ailette, modifiant ainsi l'équilibre thermique initial.

Pour cette méthode directe, il faudra principalement veiller à l'état de surface (propre, lisse ...). Le seul point technologique sur lequel on peut agir reste l'effet d'ailette. Un capteur minimisant cet effet donnera les corrections les plus faibles (peu d'influence sur la paroi, faible effet de macro-constriction).

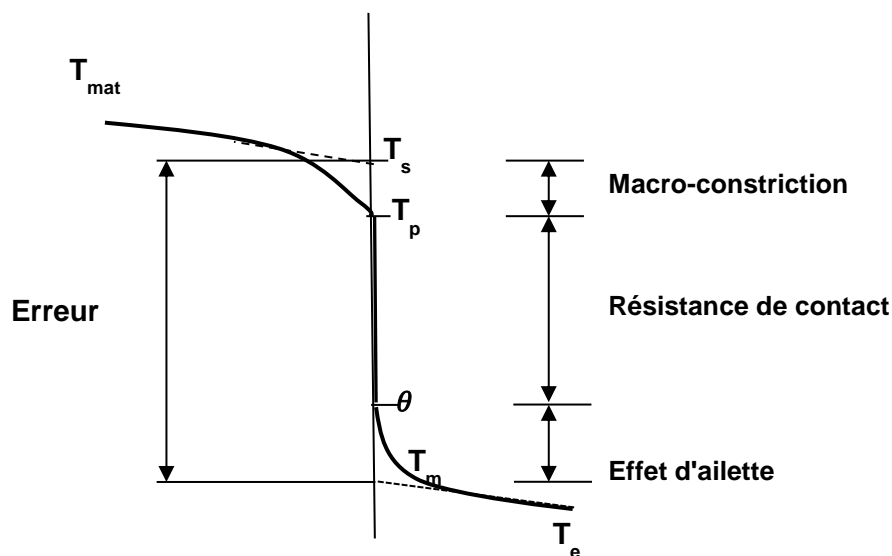


Figure 31 : Erreurs parasites en mesure indirectes et de leurs poids relatives

En résumé :

La mise en œuvre de mesures directes consiste à être le plus "thermiquement transparent" par rapport à la surface libre dont on cherche à déterminer la température (avant l'application du capteur).

Cela se traduit par les recommandations suivantes :

- Diminuer le plus possible l'effet de macro-constriction, par lequel le flux thermique interne va être capté par l'élément sensible. On veillera à avoir une petite surface de capteur en contact avec la surface.
- Diminuer la résistance de contact du capteur en diminuant la rugosité des parois.
- Diminuer l'effet d'ailette qui a tendance à refroidir le capteur, par l'utilisation de capteurs adaptés.

Il est à noter que ces trois effets sont interdépendants.

Les conditions d'environnement limitent le choix des capteurs, car leur impact sur la mesure est prépondérant.

Les caractéristiques des capteurs à utiliser vont être:

- Une géométrie adaptée à la paroi (par exemple concave sur un tuyau)
- Une gaine adaptée à la prise en main et à la limitation de l'effet d'ailette
- Un élément sensible au plus près de la paroi à mesurer (généralement des thermocouples de type lamelle)

4.1.2. Effet de l'environnement

4.1.2.1. Conductivité thermique de la paroi

L'erreur de mesure est inversement proportionnelle à la conductivité thermique du matériau constituant la paroi. Une bonne conductivité thermique du matériau va contribuer à accroître l'effet de macro-constriction et diminuer le temps de réponse. Il n'est par exemple pas possible de mesurer des températures de surface d'isolant avec cette méthode de mesure. Une étude menée au LNE a permis de construire le graphique suivant fournissant un ordre de grandeur des corrections d'étalonnage sur différents types de matériaux, du plus isolant au moins isolant. Nous constatons que la correction tend vers l'infini lorsque la conductivité tend vers 0.

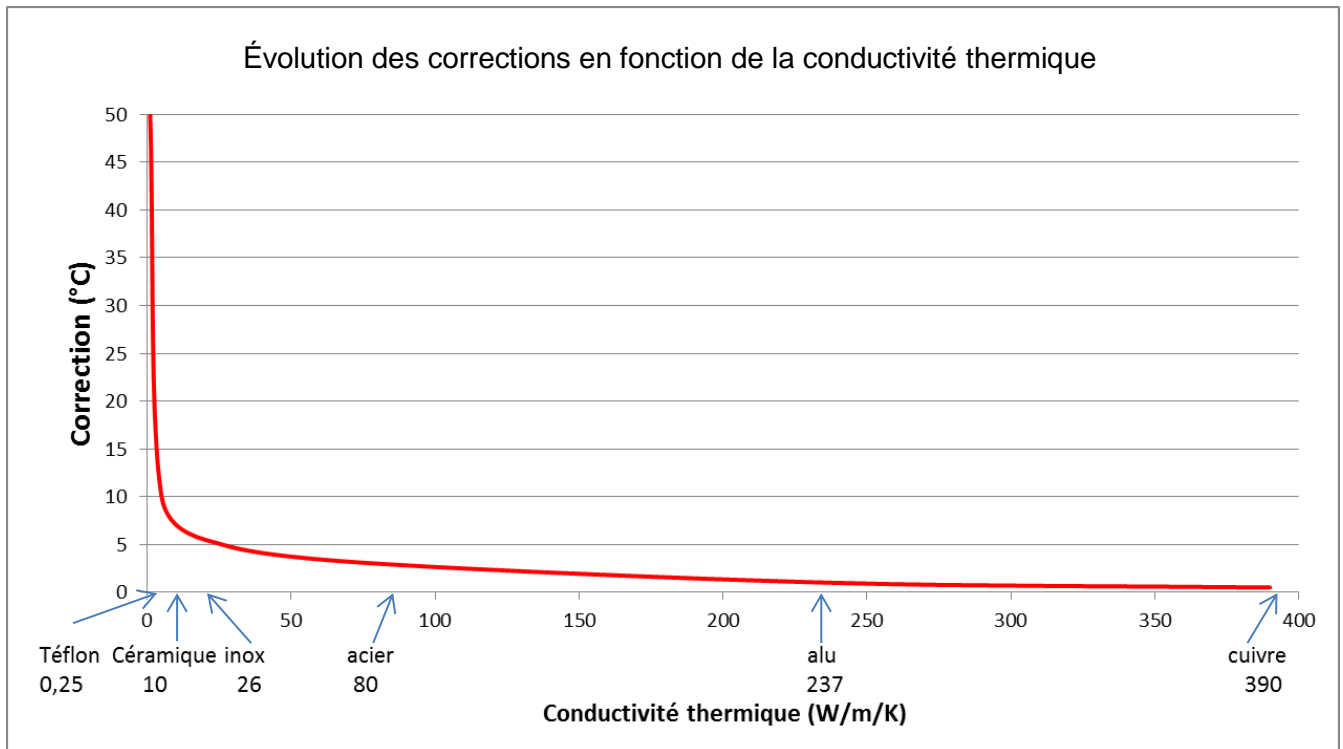


Figure 32 : Corrections d'étalonnage en fonction de la conductivité thermique (LNE)

Suivant la géométrie du capteur et la valeur du flux conductif traversant la paroi, un équilibre va se mettre en place plus ou moins éloigné de la température de surface qui régnait avant l'application du capteur. Le cas extrême est celui où la capacité calorifique de la paroi n'est pas suffisante pour compenser l'impact du thermomètre. Dans ce cas, la mesure sera faussée. Par exemple, si la température circulant dans un circuit est de 30 °C et qu'elle est produite par un générateur de faible puissance, l'application du capteur peut à l'extrême faire diminuer la température jusqu'à celle de l'environnement.

4.1.2.2. Écoulement d'air le long de la paroi

Les mesures ne doivent pas être perturbées par un écoulement d'air parasite. Nous considérons qu'il y a un courant d'air dès lors qu'une personne en détecte la sensation, ce qui se produit pour des vitesses supérieures à 0,4 m/s d'après un panel d'experts. L'étalonnage sur un générateur de température de surface est réalisé sans écoulement d'air. La présence éventuelle de cet écoulement lors d'une mesure de température de surface augmentera la correction de mesure de manière importante, pouvant aller jusqu'à ne plus pouvoir obtenir de résultat représentatif. Si l'écoulement d'air est important, on finit par ne mesurer que la température de ce dernier.

Le graphique suivant réalisé au CETIAT montre l'impact d'un écoulement d'air sur les mesures de température de surface. A température ambiante, une vitesse d'air de 1 m/s peut biaiser le résultat de mesure de plusieurs degrés.

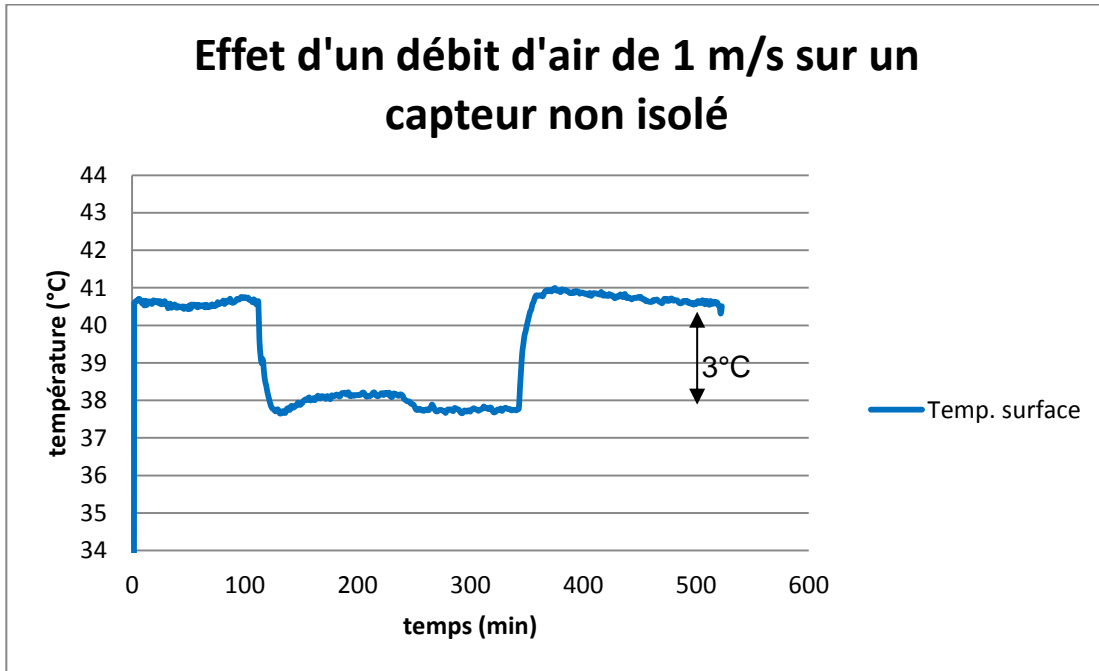


Figure 33 : Impact d'un flux d'air sur les mesures (température ambiante)

4.1.2.3. Rayonnement extérieur sur la paroi

Nous éviterons les flux radiatifs sur la zone de mesure. L'étalonnage sur un générateur de température de surface est réalisé sans rayonnement solaire, ni source de chaleur à proximité. Le graphique suivant réalisé au CETIAT montre l'impact d'un flux lumineux sur les mesures de température de surface. Le rayonnement d'un halogène de 500 W modifie le résultat de mesure de plusieurs degrés.

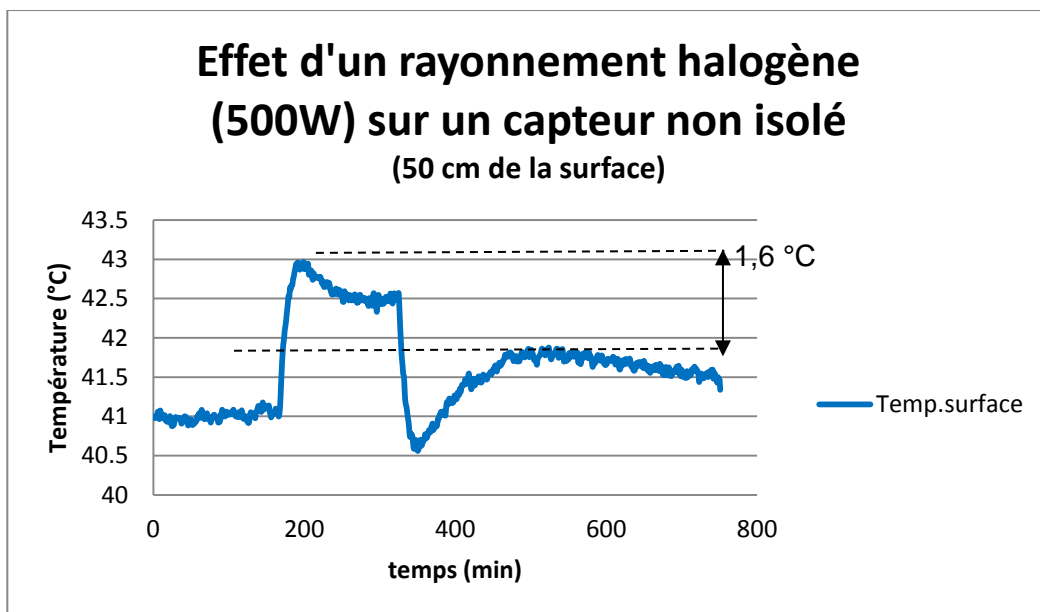


Figure 34 : Impact d'un rayonnement sur les mesures à 23°C

4.1.3. Amélioration de la mesure

4.1.3.1. Conditions thermiques de la surface

Plus la surface sera conductrice et le siège d'un flux thermique important (pour compenser l'impact du thermomètre), plus fiable sera la mesure.

Il est intéressant, de connaître l'origine du flux thermique dont fait l'objet la mesure de température de surface. La génération de température est-elle constante ou fait-elle l'objet de fluctuations ?

Dans le cas d'un flux constant, il faudra que la capacité calorifique du matériau de la surface soit grande par rapport à la perturbation thermique apportée par le thermomètre. Dans le cas de surface chaude, le thermomètre refroidit la surface. L'énergie dissipée par le capteur doit être faible devant celle de la surface, sinon, la mesure perturbera l'équilibre thermique de la surface jusqu'à accélérer son refroidissement, et ceci d'autant plus que la stabilisation thermique du thermomètre prend du temps.

Plus la conductivité thermique de la surface sera élevée, plus fiable sera la mesure. L'opérateur averti utilisera un thermomètre étalonné sur le même type de surface. C'est rarement possible, car il est difficile lors des mesures sur site de connaître les caractéristiques des matériaux. Pourtant c'est un point qui permettrait de diminuer largement l'incertitude de mesure.

Le positionnement du capteur est important. Celui-ci devra être posé sur une zone suffisamment grande et non perturbée (éloignée de coudes de canalisation, de murs, ...). Nous proposons que la zone de mesure soit au moins cinq fois plus grande que celle du capteur. Sur une canalisation par exemple, on veillera aussi à réaliser la mesure dans une zone où les conditions d'écoulement du fluide favorisent un bon transfert de chaleur entre celui-ci et la surface interne de la paroi (écoulement turbulent, mise en place d'un mélangeur, conductivité de la paroi,...)

4.1.3.2. État de surface / contact thermique

Pour améliorer le contact entre la paroi et le capteur, il est nécessaire d'enlever s'il y a lieu tous les éléments entravant le contact thermique. Par exemple, enlever la peinture si la paroi est peinte, soit avec un produit approprié soit par abrasion. Il est également conseillé d'enlever les traces d'oxydation, même si tous les oxydes ne sont pas des isolants thermiques. Pour diminuer la rugosité, il convient de prendre toutes les précautions pour que la surface soit la plus "lisse" possible. Un papier de verre très fin peut être utilisé sur les parois. Dans certains cas, un nettoyage pourra être utile, voire suffisant. On n'oubliera pas de vérifier aussi l'état de surface du capteur.

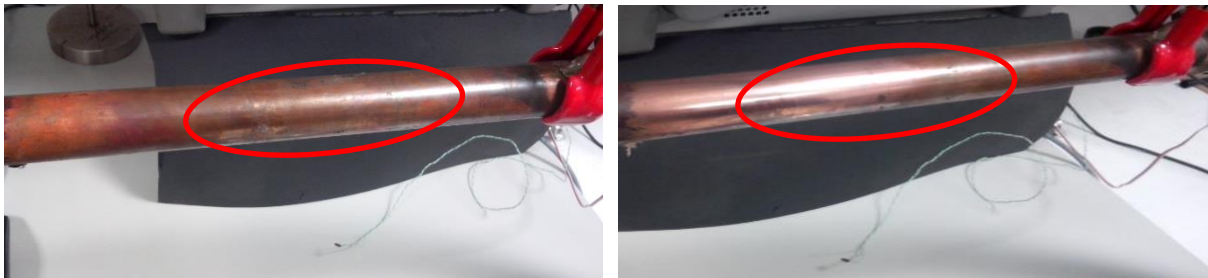


Figure 35 : Nettoyage de la surface en cuivre (avant / après)

4.1.3.3. Courant d'air / rayonnement

Il faut éviter si possible les courants d'air et le rayonnement sur la zone de mesure. Si l'une de ces conditions existe, il faut en minimiser l'effet par l'installation d'écrans de protection.

4.1.3.4. Thermalisation du capteur

Il ne faut jamais oublier que le thermomètre mesure sa propre température. Il est donc indispensable de "thermaliser" la sonde de mesure (c'est-à-dire de l'amener au préalable à une température proche de celle de la mesure). L'instrument peut être plongé dans un bain ou four à une consigne proche de la température à mesurer avant de procéder à la mesure. Sinon, il faudra attendre la stabilisation thermique de la sonde posée sur la paroi. Le temps de stabilisation dépendra des conditions de mesure (capteur, environnement...), nous conseillons une durée d'environ 10-15 min issue des procédures d'étalonnage.

La géométrie du capteur a un impact direct sur sa thermalisation et la qualité des résultats.

4.1.4. **Choix du capteur de mesure**

Les caractéristiques thermiques du capteur ont un impact fort sur la qualité des mesures. La géométrie de la gaine du capteur est très importante. Certaines géométries peuvent expliquer à elle seules les mauvais résultats de mesure. Nous avons vu qu'il est souhaitable de réduire au maximum l'influence de l'effet d'ailette. En dehors de la zone de mesure, la gaine pourrait être par exemple en matériau isolant ou d'un diamètre plus petit. Il faut éviter les gaines d'un diamètre trop gros et trop longues.

Dans la mesure du possible, on recherchera à ce que l'élément sensible en contact direct avec la paroi soit ponctuel. L'illustration suivante présente les trois conditionnements de capteurs qui sont détaillés dans les paragraphes suivants.

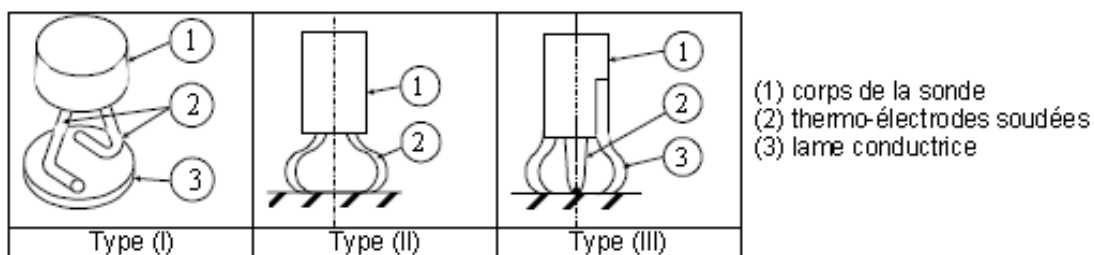


Figure 36 : Les trois types de conditionnement de capteurs de surface (LNE)

4.1.4.1. Capteurs de type (I) :

Le capteur de type (I), où l'élément sensible (2) est placé derrière une semelle conductrice dont l'objectif est d'augmenter la conductivité thermique, est plutôt à éviter. Le métal ajouté entre l'élément sensible et la surface va accroître la résistance de contact et provoquer un gradient thermique. Ces capteurs auront généralement un biais important de mesure.



Figure 37 : Photos de capteurs type I (avec ajout d'une semelle conductrice)

4.1.4.2. Capteurs de type (II) :

Les capteurs de type (II) ont une jonction (soudure) chaude souple et qui vient se déformer pour épouser la surface à mesurer. Ce sont des capteurs à lamelle robuste très utilisés sur des systèmes à roulettes. Ils présentent un risque de destruction s'ils sont mal utilisés car l'élément sensible n'est pas protégé.



Figure 38 : Photos d'un capteur de mesures type II

4.1.4.3. Capteurs de type (III) :

Les capteurs de type (III) ont une jonction (soudure) chaude qui est protégée par un élément non déformable.

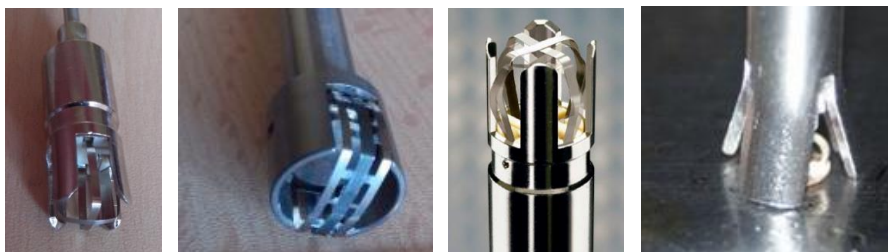


Figure 39 : Photos d'un capteur de mesures type III

4.1.5. Traçabilité / étalonnage

Comme on l'a déjà dit au paragraphe 3.3, il est possible de réaliser des étalonnages de capteurs de température de surface sur des générateurs de température de surface. Il est conseillé de raccorder ses thermomètres aux étalons nationaux de cette manière, en précisant le type de matériaux de surface sur lequel aura lieu la mesure ainsi que l'orientation (horizontale / verticale), afin que l'étalonnage soit réalisé au plus près des conditions de mesures industrielles. Ces étalonnages donnent des corrections certes importantes, mais représentatives des mesures de contact, ainsi qu'une incertitude proche de celle des mesures sur site.

4.1.6. L'effet de l'opérateur

Sur ce type de mesure, l'effet de l'opérateur sur les résultats peut être significatif. Un vrai "coup de main" est nécessaire pour réaliser de bonnes mesures. Généralement, pour une paroi étant plus chaude que l'air, le résultat pris en compte correspondra à la température la plus élevée affichée sur l'indicateur. On fera l'inverse si la paroi est froide, en veillant à ce que celle-ci ne soit pas le lieu d'une condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air.

Toute mesure de température demande du temps car il est indispensable d'attendre la stabilisation thermique de l'élément sensible. Généralement, le thermomètre est à la température ambiante, il est donc nécessaire d'attendre sa stabilisation thermique avant de réaliser les mesures. Pour gagner du temps, le thermomètre peut être préchauffé (ou pré-refroidi) à une température proche de la température de mesurage.

Pour améliorer les résultats de mesure, l'opérateur pourra ajouter des écrans de protection autour de la zone de mesure si des courants d'air ou du rayonnement peuvent perturber celle-ci, mais n'utilisera pas de pâte thermique modifiant trop le contact avec la surface.

4.1.7. Conclusion

La mesure sera plus fiable lorsque :

- La surface est conductrice
- La surface est lisse et propre (peu rugueuse)
- Le flux thermique est important par rapport aux phénomènes risquant de perturber la mesure
- Le capteur est adapté et thermalisé
- Le capteur est étalonné dans des conditions similaires à celles de son emploi
- L'opérateur est expérimenté

4.2. Mise en œuvre des mesures de température de surface indirectes

4.2.1. Influence des effets parasites lors des mesures indirectes

La première étape de la mesure consiste à définir l'objet du mesurage avant l'application du capteur. Il est défini par le volume sous la surface (orange) appartenant au solide. Ici on recherche la température dans le milieu non accessible directement par le capteur. La mesure a lieu après stabilisation thermique de l'ensemble (surface/matériau/air).

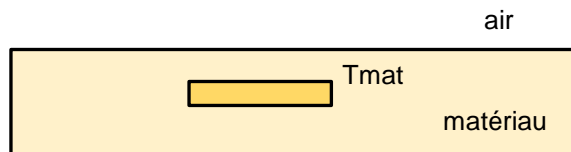


Figure 40 : Modélisation : température de surface indirecte avant application du capteur

La deuxième étape débute lorsqu'on applique le thermomètre sur la surface à mesurer. De la pâte thermique peut être appliquée (en rouge sur la figure) pour améliorer le contact thermique entre le capteur et la surface. La mise en place d'un isolant thermique autour de la gaine de la sonde est très conseillée car elle va réduire l'effet d'ailette. Dès lors, un nouvel équilibre thermique va se créer entre les trois effets parasites (macro-constriction, résistance de contact, effet d'ailette). Dans ce cas, tous les moyens permettant l'amélioration du flux thermique entre le matériau et l'élément sensible du capteur sont à utiliser (pâte thermique, ...).

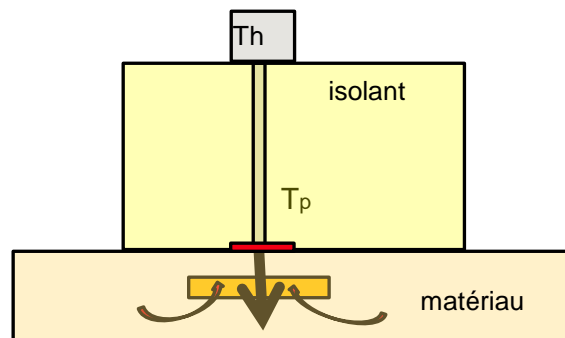


Figure 41 : Modélisation : température de surface pendant application du capteur

La troisième étape débute lorsque le capteur, le matériau et l'isolant éventuel ont atteint un état thermique stabilisé.



Figure 42 : Modélisation : température de surface après stabilisation thermique

La figure suivante schématise le thermomètre dans son environnement, afin d'étudier les différents effets thermiques. Au centre est représenté le thermomètre sur l'axe vertical x , en rouge est représentée la pâte thermique diminuant la résistance thermique (due à la rugosité). L'effet de macro-constriction est renforcé par l'amélioration du contact thermique. La pose d'un isolant autour du capteur limite l'effet d'ailette, allant jusqu'à pouvoir le négliger.

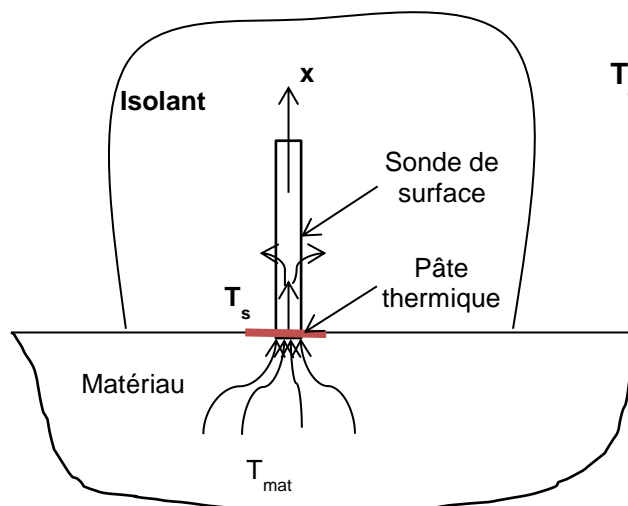


Figure 43 : Schéma des flux thermique lors d'une mesure indirecte

Le schéma relatif du poids des trois effets parasites sur l'erreur de mesure devient :

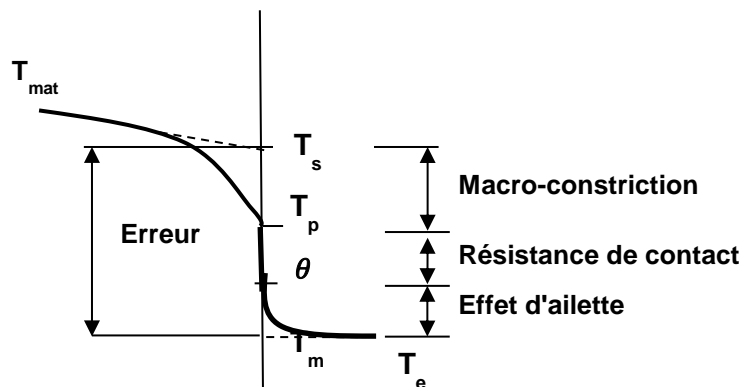


Figure 44 : Schéma des erreurs parasites et de leurs poids relatifs en mesure indirecte

Avec la pâte thermique l'erreur due à la résistance de contact est plus faible que pour les mesures directes. L'effet de macro-constriction se renforce, ce qui est favorable pour mesurer la température interne ou celle de l'autre côté de la paroi. L'effet d'ailette encore représenté tend à disparaître. Plus la zone de mesure est isolée et la résistance de contact réduite, plus la mesure sera proche de la température régnant sous la surface.

En résumé:

La mise en œuvre de mesures indirectes consiste à être "au plus proche" du milieu que l'on cherche à mesurer.

Cela se traduit par les recommandations suivantes :

- Augmenter le plus possible l'effet de macro-constriction, par lequel le flux thermique interne va être capté par l'élément sensible. Cet effet sera amélioré par exemple par un régime turbulent de l'écoulement dans une conduite.
- Diminuer la résistance de contact du capteur en diminuant la rugosité des parois et / ou en utilisant de la pâte thermique.
- Diminuer l'effet d'ailette qui a tendance à refroidir ou réchauffer le capteur, par l'utilisation d'isolant.

Il est à noter que ces trois effets sont interdépendants.

La modification des conditions d'environnement permet l'utilisation d'un grand choix de capteurs, car leur impact sur la mesure peut être très minimisé par la mise en œuvre.

Les caractéristiques des capteurs à utiliser vont être:

- Une géométrie adaptée à la paroi (par exemple concave sur un tuyau)
- Une gaine la plus petite possible voire aucune, pour limiter la conduction thermique (sans que celle-ci ne sorte de l'isolant)
- Géométrie du capteur adaptée à la mesure (élément sensible au plus près de la paroi)
- Privilégier les matériaux conducteurs composant l'élément sensible

4.2.2. Effet de l'environnement

4.2.2.1. Conductivité thermique de la paroi

Pour les mesures indirectes sous isolant, la conductivité thermique du matériau aura moins d'influence que pour les mesures directes. Les mesures sur la paroi d'un isolant seront très délicates, avec des temps de réponses importants. Nous conseillons de ne pas faire de mesures de ce type.

4.2.2.2. Conditions thermiques sous la paroi

La macro-contraction sera améliorée par les caractéristiques thermiques internes du matériau ou du fluide dont on cherche à mesurer la température.

Dans le cas d'un écoulement dans une conduite, la mesure indirecte de la température sera influencée par :

- Le débit du fluide (ou sa vitesse le long des parois internes)
- La conductivité thermique du fluide
- L'épaisseur de la paroi
- L'emplacement de la mesure
- La présence ou non de coudes ou de perturbations de l'écoulement avant la zone de mesure

4.2.2.3. Impact de l'isolant

Lors de l'implantation d'un capteur de température de surface, le premier élément à prendre en compte pour améliorer la mesure de température de surface est l'isolation du capteur de l'environnement. Limiter l'effet d'ailette permet d'améliorer la fiabilité de la mesure en favorisant l'effet de macro-contraction et, en diminuant l'impact de la résistance de contact. On cherchera à isoler la gaine du capteur (s'il y en a) de l'environnement ainsi qu'autour de la zone de mesure. Concernant la zone de mesure, nous préconisons une isolation de la surface dont on cherche à déterminer la température, d'au-moins 5 fois le diamètre du capteur. L'isolant doit limiter l'échange thermique entre la surface dont on cherche à mesurer la température et les perturbations extérieures (flux d'air, flux lumineux, pertes par conduction, ...).

4.2.2.4. Rayonnement extérieur sur la paroi

Un rayonnement perturbe la mesure de température de surface. Toutefois, si la paroi et le capteur sont isolés, l'effet du rayonnement sera négligeable.

4.2.3. Amélioration de la mesure

4.2.3.1. Conditions thermiques de la surface

Pour mesurer la température d'un milieu en utilisant les capteurs de température de surface, il est conseillé de définir complètement le mesurande. Quelle température cherche-t-on à évaluer ? Quel est l'impact du thermomètre sur l'objet de la mesure ? Le thermomètre est-t-il bien adapté ? La géométrie correspond-t-elle bien au type de mesure ?

Il est important d'évaluer la capacité calorifique du matériau constituant la surface ainsi que la façon dont est réalisée la production de chaleur. Sur une surface chaude, le thermomètre (avec les différents effets parasites) va venir refroidir la surface dont on cherche à mesurer la température. Ce refroidissement va générer un biais de mesure plus ou moins important en fonction du soin apporté à la maîtrise des conditions d'environnement : isolation, conductivité de la surface, génération de la température...

Si le mesurande est la température de l'eau circulant dans une canalisation, il faudra évaluer le régime de l'écoulement (laminaire, turbulent), les propriétés thermiques du fluide (conductivité, convection), vérifier si la puissance de chauffe apportée au fluide est suffisante pour compenser les pertes thermiques,

Plus la conductivité thermique de la paroi et du fluide interne seront fortes, plus la mesure sera fiable avec un temps de stabilisation court. Pour des matériaux moins conducteurs, il faudra veiller à avoir des temps de stabilisation thermique suffisants.

4.2.3.2. État de surface/ contact thermique

Pour améliorer le contact entre la paroi et le capteur, il est nécessaire d'enlever s'il y a lieu tous les éléments entravant le contact thermique et de veiller à une faible rugosité de la surface (voir paragraphe 4.1.3.2 relatif aux mesures directes).

Pour remplacer l'air des cavités qui subsistent entre le capteur et la paroi par un matériau plus conducteur, une pâte thermique est généralement utilisée. Ces pâtes thermiques sont certes plus conductrices que l'air (environ 100 fois), mais restent moins conductrices qu'un matériau métallique par exemple. Il faudra veiller à ne pas trop en utiliser, ce qui reviendrait à ajouter une interface isolante !

La technique d'emploi de la pâte thermique consiste à appliquer une goutte sur la paroi puis à y poser le capteur en lui faisant subir un mouvement de translation ou de rotation afin d'enlever le surplus de pâte. Cette opération doit être réalisée en appliquant une pression suffisante, permettant de remplacer entièrement l'air. La pâte thermique ne doit pas empêcher le contact direct capteur/paroi des parties métalliques "visibles" de la paroi ou du capteur, la pâte n'étant là que pour combler les rugosités.

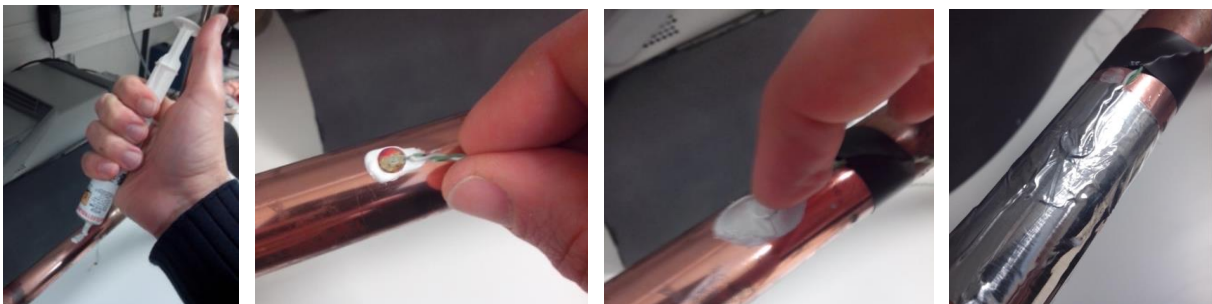


Figure 45 : mise en place d'un capteur avec de la pâte thermique

4.2.3.3. Courant d'air / rayonnement

Dans la mesure du possible, il faut veiller à isoler le capteur de température et l'ensemble de la zone de mesure. La mise en place d'un isolant sur le capteur protège celui-ci et la paroi des courants d'air et du rayonnement thermique. L'effet d'ailette peut quasiment être annulé.

On veillera aussi aux pertes thermiques le long de la gaine de protection (s'il y a lieu).

L'environnement isolé permet une grande souplesse dans le choix du capteur. Toutefois, on ne doit pas oublier que plus le capteur sera massif et isolé, plus le temps de réponse et de stabilisation thermique sera long. La difficulté en milieu isolé est d'apprécier la stabilité des mesures, il est nécessaire d'avoir une instrumentation de forte sensibilité.

L'installation d'un capteur gainé posé longitudinalement sur une canalisation par exemple, se fera typiquement par la pose serrée d'un adhésif (ou système de fixation) conducteur pour que le contact entre le capteur et la paroi soit le meilleur possible. Par dessus, il pourra être posé un adhésif isolant puis un isolant, pour isoler le capteur et la paroi de l'environnement. On veillera à ne pas avoir une épaisseur excessive d'isolant.

La mise en place d'un isolant d'épaisseur 1 cm et sur une longueur de 10 cm (5 cm de part et d'autre du capteur) réduit par exemple l'erreur de mesure de 3 °C à 1,3 °C dans cette expérimentation à 50°C (Figure 47). L'isolant diminue l'impact d'un flux d'air sur la mesure.

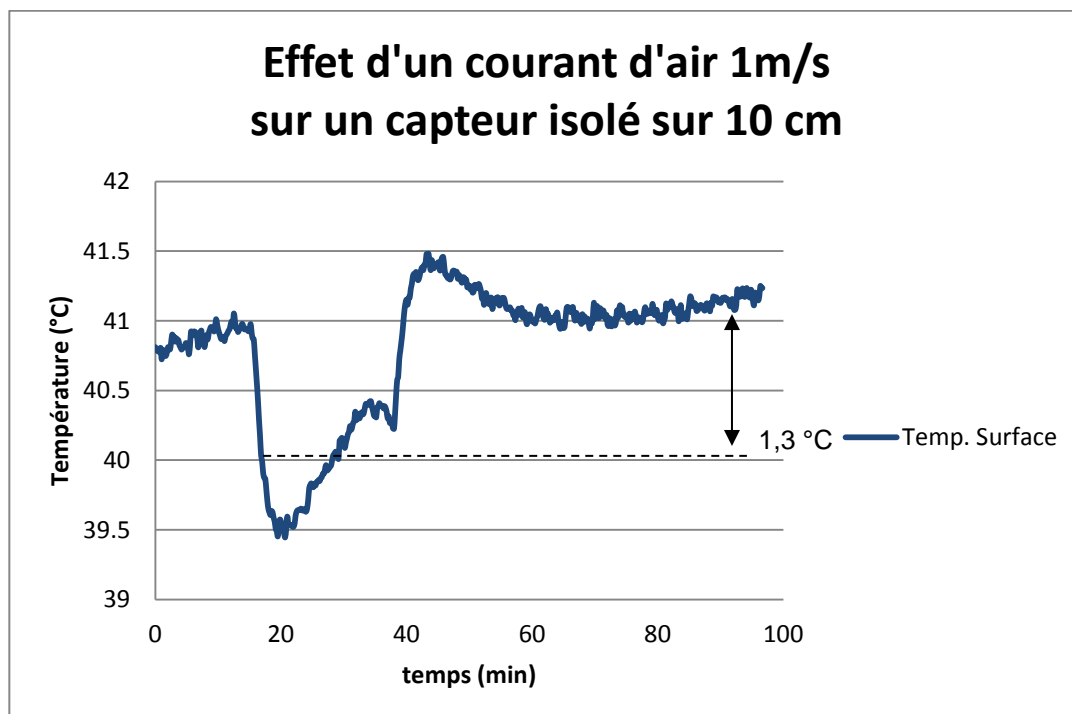


Figure 46 : Impact d'un flux d'air sur les mesures isolées (température ambiante)

4.2.3.4. Thermalisation du capteur

L'isolation du capteur demandera des temps de stabilisation assez importants. Cette stabilisation thermique sera d'autant plus longue que l'élément sensible du capteur est enrobé dans un matériau isolant, comme dans l'exemple de la Figure 47.

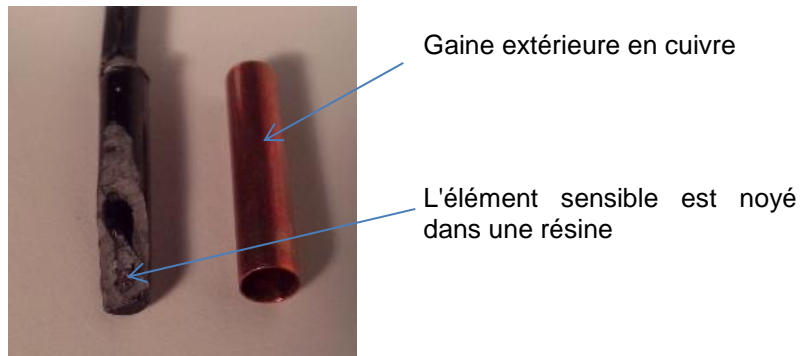


Figure 47 : photo de l'intérieur d'un thermistance (CTN)

Dans ce cas, à première vue, on peut supposer que l'élément sensible est en contact avec la gaine de cuivre. Après découpe, l'élément sensible est enrobé dans un isolant placé sous une gaine de cuivre.

4.2.4. **Choix du capteur de mesure**

Il est difficile de dresser une liste complète de tous les capteurs disponibles et de toutes les configurations. Ces quelques exemples ont pour but d'attirer l'attention sur différentes technologies disponibles et d'en montrer les éléments positifs ou négatifs à prendre en compte. Le lecteur pourra aiguïser son sens critique pour un choix adapté à ses besoins.

4.2.4.1. Taille du capteur

La taille de l'élément sensible est à prendre en considération, car plus il est ponctuel (petit) plus le temps de réponse sera court et moins le capteur perturbera le milieu de mesure. Un couple thermoélectrique basique (constitué uniquement de la soudure) peut donner de bons résultats, de même qu'une micro-sonde à résistance de platine. On évitera les capteurs volumineux, en particulier ceux noyés dans des matériaux isolants. Ceci étant, cela dépendra toujours du besoin final.

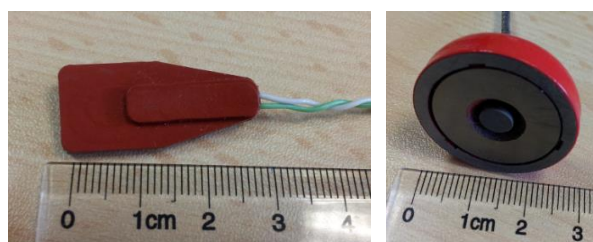


Figure 48 : Exemples de capteurs isolés ou volumineux

4.2.4.2. Capteurs ponctuels

Ce sont les capteurs basiques avec peu de conditionnement, la soudure chaude étant par exemple visible pour les thermocouples. Ces capteurs sont petits, ont des temps de réponse courts, sont peu chers, sont facilement implantables sur les parois. Ils peuvent être fixés avec un adhésif. Le biais de mesure reste acceptable. Ils sont à privilégier pour les mesures indirectes.

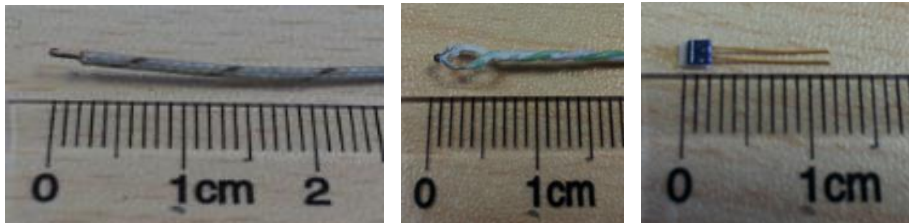


Figure 49 : Photos de capteurs ponctuels (deux thermocouples et une Pt100)

4.2.4.3. Capteurs encapsulés

Ces capteurs encapsulés sont solides et faciles d'utilisation. Par contre, ils mesurent aussi la température de l'environnement. En effet, leur conditionnement augmente la surface d'échange avec l'environnement (apport de masse thermique, surface plus importante), ce qui va favoriser l'effet d'ailette. Le point de contact avec la paroi est faible par rapport aux autres surfaces d'échanges. Pour les capteurs encapsulés sous forme de tube (voir photo), la mesure est généralement réalisée sur la génératrice entre la gaine et la paroi. Dans ce cas, le biais de mesure peut être important. Il faut éviter les conditionnements où l'élément sensible n'est pas en contact direct avec la paroi. Par contre, ce type de conditionnement solide peut être utile pour certaines applications industrielles, à voir au cas par cas.

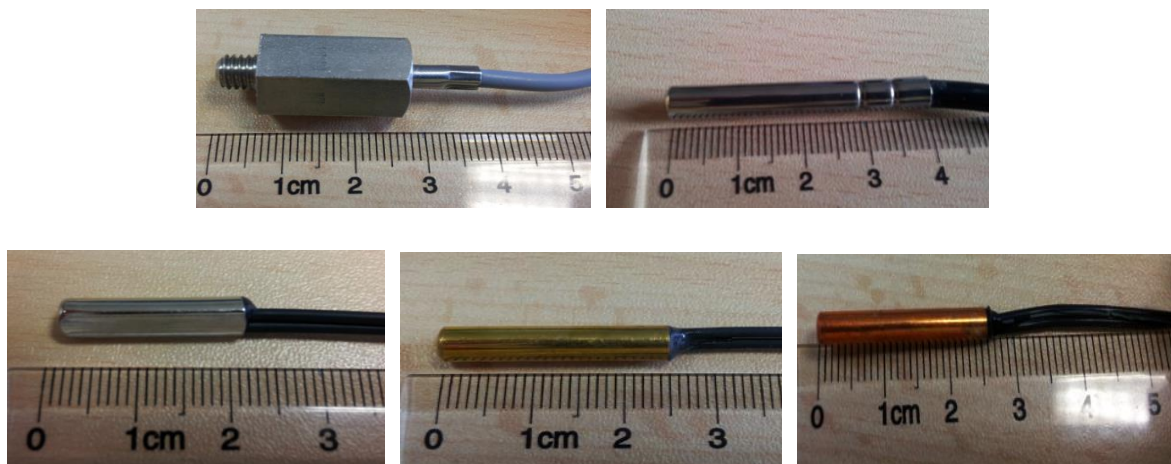


Figure 50 : Exemples de capteurs encapsulés

Il faut donc que l'environnement du capteur soit à la même température que celle qui règne au contact. Pour ce faire, il peut être utilisé :

- de la pâte thermique
- de l'adhésif conducteur
- un système de maintien rigide en cuivre
- de l'isolant par dessus le capteur

4.2.4.4. Capteurs noyés dans un matériau isolant

Ces capteurs isolés auront des temps de réponse longs et des biais de mesure importants.

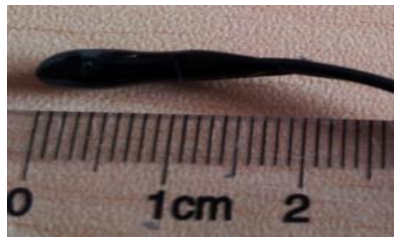


Figure 51 : Photos de capteurs encapsulés dans une résine isolante

4.2.4.5. Capteurs auxquels est ajouté un élément de contact

Le métal ajouté entre l'élément sensible et la surface va accroître la résistance thermique (résistance de contact et résistance du métal ajouté). Généralement, ces capteurs auront un biais de mesure important.

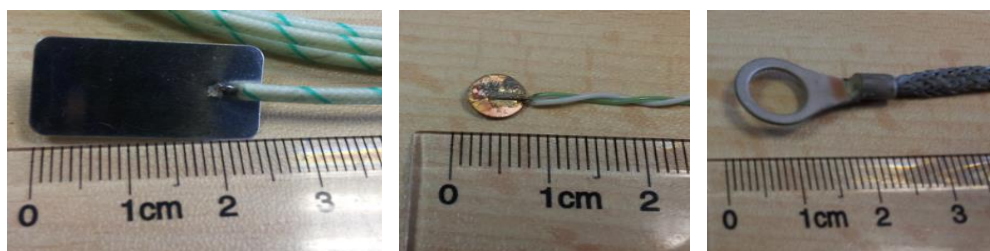


Figure 52 : Photos de capteurs avec ajout d'une semelle conductrice

4.2.4.6. Capteurs avec système de fixation

Certains capteurs intègrent le système de fixation. C'est plutôt une bonne approche surtout si l'élément sensible est noyé latéralement dans un support isolant (plutôt que conducteur). Dans ce cas, il ne faut pas oublier d'utiliser un isolant autour du capteur et de la paroi.

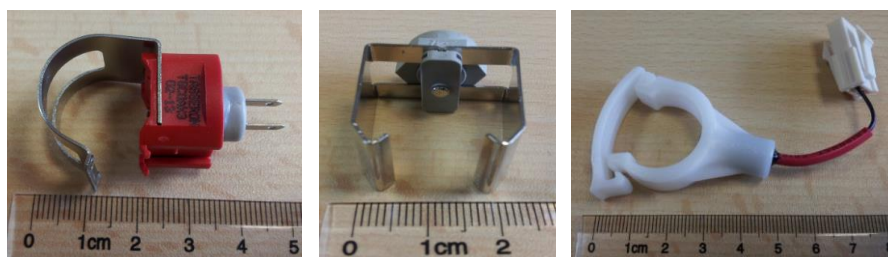


Figure 53 : Exemples de capteurs avec système de fixation intégré

4.2.4.7. Capteurs sur supports

Ces capteurs sont faciles d'utilisation. Par contre, il faut veiller à ce que leur support ne soit pas isolant, ce qui n'est généralement pas le cas. Ces capteurs peuvent présenter des biais de mesures importants selon la nature et l'épaisseur du support.

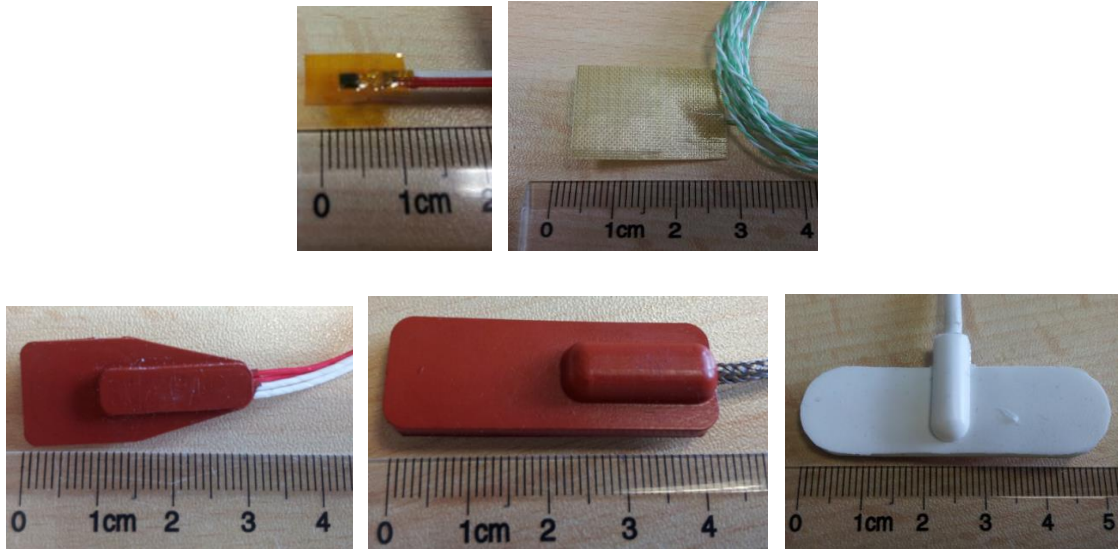


Figure 54 : Exemples de capteurs sur support

4.2.5. Traçabilité / étalonnage

La difficulté des mesures indirectes est qu'à ce jour il n'existe pas d'étalonnage adapté. Le nombre de configurations rencontrées pour ces mesures étant très grand, le développement de méthodes d'étalonnage universelles ou adaptées à chaque cas paraît improbable. En l'absence de méthode ou de banc d'étalonnage, il faut donc réaliser des essais préliminaires en laboratoire avec des experts afin de quantifier les facteurs d'influence sur les mesures et évaluer les incertitudes de mesures. Pour garantir le raccordement métrologique des mesures, on réalisera selon les cas des étalonnages en immersion ou en surface.

4.2.6. L'effet de l'opérateur

L'opérateur aura un rôle important lors de l'installation des capteurs, de l'isolant et des calculs afin d'estimer les flux thermiques, les différents biais de mesure et les incertitudes de mesure. Là encore, il faudra veiller au temps de stabilisation (et au temps de réponse) du capteur. Le choix du capteur, la pose de l'isolant et la technique d'application de la pâte thermique devront être maîtrisés.

4.2.7. Conclusion

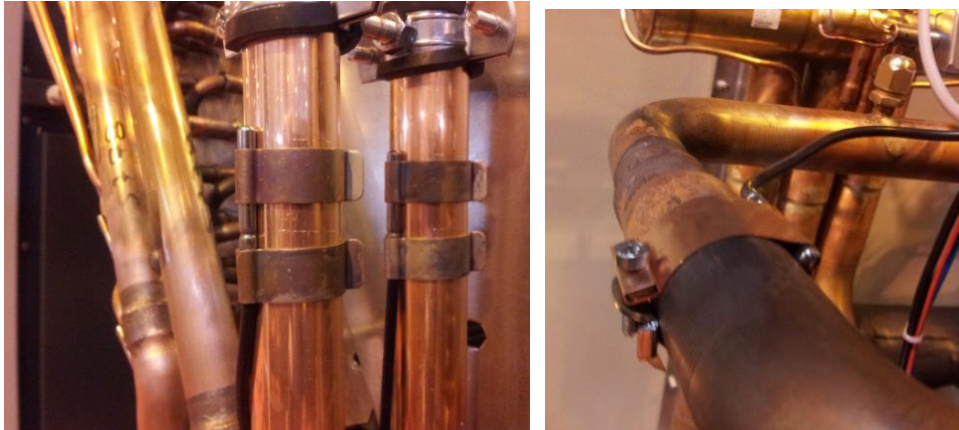
La mesure sera plus fiable lorsque :

- La surface est conductrice
- La surface est lisse et propre (peu rugueuse)
- Le contact thermique est correct (pâte thermique)
- Le flux thermique est important par rapport aux phénomènes risquant de perturber la mesure
- Le capteur est adapté et thermalisé
- Le capteur est isolé
- L'opérateur est expérimenté

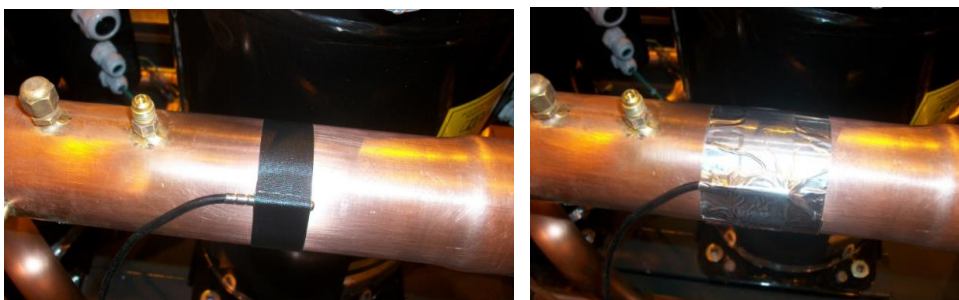
5. ANNEXES

5.1. Photos de capteurs en situation industrielle

Systèmes de fixation de capteurs placés longitudinalement à une conduite :



Installation de capteurs sur une conduite (fixation et isolation thermique)



Photos CIAT



Photos TRANE

5.2. Exemples de chaînes de mesure de températures de surface directes



Capteur de température de surface de référence du CETIAT



Capteurs de température de surface industriels

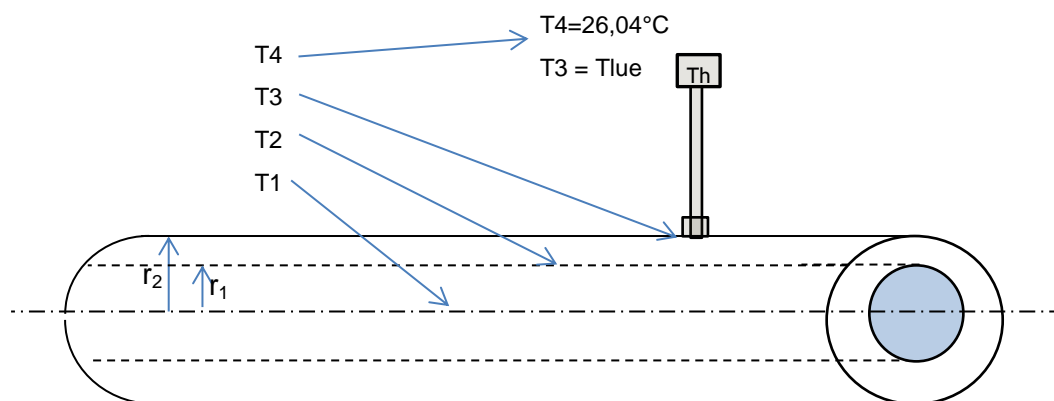
5.3. Calcul de la chute de température à travers une paroi

5.3.1. Données expérimentales :

Lors de l'évaluation de la température de l'eau circulant dans une canalisation, nous cherchons à calculer la déperdition thermique de la paroi. La mesure de température de paroi est réalisée avec un thermomètre portable appliqué directement sur la surface externe de la canalisation. Le thermomètre a été préalablement étalonné sur un banc d'étalonnage en surface. Les données du calcul sont :

- Hall non climatisé : la température varie de 24°C à 28°C
- Température de l'air durant les mesures : 26,04 °C
- Pas de courant d'air (vitesses d'air < 0,4 m/s), échanges de chaleur entre la canalisation et l'air par convection naturelle
- Apport de chaleur par rayonnement négligeable
- Position de la canalisation horizontale
- Ensemble des mesures réalisé en régime d'écoulement turbulent
- Canalisation d'eau chaude en DN50 (soit 48,6 mm)
- Paroi en acier inoxydable AISI 304L
- Conductivité thermique de la paroi : $\lambda_{\text{inox}} = 16,3 \text{ W/m.K}$
- Épaisseur de la paroi : 1,6 mm
- Débit d'eau : 10 m³/h
- Coefficients de transfert thermique côté eau et côté air sont respectivement : $h_{\text{eau}} = 10\,000 \text{ W/m}^2.\text{K}$ et $h_{\text{air}} = 14 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Longueur de la canalisation L

5.3.2. Schéma de principe de la mesure de température de contact



T_1 : température de l'eau au centre

T_2 : température à l'interface eau / paroi interne de la canalisation

T_3 : température de surface (interface paroi / air) ; température mesurée

T_4 : température de l'air ambiant ; température mesurée

5.3.3. Mode opératoire

- Mise en fonctionnement de la chaîne de mesure de température de contact
- Préchauffage de la chaîne de mesure et du capteur
- Relevé de 3 mesures de température de contact indépendantes (T_3) (le thermomètre est décollé de la surface entre deux mesures)
- Mesure de la température ambiante (T_4) du local
- Application des corrections d'étalonnage aux résultats de mesures (de T_3)
- Calcul de la chute de température à travers la paroi du tube inox (C_{dep})
- Détermination de la température interne de l'eau circulant dans la canalisation et de son incertitude

5.3.4. Modèle physique de détermination de la température de l'eau

$$T_{eau} = T_C + C_{dep}$$

- T_c : Température de contact mesurée sur la canalisation (T_3)
- C_{dep} : correction due à la chute de température entre l'eau et la paroi externe de la canalisation

5.3.5. Calcul de la chute de température dans la paroi (C_{dep})

$$C_{dep} = T_1 - T_3 = \phi [R_1 + R_2]$$

- C_{dep} : correction due à la chute de température dans la paroi
- T_1 : température de l'eau que l'on cherche à déterminer
- $T_3 = TC$: température de contact mesurée avec la chaîne de mesure de température
- ϕ : flux thermique entre l'eau et la paroi externe de la canalisation
- R_1 : résistance thermique entre l'eau et la paroi interne de la canalisation
- R_2 : résistance thermique de la canalisation en inox

Le flux thermique entre la paroi externe de la canalisation et l'air (puissance thermique perdue par la canalisation vers l'air) est :

$$\phi = [T_3 - T_4][h_{air} 2\pi r_2 L]$$

En détaillant l'expression des résistances thermiques R_1 et R_2 , la chute de température dans la paroi s'écrit :

$$C_{dep} = T_1 - T_3 = \phi \cdot \left[\frac{1}{h_{eau} 2\pi r_1 L} + \frac{\ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right]}{2\pi \lambda_{inox} L} \right]$$

Or la canalisation ne reçoit pas d'autre chaleur que celle provenant de l'eau et l'équilibre thermique est atteint.

Le flux thermique entre l'eau et la surface externe de la canalisation est donc égal au flux thermique entre la surface externe de la canalisation et l'air.

D'où :

$$C_{\text{dep}} = [T_3 - T_4][h_{\text{air}}r_2] \left[\frac{1}{h_{\text{eau}}r_1} + \frac{\ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right]}{\gamma_{\text{inox}}} \right]$$

5.3.6. Application numérique

Température de la paroi :

Moyenne des trois mesures $T_{3(k=2)} = 79,7 \pm 1,5 \text{ °C}$

Température du local :

$T_{4(k=2)} = 26,04 \pm 0,42 \text{ °C}$

Chute de température dans la paroi :

paramètres	Valeurs	unité	incertitude
T3	352,85	K	0,73
T4	299,19	K	0,21
hair	14	W/m ² .K	15
heau	10 000	W/m ² .K	10 000
λinox	16,3	W/m.K	8
r2	0,0243	m	0,002
r1	0,0227	m	0,002

$$C_{\text{dep}} = [352,85 - 299,19][14 * 0,0243] \left[\frac{1}{10000 * 0,0227} + \frac{\ln \left(\frac{0,0243}{0,0227} \right)}{16,3} \right] = 0,157 \text{ °C}$$

Dans ce cas la perte thermique dans la paroi non isolée est de 0,16 °C.

La température de l'eau dans la canalisation peut donc être évaluée à :

$$T_1 = 79,7 + 0,16 = 79,9 \text{ °C}$$

Expression de l'incertitude sur C_{dep} :

$$u_c^2(C_{dep}) = \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial T_3} \right]^2 u^2(T_3) + \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial T_4} \right]^2 u^2(T_4) + \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial r_1} \right]^2 u^2(r_1) + \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial r_2} \right]^2 u^2(r_2) \\ + \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial h_{air}} \right]^2 u^2(h_{air}) + \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial h_{eau}} \right]^2 u^2(h_{eau}) + \left[\frac{\partial C_{dep}}{\partial \lambda_{inox}} \right]^2 u^2(\lambda_{inox})$$

$$u(C_{dep}) = 0,28 \text{ °C (avec } k=2)$$

- $u(T_3)$: incertitude sur la température de la paroi (calculée dans la première phase)
- $u(T_4)$: incertitude provenant de la mesure de la température ambiante
- $u(r_2)$: incertitude provenant du diamètre externe de la canalisation
- $u(r_1)$: incertitude provenant du diamètre interne de la canalisation
- $u(h_{air})$: incertitude provenant de la détermination du coefficient de convection de l'air
- $u(h_{eau})$: incertitude provenant de la détermination du coefficient de convection de l'eau
- $u(\lambda_{inox})$: incertitude provenant de la détermination du coefficient de conduction thermique de l'inox

Expression de l'incertitude sur T_1 :

$$u(T_{eau}) = \sqrt{u^2(T_c) + u^2(C_{dep})}$$

$$u(T_{eau}) = 1,8 \text{ °C (en } k=2)$$

Le résultat s'écrira pour un facteur d'élargissement de $k=2$ (soit une probabilité de 95% que le résultat soit dans l'intervalle de confiance)

$$T_{eau} = (79,9 \pm 1,5) \text{ °C}$$

Bibliographie

1. Vocabulaire international de métrologie (VIM 3e édition) 2012 – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés, *JCGM 200*
2. Analyse théorique des erreurs liées aux transferts de chaleur parasites lors de la mesure d'une température de surface par contact – *B.Cassagne, G.Kirsch, J-P.Bardon - Int. J. Heat Mass Transfer – vol.23 – pp1207-1217 (1980)*
3. Initiation aux Transferts Thermiques - *Jean-François Sacadura; Tec & Doc Lavoisier; 2000; Pages 445*
4. Mesures des résistances thermiques superficielle et de contact au moyen de la constante de temps fondamentale – *B. Bourouga ; J-P Bardon - hr. J. Hem Mass Transfer. Vol. 35, No. 2, pp. 361-373 (199)2 - 0017-9310*
5. Mesures par contact des températures de surface - *J-P Bardon, M. Raynaud, Y.Scudeller - Rev Gén Therm (HS95) 34 pp 15-35*
6. Contribution for the calibration and the use of surface temperature sensors – *R.Morice, E.András, E.Devin, T.Kovács Proceedings of Tempmeko 2001, VDE Verlag GmbH, Berim, (2002), vol. 2, pp.1111-1116*
7. Comparison of primary standards for liquid micro flow rates, draft B report, (March 2015) *EURAMET project 1291*
8. Interlaboratory comparison of reference surface temperature apparatus at NMIs – *E.Andras - Tempmeko 1017- 1023 (2004)*
9. Comparison of the reference surface temperature apparatus at NMIs by comparison of transfer surface temperature standards – *final report (nov 2003) - E.Andras - Euromet Project N°635*
10. Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces - *Norme NF EN ISO 13732-1*
11. A CFD Study on a Calibration System for Contact Temperature Probes - *F. Arpino • V. Fericola • A. Frattolillo • L. Rosso - Int J Thermopys 30 : 306-315 DOI 10.1007/s10765-008-0451-8 (2009)*
12. Guide d'étalonnage des capteurs de surface - *R. Morice - Guide LNE (téléchargeable sur le site du LNE)*
13. Guide d'utilisation des capteurs de surface - *R. Morice - Guide LNE (téléchargeable sur le site du LNE)*
14. Température de surface - Mesure par contact – *J- P. Bardon, B. Cassagne - Techniques de l'Ingénieur- r2730 pp 1-22(1981)*
15. Rayonnement thermique des matériaux opaques – *MATTEI - Techniques de l'Ingénieur - be8210*
16. Transmission de l'énergie thermique – Conduction - *A. Degiovanni - Techniques de l'Ingénieur - be820*
17. Transmission de l'énergie thermique – Convection thermique et massique - *J. Padet - Techniques de l'Ingénieur - be8205*

Table des illustrations

Figure 1 : Graphique issu du sondage réalisé en 2013 par le CETIAT	7
Figure 2 : Photos de doigts de gant	8
Figure 3 : Photos de traversées de parois et de leur mise en œuvre (source Trane)	9
Figure 4: Photos d'un mélangeur et d'un capteur de température de surface (source TI)	10
Figure 5: Photo d'une extrudeuse (source extrusion-relative.com)	11
Figure 6: Photo d'un moule de bouteille plastique	11
Figure 7: Contrôle de la température d'une plaque de cuisson et d'un radiateur	12
Figure 8 : Mesure de la température d'un mur et d'une paroi d'un ballon d'eau chaude	13
Figure 9 : Implantation de capteurs de surface sur un échangeur (source CIAT)	13
Figure 10 : Photo d'une chaudière Frisquet	14
Figure 11 : Photo d'une pompe	14
Figure 12 : Illustration de la conduction thermique	15
Figure 13 : Illustration de la convection	16
Figure 14 : Illustration du rayonnement thermique	17
Figure 15 : Illustration de l'agitation moléculaire qui est proportionnelle à la température	17
Figure 16 : Illustration de la température de surface par l'agitation particulière	18
Figure 17 : Illustration de la matérialisation de la température de surface	18
Figure 18 : Illustration des modes de transferts thermiques	19
Figure 19 : Application du thermomètre sur la surface	19
Figure 20 : Schéma des trois effets parasites d'après [14]	20
Figure 21 : Illustration de l'effusivité	21
Figure 22 : Photos d'éléments sensibles en platine	23
Figure 23 : Photos d'éléments sensibles de couples thermoélectriques	24
Figure 24 : photos d'éléments sensibles de thermistances	25
Figure 25 : Photos d'un thermomètre infra rouge et d'un détecteur	25
Figure 26 : photos d'éléments thermosensibles	26
Figure 27 : Générateurs de température de surface (LNE, Omega, Pyro-contrôle)	30
Figure 28 : Modélisation : température de surface directe avant application du capteur	33
Figure 29 : Modélisation : température de surface directe pendant l'application du capteur	33
Figure 30 : Matérialisation : température de surface directe après l'enlèvement du capteur	34
Figure 31 : Erreurs parasites en mesure indirectes et de leurs poids relatives	34
Figure 32 : Corrections d'étalonnage en fonction de la conductivité thermique (LNE)	36
Figure 33 : Impact d'un flux d'air sur les mesures (température ambiante)	37
Figure 34 : Impact d'un rayonnement sur les mesures à 23°C	37
Figure 35 : Nettoyage de la surface en cuivre (avant / après)	39
Figure 36 : Les trois types de conditionnement de capteurs de surface (LNE)	39
Figure 37 : Photos de capteurs type I (avec ajout d'une semelle conductrice)	40
Figure 38 : Photos d'un capteur de mesures type II	40
Figure 39 : Photos d'un capteur de mesures type III	40
Figure 40 : Modélisation : température de surface indirecte avant application du capteur	42

Figure 41 : Modélisation : température de surface pendant application du capteur	42
Figure 42 : Modélisation : température de surface après stabilisation thermique	43
Figure 43 : Schéma des flux thermique lors d'une mesure indirecte	43
Figure 44 : Schéma des erreurs parasites et de leurs poids relatifs en mesure indirecte	43
Figure 45 : mise en place d'un capteur avec de la pâte thermique	46
Figure 46 : Impact d'un flux d'air sur les mesures isolées (température ambiante)	47
Figure 47 : photo de l'intérieur d'un thermistance (CTN)	48
Figure 48 : Exemples de capteurs isolés ou volumineux	48
Figure 49 : Photos de capteurs ponctuels (deux thermocouples et une Pt100)	49
Figure 50 : Exemples de capteurs encapsulés	49
Figure 51 : Photos de capteurs encapsulés dans une résine isolante	50
Figure 52 : Photos de capteurs avec ajout d'une semelle conductrice	50
Figure 53 : Exemples de capteurs avec système de fixation intégré	50
Figure 54 : Exemples de capteurs sur support	51

Le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques est un organisme de référence pour les études, essais, étalonnages et son expertise est reconnue dans les domaines de l'aérodynamique, la thermique, l'acoustique, la métrologie et la maîtrise de l'énergie. Depuis 1960, le CETIAT propose un accompagnement sur-mesure aux industriels : ses ingénieurs et techniciens amènent expertise et moyens techniques aux industriels pour innover, améliorer ou optimiser et valider leurs process, produits et équipements.

En tant que Centre Technique Industriel, le CETIAT conduit un programme d'études collectives pour ses 360 ressortissants industriels (fabricants de matériel de chauffage, ventilation, conditionnement d'air, dépollution, filtration, humidification de l'air, séchage) et il y consacre chaque année un budget de près de 3,5 M€.

Le CETIAT en bref :

- *130 personnes pour un chiffre d'affaires de 12 M€*
- *2500 clients dans des domaines d'activité variés : automobile, aéronautique, ferroviaire, ventilation, chimie, procédés textiles, santé, pharmacie, papeterie, agro-alimentaire, réfrigération, plasturgie, chauffage, climatisation, sidérurgie, ...*
- *Plus de 50 plates-formes d'essais, permettant de tester de nombreux équipements dans le cadre d'essais de conformité, de mener des études de développement de produits ou de procédés de fabrication*
- *Plus de 6 bancs de métrologie dont 3 références nationales pour des étalonnages sur site ou en laboratoire*
- *Une offre de plus d'un centaine de stages de formation, avec des plates-formes pédagogiques en vraie grandeur*
- *Une certification ISO 9001:2008 pour l'ensemble des activités*

CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRODYNAMIQUES ET THERMIQUES

Domaine Scientifique de la Doua - 25, avenue des Arts - BP 52042 - 69603 Villeurbanne Cedex - France

Tél. +33 (0)4 72 44 49 00 - Fax. +33 (0)4 72 44 49 49 - www.cetiat.fr - Email : commercial@cetiat.fr

Siret 775 686 967 00024 - Ape 7219 Z