

GUIDE D'UTILISATION des capteurs de température de surface

Validation de la méthode par des cas concrets d'application en milieu industriel

Ce document a été élaboré avec la participation de :

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

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

0. SOMMAIRE

0.	SOMMAIRE	2
1	AVANT-PROPOS	3
2	DOMAINE D'APPLICATION	3
3	DEFINITION, TERMINOLOGIE	4
4	MESURE D'UNE TEMPERATURE DE SURFACE PAR CONTACT	4
5	CHOIX ET UTILISATION D'UN CAPTEUR DE SURFACE	6
5.1	LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES	6
5.2	CRITERES DE CHOIX ET PERFORMANCES METROLOGIQUES	7
5.3	UTILISATION / MODE OPERATOIRE	8
5.4	PRECAUTIONS D'UTILISATION	9
5.5	INCERTITUDE D'UTILISATION	9
6	EXEMPLES PRATIQUES D'UTILISATION	10
6.1	DESCRIPTION DES CAPTEURS UTILISES	10
6.2	EXEMPLE 1 : MESURE PAR CAPTEUR DE TEMPERATURE DE SURFACE APPLIQUEE A LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE INTERNE D'EAU CIRCULANT DANS UNE TUYAUTERIE EN REGIME ETABLI	12
6.3	EXEMPLE 2 : MESURE PAR CAPTEUR DE TEMPERATURE DE SURFACE APPLIQUEE A LA SURVEILLANCE DE LA TEMPERATURE INTERNE D'UN FLUIDE CIRCULANT DANS UNE TUYAUTERIE EN REGIME DYNAMIQUE	16
6.4	EXEMPLE 3 : MESURE APPLIQUEE A LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UNE CANALISATION DANS LAQUELLE CIRCULE DE LA VAPEUR	19
6.5	EXEMPLE 4 : MESURE APPLIQUEE A LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UNE BARRE EN CUIVRE CHAUFFEE PAR EFFET JOULE	22
7	BIBLIOGRAPHIE	24

1 AVANT-PROPOS

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

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

Ce guide a pour objet de présenter les précautions relatives à une utilisation correcte de ces capteurs. Il fait partie d'un ensemble de deux fascicules visant à l'amélioration de la qualité et de la fiabilité des mesures par capteurs de température de surface [20] (Guide 1 : « Guide d'étalonnage des capteurs de température de surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures »).

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

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

2 DOMAINE D'APPLICATION

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

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

Ce document se focalise sur l'utilisation de ces capteurs mais ne traite pas de façon exhaustive les technologies existantes et les techniques de fixation (capteurs fixes). Pour ces points, il est conseillé de consulter les fascicules spécialisés [14].

Ces différents capteurs peuvent être utilisés pour :

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

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

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

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

- gamme de température : de l'ambiante jusqu'à 300°C ;
- matériau mesuré : « bon » conducteur thermique (métal ou alliage métallique) et « bon » état de surface [20].

3 DEFINITION, TERMINOLOGIE

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

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

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

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

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

4 MESURE D'UNE TEMPERATURE DE SURFACE PAR CONTACT

La température de surface peut être estimée :

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

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

Les sources d'erreur proviennent majoritairement de la conjonction de trois effets :

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

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

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

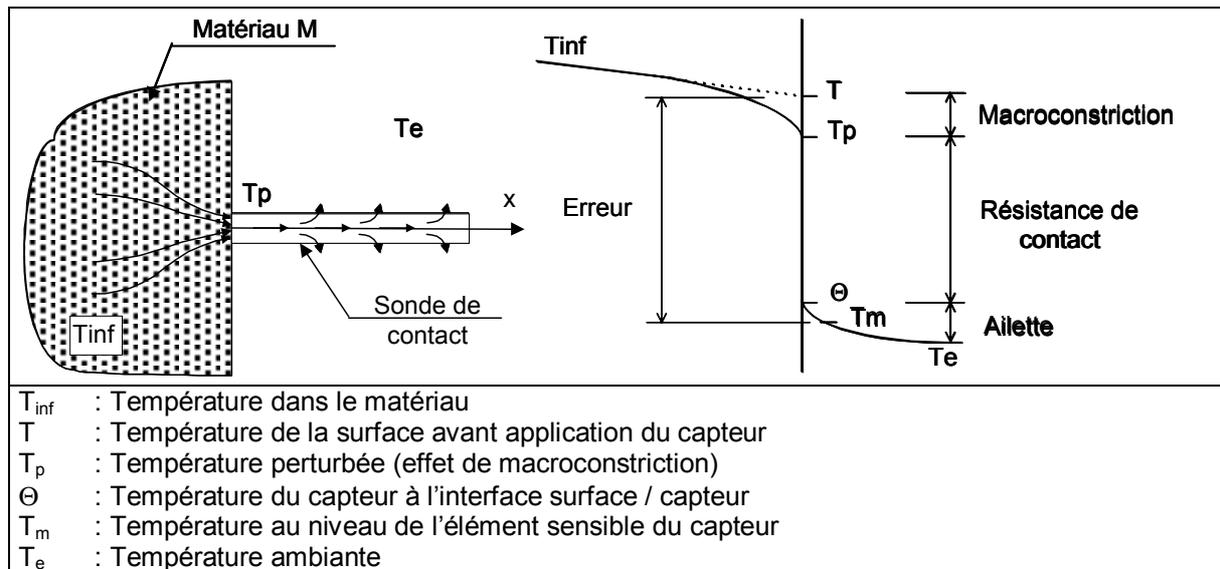


Figure 1 : Effets perturbateurs liés à l'application d'un capteur de température de surface

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

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

où

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

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

5 CHOIX ET UTILISATION D'UN CAPTEUR DE SURFACE

5.1 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES

Les technologies de capteurs peuvent être classées en trois catégories (Figure 2). Les thermo-électrodes peuvent être constituées par deux rubans (ou fils spiralés) soudés ensemble et directement mis en contact avec la surface (Figure 2, type (II)), ou peuvent être soudées à une lame conductrice intermédiaire (Figure 2, type (I) et (III)).

Lors de l'application, le positionnement est conditionné par la déformation subie par les fils (type (I)) ou par l'élément conducteur (type (III)). Les capteurs utilisés sont équipés d'un dispositif limitant la pression exercée par l'opérateur. Ce dispositif peut être constitué par des butées ou par le corps même du capteur.

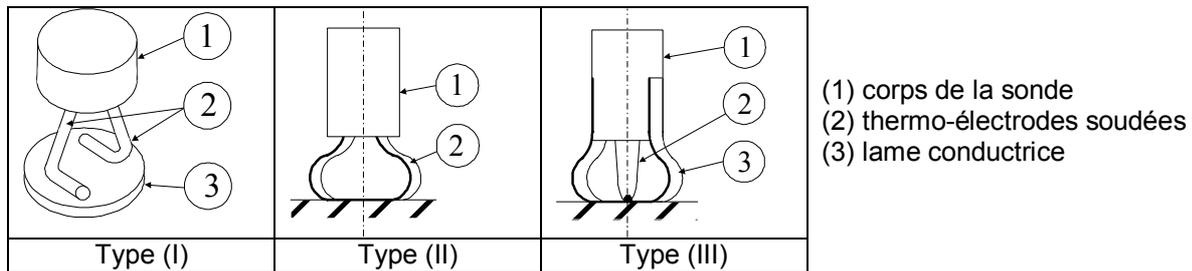


Figure 2 : Différentes technologies d'éléments sensibles – capteurs amovibles

L'élément sensible des capteurs de température de surface fixes ou amovibles peut également être constitué par un élément résistif (résistance de platine ou thermistance par exemple).

Les capteurs de température de surface amovibles sont appliqués à la surface du matériau mesuré par simple pression de l'utilisateur. Les capteurs fixes sont associés à un élément de fixation extérieur (collage, ruban adhésif, collier de serrage ...) afin de les maintenir appliqués à la surface du matériau.

5.2 CRITERES DE CHOIX ET PERFORMANCES METROLOGIQUES

Tableau 1 : Aide au choix des capteurs de température de surface

Caractéristiques observées d'un ensemble de capteurs représentatifs du marché		Domaine d'utilisation				Etalonnage
		Mesure absolue de la température de surface (1)	Evolution ou variation de température	Exactitude de la mesure effectuée	Adaptation aux surfaces courbes	Etalonnage par comparaison à une température de surface (1)
Capteurs de température de surface fixes	Timbres, films	Oui	Oui	Bonne	Oui	Oui (2)
	Type (I)	Non	Oui	Mauvaise	Non	Non
	Type (II)	Oui	Oui	Passable	Oui	Oui (2)
	Type (III)	Oui	Oui	Bonne	Oui	Oui (2)
Capteurs de température de surface amovibles	Type (I)	Non	Oui	Mauvaise	Non	Non
	Type (II)	Oui	Oui	Passable	Oui	Oui
	Type (III)	Oui	Oui	Bonne	Oui	Oui

(1) : contact direct sur matériaux conducteurs (métaux et alliages) non rugueux

(2) : dispositif de fixation (collage, serrage, ...) à intégrer lors de l'étalonnage

Capteurs de température de surface fixes, timbres, ou patch

Les résultats de mesure de température de surface associés à ces capteurs sont très sensibles à la méthode de montage et peuvent considérablement varier en fonction du dispositif de fixation :

- l'utilisation d'un collier de serrage engendre une contrainte mécanique modifie la réponse du capteur (effet « jauge de contrainte ») ;
- la nature du produit de fixation et/ou la présence d'un isolant thermique modifie les échanges thermiques.

L'étalonnage de tels capteurs doit par conséquent intégrer la prise en compte de la méthode de fixation et doit être spécifiée dans le certificat d'étalonnage.

Capteurs de température de surface amovibles, types (I),(II),(III)

Les performances métrologiques les meilleures sont atteintes avec les capteurs qui mettent en contact direct l'élément sensible avec la paroi, tels que par exemple les capteurs dont les thermoéléments se présentant sous la forme d'un ruban (type (II)). Cependant, les résultats obtenus sont influencés par l'opérateur indépendamment du type de capteur.

Ces capteurs étant généralement appliqués manuellement, il n'est pas nécessaire de leur adjoindre un dispositif externe de fixation. Une pâte thermique peut toutefois améliorer le contact capteur / surface. L'ensemble de ces éléments doivent être intégrés à l'étalonnage.

Dans le cas de la mesure d'une faible variation de température (évolution de température d'un processus, contrôle continu...), l'utilisateur peut avoir recours à ces capteurs, les mesures étant cependant fortement entachées de l'effet opérateur.

Méthode d'étalonnage

Les capteurs pouvant faire l'objet d'un étalonnage en température de surface sont ceux dont la correction d'étalonnage Corr, incertitude incluse, est inférieure aux valeurs indiquées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Critères d'acceptabilité d'étalonnage des capteurs de température de surface en termes de correction d'étalonnage

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

5.3 UTILISATION / MODE OPERATOIRE

Quel que soit le type de sonde utilisée, l'opérateur doit s'assurer que la stabilité thermique du matériau (barre conductrice, conduite, ...) sur lequel sont effectués les essais est atteinte.

Pour les capteurs amovibles équipés de poignées, il est indispensable de minimiser l'effet « ailette » en appliquant le mode opératoire suivant :

- mettre la sonde en contact avec le matériau (préchauffage) ;
- attendre la stabilisation de la température vue par la sonde (le capteur est maintenu sur la surface manuellement dans l'orientation optimum permettant la lecture de la température la plus élevée) ;
- retirer le capteur et le remettre immédiatement en contact pour limiter son refroidissement ;
- réitérer les étapes b et c (afin d'estimer la répétabilité des mesures) jusqu'à l'obtention d'une série de 3 mesures stables (les premières mesures relevées correspondent au préchauffage du capteur et sont généralement plus faibles) ;
- relever la température.

Il est souhaitable de renouveler ce mode opératoire par un opérateur différent afin d'estimer « l'effet opérateur ».

Pour les capteurs fixes (thermistance, PT100 encapsulée ou sur substrat, ...), le mode opératoire consiste simplement à attendre la stabilité thermique après application du capteur et à relever au moins trois mesures ; la difficulté majeure restant la fixation de ce type de capteur.

5.4 PRECAUTIONS D'UTILISATION

L'utilisateur doit se référer aux conditions spécifiées lors de l'étalonnage. Elles énumèrent et fixent les paramètres d'influence de la mesure. Les précautions d'utilisation des capteurs sont liées aux conditions dans lesquelles l'étalonnage a été effectué, en particulier :

- Le dispositif ne doit pas être situé à proximité d'une source de chaleur convective ou radiative susceptible de perturber les mesures (éclairage halogène, rayonnement solaire direct, four à air pulsé...);
- L'indicateur numérique, alimenté, doit être placé dans les conditions atmosphériques proches des conditions de l'étalonnage (température ambiante...);
- la vitesse résiduelle de l'air du laboratoire autour du dispositif ne doit pas excéder 0,4 m/s (pas de courants d'air);
- Si la nature du matériau mesuré n'est pas la même que celle utilisée lors de l'étalonnage, une étude préalable doit définir l'influence de ce paramètre (peut être déterminé par l'étalonnage du capteur sur des matériaux de natures différentes);
- La surface du matériau mesuré doit être suffisamment lisse (rugosités moyennes $1\mu\text{m}$ lors de l'étalonnage correspondant à un usinage courant).

D'autres précautions d'emploi peuvent être identifiées en fonction de la spécificité des essais :

- la source d'énergie (nature du fluide circulant à l'intérieur d'une tuyauterie, débit et sens du fluide, ...);
- la dimension et la forme de la zone de mesure;
- ...

L'utilisateur sur site pourra consulter le Certificat d'Etalonnage afin de se rapprocher des conditions environnementales correspondant à l'étalonnage du capteur de température de surface. Il pourra par exemple avoir recours sur site industriel à des écrans pour limiter un éventuel rayonnement solaire direct ou des courants d'air.

5.5 INCERTITUDE D'UTILISATION

L'utilisateur devra identifier les différentes sources d'erreur et estimer l'incertitude associée. Les principales composantes sont :

- . incertitude d'étalonnage du capteur ;
- . répétabilité des mesures ;
- . résolution du dispositif afficheur ;
- . dérive du capteur ;
- . effet opérateur ;
- . écarts aux conditions spécifiées: matériau (nature, état de surface), température ambiante,...

Pour évaluer les sources d'erreur citées précédemment, on pourra se référer au Guide d'étalonnage [20] ainsi qu'aux exemples pratiques donnés ci-après.

6 EXEMPLES PRATIQUES D'UTILISATION

Quatre exemples présentés à la suite illustrent des applications de mesure au moyen de capteurs de température de surface. Les différentes campagnes de mesure ont été réalisées au moyen de capteurs de température de surface préalablement étalonnés.

6.1 DESCRIPTION DES CAPTEURS UTILISES

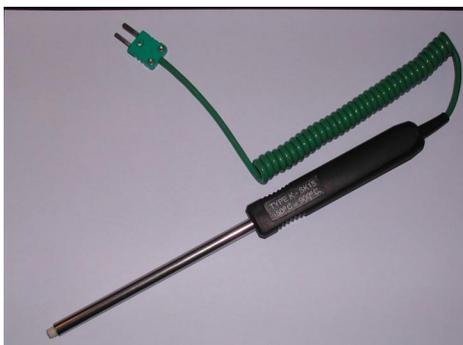
Les capteurs utilisés dans le cadre de l'élaboration de ce guide sont principalement des capteurs amovibles (capteurs à poignée). Les capteurs fixes n'ayant pas été étalonnés, ils ont été utilisés à titre indicatif ou comparatif. Les 5 capteurs utilisés sont décrits dans le Tableau 3 et présentés Figures 3 à 7.

Tableau 3 : Caractéristiques des capteurs de température de surface utilisés lors des campagnes d'essais

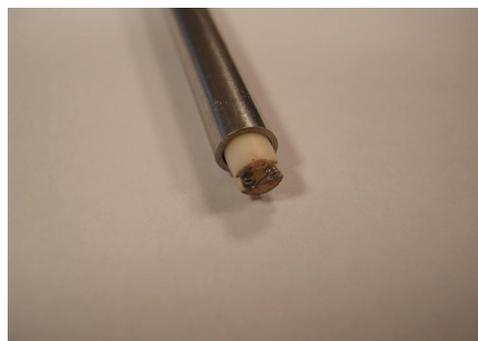
Capteur	Application	Type	Élément sensible	Technologie	Utilisation
893788-1	Amovible	Type II	Thermocouple type K	Ressort	Exemples 1, 3, 4
893788-2	Fixe	-	Sonde Pt100	Sonde plate sur substrat alumine	Exemple 2
893788-3	Amovible	Type II	Thermocouple type K	Ruban	Exemples 1, 3, 4
893788-4	Amovible	Type I	Thermocouple type K	Fils soudés sur support	Exemples 1, 3, 4
893788-5	Amovible	Apparenté au type III	Sonde Pt100	Sonde plate sur substrat alumine	Exemples 1, 3, 4

Le capteur fixe a fait l'objet d'un étalonnage préalable par immersion. Les capteurs amovibles ont fait l'objet d'un étalonnage en température de surface préalable aux campagnes de mesures sur site. La correction d'étalonnage du capteur 893788-4 ne répond pas aux critères d'acceptabilité fixés au chapitre 5.2. Les mesures effectuées au moyen de ce capteur lors des essais sur site ont donc été considérées comme purement indicatives.

Lors des campagnes d'essai, les capteurs amovibles ont été appliqués sur la paroi sans adjonction de pâte thermiquement conductrice. Plusieurs opérateurs ont effectuées les mesures. Le capteur fixe a été appliquée sur la paroi au moyen d'un scotch aluminium avec adjonction de pâte thermiquement conductrice. Les 5 capteurs ont été reliés au même mesureur de température.



Corps de la sonde



Élément sensible (détail)

Figure 3 : Capteur de température de surface 893788-1



Figure 4 : Capteur de température de surface 893788-2



Corps de la sonde



Elément sensible (détail)

Figure 5 : Capteur de température de surface 893788-3



Corps de la sonde



Elément sensible (détail)

Figure 6 : Capteur de température de surface 893788-4



Corps de la sonde



Elément sensible (détail)

Figure 7 : Capteur de température de surface 893788-5

6.2 EXEMPLE 1 : MESURE PAR CAPTEUR DE TEMPERATURE DE SURFACE APPLIQUEE A LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE INTERNE D'EAU CIRCULANT DANS UNE TUYAUTERIE EN REGIME ETABLI

6.2.1 Introduction

Afin d'établir des bilans thermiques dans les réseaux de chauffage industriel, il est nécessaire de déterminer le débit du fluide circulant dans les canalisations ainsi que la température aux points d'entrée et de sortie du circuit considéré. La détermination de la température du fluide par des moyens conventionnels (insertion d'un capteur dans un doigt de gant) n'étant souvent pas réalisable en pratique, une alternative consiste à déterminer la température par déduction à partir de la température de surface des tuyaux. Cette approche nécessite :

- la connaissance de la température de surface de la paroi,
- la connaissance de la chute de température à travers la paroi,

afin de remonter par déduction à la température interne du fluide. Cette méthode met par conséquent en évidence un besoin de traçabilité en température de surface, et donc l'utilisation de capteurs de température de surface étalonnés en laboratoire. Elle nécessite également d'établir un bilan thermique préalable permettant d'estimer le flux thermique perdu à travers la paroi de la canalisation. Les détails du bilan thermique établi ont été omis afin de ne pas alourdir le corps du texte.

Cette méthode, après avoir été validée sur une section d'essai décrite à la suite, peut être utilisée en routine. La validation de la méthode a consisté à comparer des mesures de température par immersion avec des températures issues de mesures de température de surface. Les résultats présentés à la suite montrent une bonne cohérence entre ces deux grandeurs en regard des incertitudes estimées.

6.2.2 Description des essais

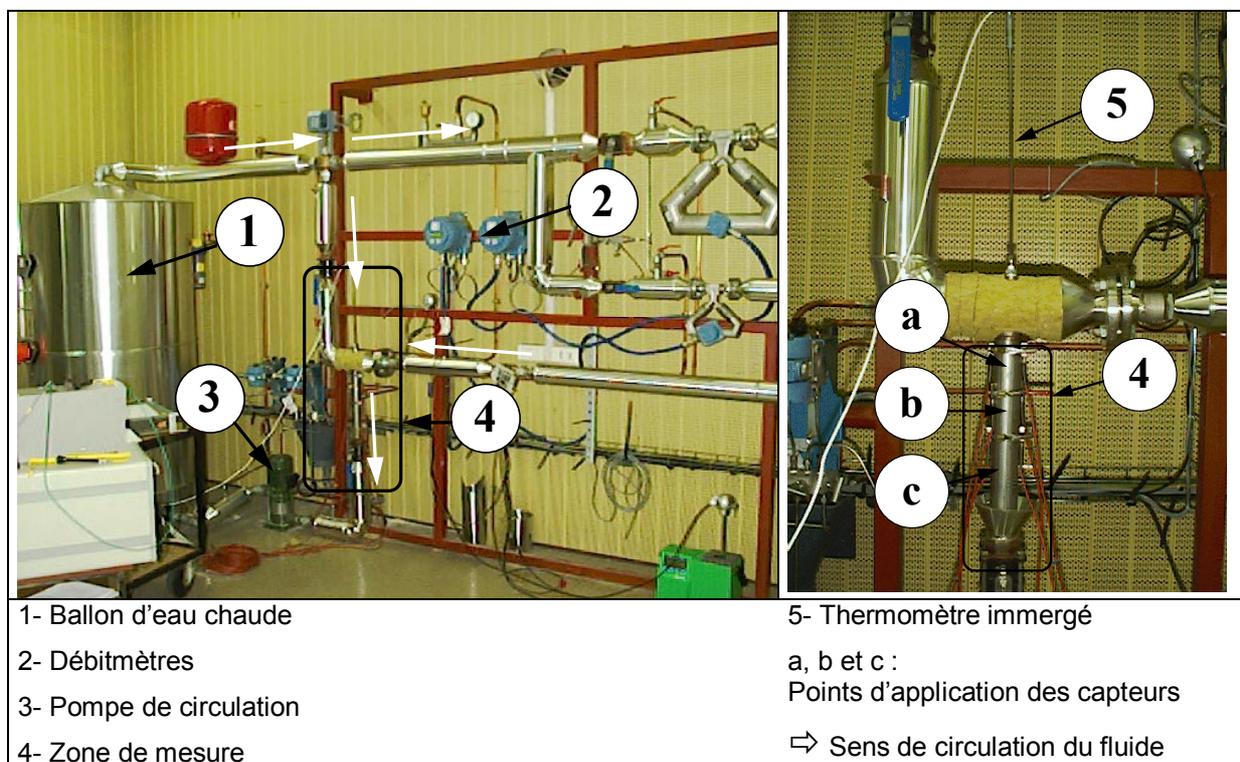


Figure 8 : Dispositif expérimental

La section d'essais (Figure 8) est constituée par une réserve d'eau chaude (Figure 8, rep. 1) accouplée à un réseau de circulation d'eau. La circulation est assurée par une pompe (Figure 8, rep. 3).

Le débit d'eau chaude thermostatée est déterminé par deux débitmètres (Figure 8, rep. 2). La température de l'eau est déterminée au niveau de la zone de mesure par un thermomètre à résistance de platine. Les capteurs de température de surface sont appliqués sur les points a, b et c de la canalisation, dans la zone de mesure (Figure 8, rep. 4).

La canalisation est de diamètre extérieur 48,6 mm (DN50), l'épaisseur des parois étant de 2 mm. La paroi est en acier inoxydable AISI 304L. Le débit d'eau de ville dans la canalisation est de 10 m³/h.

Les températures nominales de l'eau circulant dans la tuyauterie étaient les suivantes : 27 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C.

6.2.3 Analyse des conditions spécifiées de l'essai

Les capteurs n'ont pas été étalonnés au moyen d'un dispositif (générant une température de surface de référence) situé à proximité d'une source de chaleur convective ou radiative susceptible de perturber les mesures. Après identification de l'environnement de la section d'essai, aucune source de chaleur n'a été identifiée. En conséquence, aucune précaution particulière n'a été prise relativement à ces sources perturbatrices.

L'étalonnage a été réalisé à une température ambiante de laboratoire oscillant entre 19 °C et 25 °C. Lors de la campagne d'essais, la température ambiante était comprise entre 26 °C et 29 °C. L'erreur de mesure liée à la différence de température ambiante lors de la phase d'étalonnage et de la phase d'essai a été prise en compte dans le traitement des résultats d'essais [20].

Les capteurs ont été étalonnés dans un environnement de laboratoire sans courant d'air perceptible. Aucun courant d'air dans la salle d'essai, susceptible de perturber les mesures effectuées au moyen des capteurs de température de surface, n'était perceptible.

Les capteurs ont été étalonnés sur une paroi en acier inoxydable. La nature du tube de la section d'essais sur laquelle les capteurs de température de surface sont appliqués est équivalente. L'état de surface des parois d'étalonnage et du tube de la section d'essai sont comparables (pas de fortes rugosités).

6.2.4 Estimation de la chute de température à travers la paroi

La chute de température ΔT_p à travers la paroi a été ici déterminée par l'estimation des échanges thermiques convectifs et radiatifs entre la paroi de la canalisation et l'environnement. Elle correspond aux conditions d'échanges thermiques non perturbés par l'application d'un capteur de température de surface.

Ce bilan thermique nécessite notamment l'estimation des coefficients d'échange convectif h_i entre l'eau en circulation et la paroi (paroi non entartrée), ainsi que des coefficients d'échange convectif h_e entre la paroi et l'air ambiant de la salle d'essai. Ces coefficients d'échange thermique ont été calculés dans le cas présent par l'utilisation de différents modèles empiriques issus de la littérature [19] :

- $4381 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} < h_i < 7273 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} < h_e < 15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour une température d'eau de 27 °C,
- $7540 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} < h_i < 12518 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $11 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} < h_e < 27 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour une température d'eau de 80 °C.

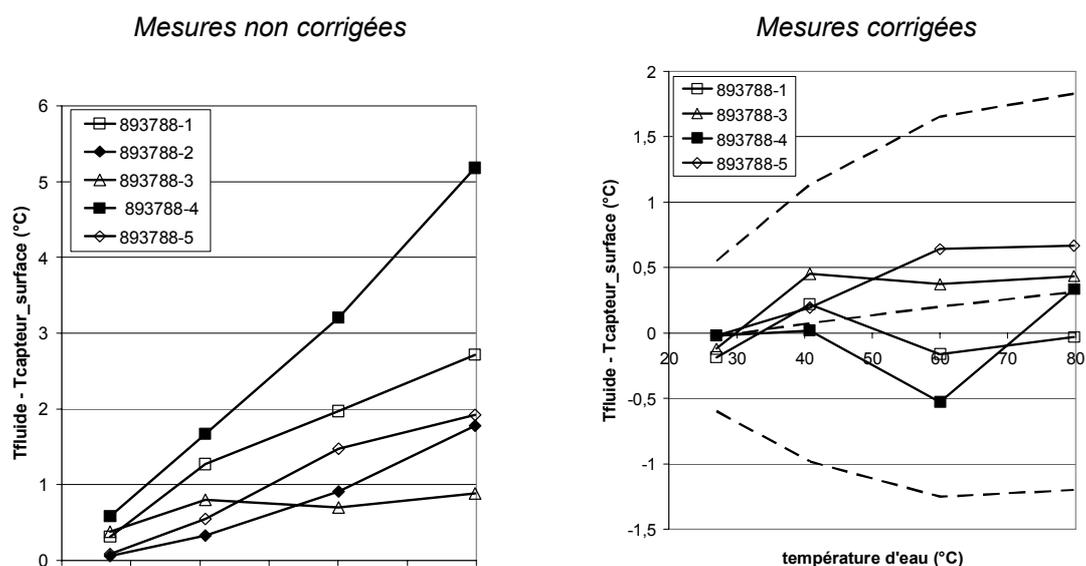
Le calcul du flux thermique à travers la paroi permet d'estimer la chute de température entre le fluide et la paroi externe de la canalisation et son incertitude associée (tableau 4).

Tableau 4 : Chute de température à travers la paroi de la canalisation

Température ambiante (°C)	Température nominale du fluide (°C)	Chute de température $\Delta T_p = (T_f - T_{pe})$ (°C)	Incertitude sur ΔT_p (k=2) (°C)
27	27	0,00	$\pm 0,02$
27	40	0,05	$\pm 0,04$
29	60	0,13	$\pm 0,09$
29	80	0,25	$\pm 0,20$

6.2.5 Résultats de la campagne de mesures

La Figure 9 présente les résultats de mesure obtenus pour les différents capteurs de température de surface mis en œuvre durant les essais. Pour une température de fluide de $80 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ °C}$ mesurée au moyen du thermomètre à résistance de platine, la température lue par les capteurs de température de surface sont inférieures de 1 °C à 5 °C . Lorsque la correction d'étalonnage est appliquée à l'ensemble des capteurs, la température externe de la surface du tube est estimée en moyenne à $79,5 \text{ °C} \pm 1,7 \text{ °C}$ (k=2). Après prise en compte de la chute de température à travers la paroi, la moyenne des températures déterminées par les capteurs de température de surface permet d'estimer une température de fluide de $79,7 \text{ °C} \pm 1,7 \text{ °C}$ (k=2).



Les pointillés représentent la moyenne des températures mesurées et l'enveloppe des incertitudes associées

Figure 9 : Différence entre la température du fluide et la lecture d'un capteur de température de surface (gauche) – Différence entre la température du fluide mesurée par une sonde immergée et la température du fluide estimée au moyen du capteur de température de surface (droite)

6.2.6 Calcul d'incertitude détaillé à la température de 80 °C

Les incertitudes prises en compte dans cet exemple correspondent aux incertitudes issues du certificat d'étalonnage des capteurs de température de surface, de la répétabilité des mesures de température de surface effectuées avec un capteur donné, aux incertitudes propres à la méthode de mesure par capteur de température de surface, et aux incertitudes issues de l'estimation de la chute de température à travers la paroi.

Le modèle mathématique associé à la détermination de la température du fluide au moyen d'un capteur de température de surface peut être défini de la manière suivante :

$$t_{f-cs} = t_{cap-surf} + C_{\acute{e}tal} + C_{resol} + C_{mat\acute{e}riau} + C_{op\acute{e}rateur} + C_{t-amb} + C_{dtp}$$

où :

t_{f-cs}	température du fluide estimée au moyen du capteur de température de surface
$t_{cap-surf}$	température lue par le capteur de température de surface
$C_{\acute{e}tal}$	correction d'étalonnage du capteur de température de surface
C_{resol}	correction liée à la résolution de l'indicateur associé au capteur de température de surface
$C_{mat\acute{e}riau}$	correction liée à la gamme de conductivité thermique correspondant à la nature du matériau mesuré
$C_{op\acute{e}rateur}$	correction liée à l'influence de l'opérateur sur les mesures
C_{t-amb}	correction liée à la différence de température ambiante entre les conditions d'étalonnage et les conditions d'utilisation du capteur de température de surface
C_{dtp}	correction liée à la chute de température à travers la paroi

Les incertitudes associées aux grandeurs $C_{\acute{e}tal}$, $C_{mat\acute{e}riau}$, $C_{op\acute{e}rateur}$, C_{t-amb} et C_{dtp} sont explicitées dans le « Guide d'étalonnage des capteurs de température de surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures (guide 1) » [20]. L'incertitude liée à $C_{\acute{e}tal}$ correspond à l'incertitude d'étalonnage ($k=1$) du capteur de température de surface reportée dans le certificat d'étalonnage. L'incertitude liée à $t_{cap-surf}$ est due à la répétabilité des mesures effectuées avec le capteur de température de surface. Le Tableau 5 présente le budget des incertitudes relatif à la détermination de la température de l'eau au moyen d'un capteur de température de surface.

Tableau 5 : Budget des incertitudes relatif à la détermination de la température de l'eau circulant dans la canalisation au moyen d'un capteur de température de surface

Grandeur X_i	Résultat de mesure x_i	Probabilité de distribution	Incertitude type $u(x_i)$	Coefficient de sensibilité C_i	Composante d'incertitude $ C_i u(x_i) $
$t_{cap-surf}$	77,07 °C	normale	0,19 °C	1,0	0,19 °C
$C_{\acute{e}tal}$	2,5 °C	normale	0,70 °C	1,0	0,70 °C
C_{resol}	0 °C	uniforme	0,03 °C	1,0	0,03 °C
$C_{mat\acute{e}riau}$		uniforme	0,34 °C	1,0	0,34 °C
$C_{op\acute{e}rateur}$		uniforme	0,09 °C	1,0	0,09 °C
C_{t-amb}		uniforme	0,08 °C	1,0	0,08 °C
C_{dtp}	0,25 °C	uniforme	0,10 °C	1,0	0,10 °C
Grandeur (Y)	Résultat (y)	/	/	/	Incertitude élargie $(U = 2 \times \sqrt{\sum [C_i u(x_i)]^2})$
t_{f-cs}	79,8 °C	/	/	/	1,7 °C

6.3 EXEMPLE 2 : MESURE PAR CAPTEUR DE TEMPERATURE DE SURFACE APPLIQUEE A LA SURVEILLANCE DE LA TEMPERATURE INTERNE D'UN FLUIDE CIRCULANT DANS UNE TUYAUTERIE EN REGIME DYNAMIQUE

6.3.1 Introduction

Les mesures de température de fluides circulant à l'intérieur de tuyauteries trouvent également une application dans l'aéronautique. Les fluides circulant dans les canalisations d'un avion peut être soumis à des variations rapides de température. En vol de qualification, les fluides font l'objet d'une surveillance continue afin de s'assurer du maintien de leur température en dehors de seuils critiques.

Les techniques de mesure conventionnelles font appel à des sondes immergées. Leur mise en place est cependant coûteuse, facteur de sur-poids, ou tout simplement techniquement parfois impossible.

Les méthodes alternatives de mesure de température de surface n'ont pas ici ces inconvénients. Pour cette raison, deux approches de mesure par capteurs de température de surface fixes ont fait l'objet d'essais de qualification en vue de leur exploitation ultérieure :

- capteurs de température de surface collés sur tuyauterie avec isolation thermique complémentaire, non étalonnés pour des essais comparatifs
- capteurs de température de surface auto-adhésif sans isolation thermique, étalonnés.

Les essais menés dans le cadre de cet exemple permettent d'évaluer leur exactitude de mesure en régime dynamique, en les comparant à des mesures de température de fluide par sonde immergées.

6.3.2 Description des essais

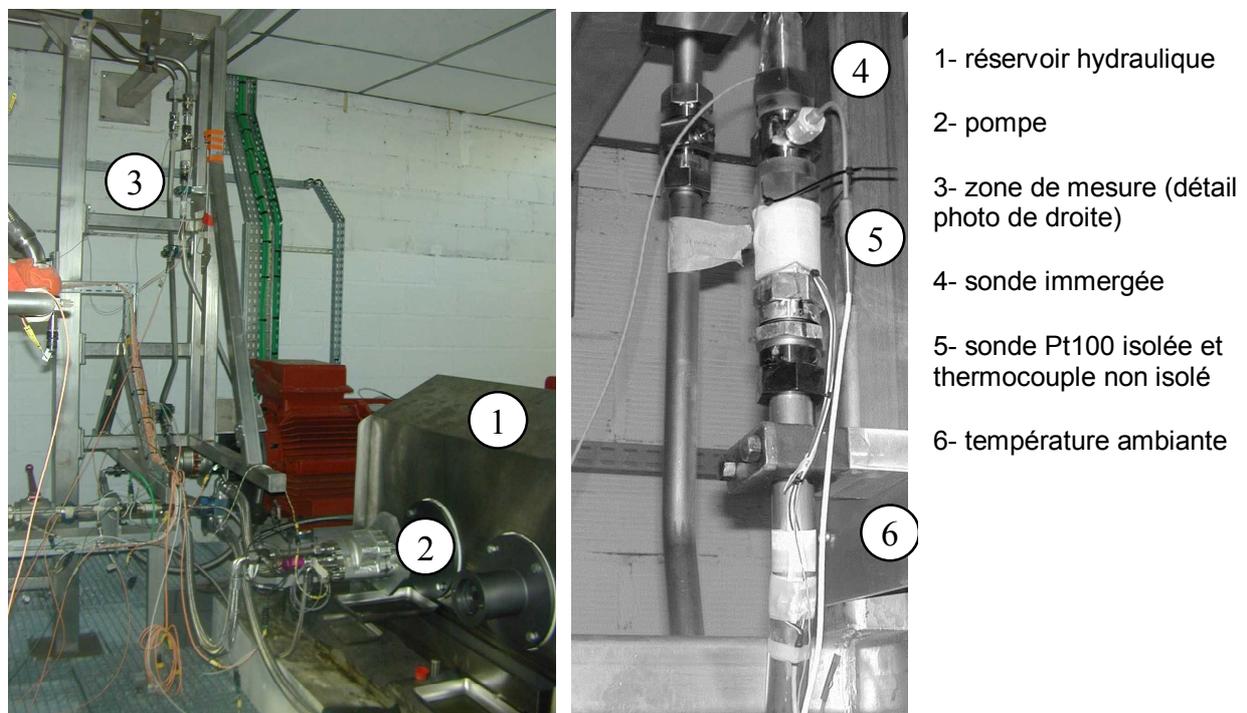


Figure 10 : dispositif expérimental

La section d'essais est présentée Figure 10. Un fluide hydraulique circule dans une tuyauterie en titane à une pression de 345 bars. Différents essais ont été menés pour des températures nominales de fluide comprises entre 25 °C et 80 °C.

La tuyauterie a été instrumentée par les capteurs suivants :

- 1 capteur de température de fluide de référence : sonde à résistance immergée de type Pt100 ;
- 1 capteur de température de surface (type Pt100) collé sur la tuyauterie et doté d'une isolation thermique ;
- 1 capteur de température de surface adhésif (thermocouple dont les thermoéléments se présentent sous la forme de rubans) appliqué sur la tuyauterie sans isolation thermique particulière.

Le dernier capteur n'est pas doté d'une isolation thermique mais a fait l'objet d'un étalonnage en température de surface afin de corriger les mesures. Le capteur de référence (immergé) a fait l'objet d'un étalonnage classique par immersion.

Pour mettre en évidence les caractéristiques des sondes, des essais en régime établi et dynamique ont été effectués.

6.3.3 Analyse des conditions spécifiées de l'essai

Les mesures sont réalisées dans un environnement sans courant d'air (convection naturelle), sans rayonnement direct sur la paroi. Les surfaces – lisses - sur lesquelles ont été installés les capteurs ont été nettoyées et dégraissées au préalable.

Les sondes plongeantes ont été installées sur des piquages réalisés spécifiquement par rapport aux zones d'implantation.

L'étalonnage a été réalisé à une température ambiante de laboratoire oscillant entre 19 °C et 25 °C. Lors de la campagne d'essais, la température ambiante était comprise entre 25 °C et 35 °C. L'erreur de mesure liée à la différence de température ambiante lors de la phase d'étalonnage et de la phase d'essai a été prise en compte dans le traitement des résultats d'essais [20].

Les valeurs données par les sondes isolées et les couples thermoélectriques de surface sont comparables en tous points car les éléments sensibles se situent sur la même section de tuyauterie (installés diamétralement opposés l'un à l'autre).

6.3.4 Résultats et interprétation

Les Figures 11 et 12 présentent les écarts entre la température de référence donnée par la sonde plongeante et les températures données par les deux capteurs de température de surface, en régime stable et en régime transitoire.

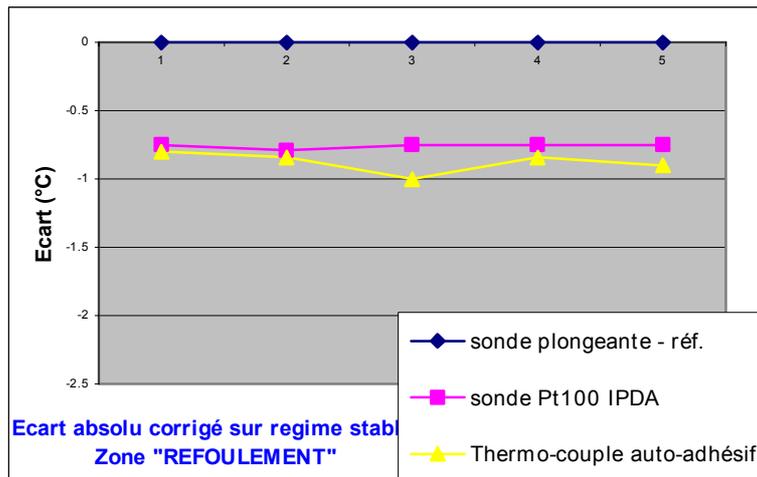


Figure 11 : évolution de l'écart de température entre la sonde de référence immergée et les capteurs de température de surface en régime thermique établi à 50 °C

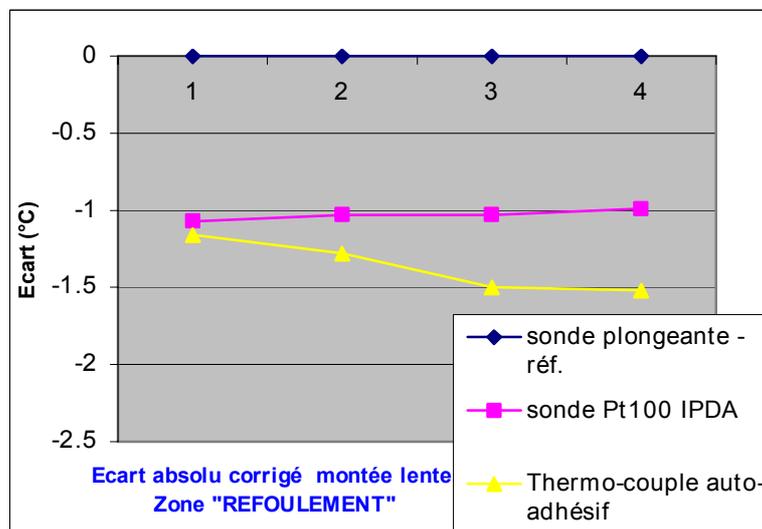


Figure 12 : évolution de l'écart de température entre la sonde de référence immergée et les capteurs de température de surface en régime thermique dynamique

En régime thermique établi, la température mesurée par le capteur de température de surface non isolé (après application de la correction d'étalonnage) est équivalente à la température mesurée par le capteur de température de surface isolé. Les incertitudes de mesure sont équivalentes à celles de l'exemple précédent ($\pm 1,7 \text{ °C} - k = 2$). L'écart résiduel entre les capteurs de température de surface et la sonde immergée est principalement lié à la chute de température à travers la paroi. Dans ces conditions, la simplicité d'implantation du capteur de température de surface non isolé représente un avantage par rapport au capteur isolé, notamment lorsque de nombreux capteurs doivent être installés sur un processus donné.

Le régime thermique dynamique de la Figure 12 correspond à une augmentation de la température du fluide. L'écart de température entre la sonde immergée et les capteurs de température de surface est sensiblement plus élevé, et a tendance à augmenter pour le capteur non isolé lorsque la température du fluide augmente. Ces évolutions traduisent un temps de réponse apparent plus élevé des capteurs de température de surface non isolés. Dans ce cas, le recours à ce capteur se traduit par une dégradation de l'exactitude de mesure.

6.4 EXEMPLE 3 : MESURE APPLIQUEE A LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UNE CANALISATION DANS LAQUELLE CIRCULE DE LA VAPEUR

6.4.1 Introduction

L'application du capteur sur la paroi mesurée ou les aménagements nécessaires à son application peuvent dans certains cas altérer fortement l'équilibre thermique du processus mesuré. C'est le cas lorsque l'énergie apportée à la paroi est insuffisante pour compenser les pertes générées par la suppression de calorifuge pour permettre l'application du capteur de température de surface.

Cet exemple en constitue un cas concret : le fluide caloporteur est ici constitué par de la vapeur d'eau (assimilable en première approche à de l'air). Selon le même principe, la température de la vapeur est recherchée à partir de la mesure de température de surface de la conduite dans laquelle elle circule. La conduite, fortement isolée par de la laine de roche, est décalorifugée sur une section afin de permettre l'application du capteur de température de surface. Contrairement à l'exemple précédent où le fluide caloporteur est de l'eau, l'énergie transportée par la vapeur et échangée avec la tuyauterie localement au niveau de la section décalorifugée n'est pas suffisante pour maintenir la paroi interne du tube à une température proche de la celle de la vapeur, surtout dans le cas de faibles débits. Les pertes thermiques générées par l'absence de calorifuge et par l'application du capteur de température de surface induit alors une chute locale importante de la température de la paroi. La température mesurée par le capteur de température de surface (corrigée des valeurs issues de son étalonnage) ne correspond plus à la température réelle de la vapeur.

Dans le cadre d'applications équivalentes, des essais préalables sont requis afin de quantifier les écarts entre la température de la vapeur mesurée par un capteur immergé et la température mesurée par le capteur de température de surface.

6.4.2 Description des essais

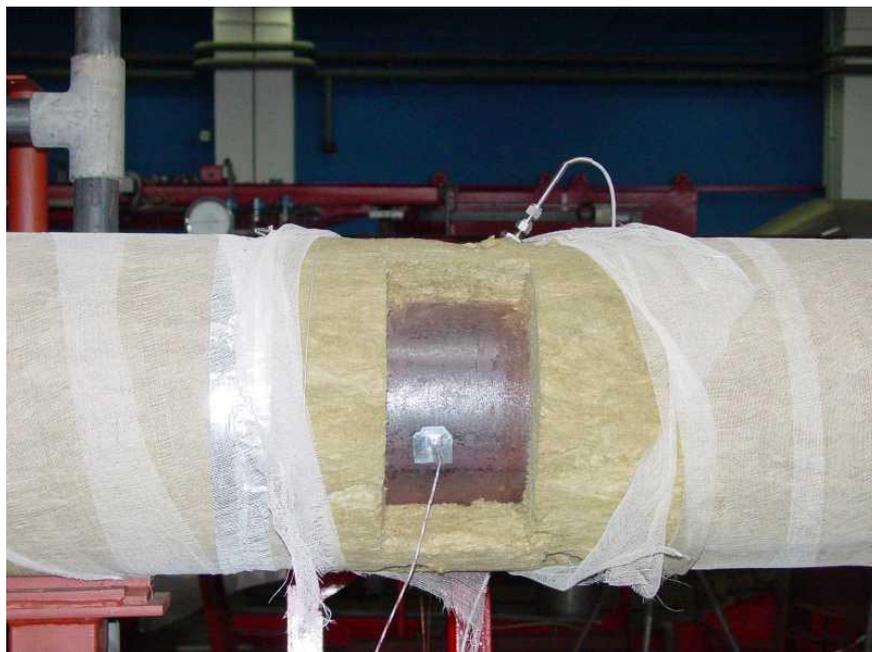


Figure 13 : conduite décalorifugée en vis à vis de la sonde de référence – circulation de vapeur d'eau

La section d'essais est présentée Figure 13. Les essais ont été réalisés sur la paroi d'une conduite décalorifugée pour l'occasion, dans laquelle circule de la vapeur. La canalisation est de diamètre extérieur 219 mm, l'épaisseur des parois étant de 6 mm. La paroi est en acier au carbone.

La température de la vapeur est déterminée au sein de la veine et au niveau de la zone de mesure par un thermomètre à résistance de platine. Les capteurs de température de surface sont appliqués sur la canalisation au centre de la zone décalorifugée (Figure 13). Outre les capteurs de température de surface amovibles, le capteur fixe 893788-2 est appliqué sur la paroi au moyen d'une pâte conductrice et d'un scotch aluminium. Ce dernier a fait l'objet d'un étalonnage préalable par immersion.

Quatre séries de mesures ont été réalisées dans les conditions d'essais suivantes :

- Série 1 : température de vapeur de 160 °C, débit de vapeur de 0,78 kg/s avec conduite décalorifugée
- Série 2 : température de vapeur de 160 °C, débit de vapeur de 1,5 kg/s avec conduite décalorifugée
- Série 3 : température de vapeur de 160 °C, débit de vapeur de 1,5 kg/s avec calorifuge doté d'un trou (diamètre 30 mm env.) pour l'application du capteur sur la paroi
- Série 4 : température de vapeur de 200 °C, débit de vapeur de 2,64 kg/s avec conduite décalorifugée

6.4.3 Analyse des conditions spécifiées de l'essai

Les capteurs n'ont pas été étalonnés au moyen d'un dispositif (générant une température de surface de référence) situé à proximité d'une source de chaleur convective ou radiative susceptible de perturber les mesures. Après identification de l'environnement, la section d'essai était exposée au rayonnement solaire. Un écran a été interposé afin de protéger la zone d'essai et éviter un apport de chaleur externe perturbateur.

L'étalonnage a été réalisé à une température ambiante de laboratoire oscillant entre 19 °C et 25 °C. Lors de la campagne d'essais, la température ambiante était comprise entre 26 °C et 29 °C. L'erreur de mesure liée à la différence de température ambiante lors de la phase d'étalonnage et de la phase d'essai a été prise en compte dans le traitement des résultats d'essais [20].

Les capteurs ont été utilisés dans un environnement d'essai sans courant d'air perceptible, conditions analogues aux conditions d'étalonnage des capteurs de température de surface.

Les capteurs ont été étalonnés sur une paroi en acier inoxydable. La nature du tube de la section d'essais sur laquelle les capteurs de température de surface sont appliqués était équivalente. L'état de surface de la paroi d'étalonnage ne comportait pas de fortes rugosités. L'état de surface du tube de la section d'essai étant toutefois relativement rugueux, la surface du tube a été poncée à l'endroit d'application du capteur afin d'assurer un contact équivalent.

6.4.4 Résultats de la campagne de mesures

Les différents essais réalisés à 160 °C illustrent les erreurs de mesure induites par l'apport insuffisant d'énergie par la vapeur pour compenser les pertes thermiques liées à la suppression du calorifuge. L'augmentation du débit de vapeur ou l'ajout de calorifuge réduit la différence de température entre la température de référence et les températures fournies par les capteurs de température de surface (Figure 14). L'application des capteurs de

température de surface en différents points de la surface décalorifugée révèle un manque d'homogénéité thermique de la paroi.

Il est à noter que le capteur 893788-4 n'est pas considéré comme instrument de mesure (cf chapitre 5, critères d'acceptabilité d'étalonnage). Aussi, les valeurs relevées au moyen de ce capteur sont purement indicatives.

Lors de la série N°3, les mesures effectuées au moyen du capteur fixe 893788-2 plaqué sur la paroi et inséré sous le calorifuge sont proches d'une mesure par immersion. Par ailleurs, la chute de température entre la paroi externe du tube et la position du capteur de référence peut être estimée de 1 °C à 3 °C pour une température de vapeur de 150 °C à 200 °C. Les mesures issues du capteur 893788-2 et du capteur de référence sont par conséquent cohérentes.

Le débit de vapeur suffisant dans la conduite pour une vapeur à 200 °C permet d'estimer correctement la température de surface par contact lors de la série de mesure N°4.

Les incertitudes associées aux mesures par capteurs de température de surface sont de l'ordre de $\pm 2,5$ °C ($k=2$), et de $\pm 0,2$ °C ($k=2$) pour la sonde immergée.

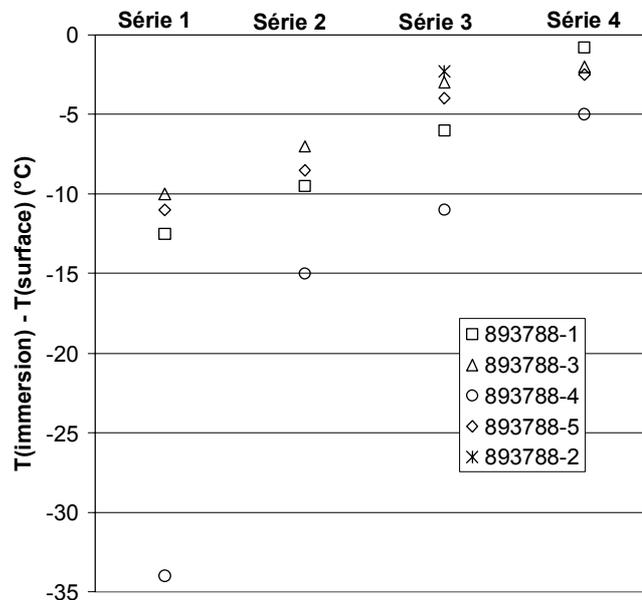


Figure 14 : différence entre la température mesurée par la sonde immergée et la température de surface mesurée par différents capteurs (après application des corrections d'étalonnage).

6.5 EXEMPLE 4 : MESURE APPLIQUEE A LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UNE BARRE EN CUIVRE CHAUFFEE PAR EFFET JOULE

6.5.1 Introduction

Les exigences relatives au contrôle des armoires sous tension incluent l'identification de points chauds internes et l'estimation de leur température de surface. Ces contrôles peuvent être effectués au moyen de caméras infrarouges. Les mesures de l'autoéchauffement des câbles nus étant difficiles à réaliser par voie optique, les capteurs de température de surface peuvent constituer une voie complémentaire de mesure dans le cadre de ces activités, tel qu'illustré dans cet exemple où les câbles électriques sont simulés par une barre en cuivre.

6.5.2 Descriptifs des essais

Un dispositif présenté en Figure 15, constitué d'un câble d'alimentation électrique (diamètre extérieur du câble 15,3 mm, diamètre de l'âme du câble 8 mm) est raccordé à une barre de cuivre (longueur 850 mm, hauteur 20 mm, épaisseur 5 mm) et alimenté par un générateur de courant (0 A à 1500 A sous 5 V). Lors des essais, la barre et le câble sont mis en température par le passage d'un courant de 300 A.



Figure 15 : mesure de la température d'une barre en cuivre par capteur de température de surface

La barre en cuivre est instrumentée de couples thermoélectriques uniformément répartis insérés dans la tranche. Les couples thermoélectriques associés à leur indicateur ont fait l'objet d'un étalonnage préalable.

Après stabilisation de la température du dispositif :

- les températures relevées par les couples thermoélectriques sont relevés avant application des capteurs de température de surface sur la paroi,
- la température de surface est relevée dans un second temps par application des capteurs de température de surface sur la barre en cuivre.

La température de la barre dans ces conditions est de 70 °C environ.

6.5.3 Analyse des conditions spécifiées de l'essai

Les capteurs n'ont pas été étalonnés au moyen d'un dispositif (générant une température de surface de référence) situé à proximité d'une source de chaleur convective ou radiative susceptible de perturber les mesures. Après identification de l'environnement de la section d'essai, aucune source de chaleur externe n'a été identifiée. En conséquence, aucune précaution particulière n'a été prise relativement à ces sources perturbatrices.

L'étalonnage a été réalisé à une température ambiante de laboratoire oscillant entre 19 °C et 25 °C. Lors de la campagne d'essais, la température ambiante était comprise entre 26 °C et 28 °C. L'erreur de mesure liée à la différence de température ambiante lors de la phase d'étalonnage et de la phase d'essai a été prise en compte dans le traitement des résultats d'essais [20].

Les capteurs ont été étalonnés dans un environnement de laboratoire sans courant d'air perceptible. Aucun courant d'air dans la salle d'essai, susceptible de perturber les mesures effectuées au moyen des capteurs de température de surface, n'était perceptible.

Les capteurs ont été étalonnés sur une paroi en aluminium. La barre d'essais sur laquelle les capteurs de température de surface sont appliqués est en cuivre. Ces deux matériaux étant très bons conducteurs thermiques, les résultats d'étalonnage sont applicables à cet essai [13][18]. L'état de surface des parois d'étalonnage et de la barre d'essai sont équivalentes (pas de fortes rugosités).

6.5.4 Résultats

La Figure 16 présente la différence entre :

- la température de la barre mesurée au moyen des couples thermoélectriques
- la température de surface de la barre mesurée au moyen des capteurs de température de surface décrits précédemment.

Les résultats montrent que les capteurs de température de surface apportent une information correcte de la température locale de la barre du fait de sa bonne homogénéité thermique liée à la conductivité thermique élevée du cuivre. L'incertitude sur la différence de température inclue les incertitudes issues des certificats d'étalonnage des couples thermoélectriques et des capteurs de température de surface, la répétabilité des mesures, la résolution des indicateurs associés aux différents capteurs, et les incertitudes propres aux mesures par capteurs de température de surface (nature du matériau, effet opérateur, effet de la température ambiante).

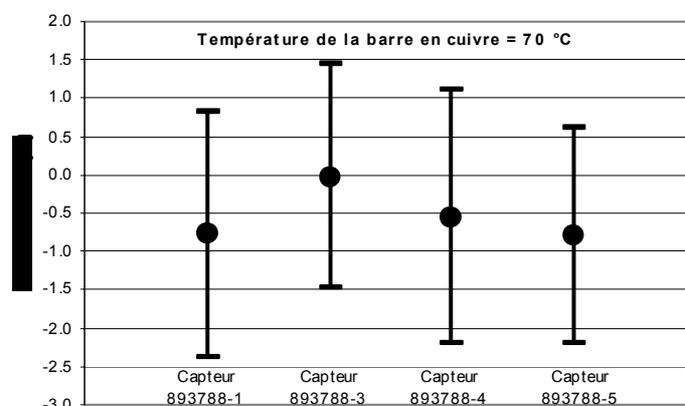


Figure 16 : différence entre la température de la barre mesurée au moyen de couples thermomélectriques insérés dans la barre et la température de surface de la barre mesurée au moyen de capteurs de température de surface.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF X 07-001 – Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de Métrologie
- [2] NF ENV 13005 – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
- [3] NF EN ISO 10012 – Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure
- [4] FD X 07-012 – Métrologie – Certificat d'étalonnage des moyens de mesure
- [5] NF EN 60751 – Capteurs industriels à résistance thermométrique de platine
- [6] NF EN 60584-1 – Couples thermoélectriques – Partie 1 : Tables de référence
- [7] FD X 07-029 – Métrologie – Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres - Partie 2 : procédure d'étalonnage et de vérification des couples thermoélectriques seuls et des thermomètres à couple thermoélectrique
- [8] NF EN ISO 7730 – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique
- [9] NF EN 13202 - Ergonomie des environnements thermiques - Températures des surfaces tangibles chaudes - Lignes directrices pour la fixation de valeurs limites de température de surface dans les normes de produit à l'aide de l'EN 563
- [10] NF EN 563 - Sécurité des machines - Températures des surfaces tangibles - Données ergonomiques pour la fixation de températures limites des surfaces chaudes
- [11] Document COFRAC 2266 : Guide technique pour un dossier d'accréditation température
- [12] Document COFRAC 2066 : Exigences spécifiques de la CPA Température
- [13] Comparison of the reference surface apparatus at NMIs by comparison of transfer surface temperature standards, Rapport final de la comparaison du projet Euromet 635, nov. 2003
- [14] Document R2730 (Techniques de l'Ingénieur) : Température de surface – Mesure par contact, 09-1998
- [15] R. Morice, E. Devin, La mesure par contact des températures de surface : étalonnage des capteurs de surface et traçabilité des mesures, Actes du congrès Français de Thermique SFT2000, Lyon, mai 2000
- [16] R. Morice, E. Andras, E. Devin, T. Kovacs, Contribution to the calibration and use of surface temperature sensors, Actes du congrès Tempmeko'01, Berlin, janvier 2001
- [17] Cooperation report : uncertainty in calibration of surface contact sensors, Rapport BNM, août 2001.
- [18] E. Andras, R. Morice & al, Interlaboratory comparison of reference surface temperature apparatus at NMIs, Proceedings of Tempmeko 2004, publication en cours.
- [19] Transferts Thermiques, Mécanique des Fluides Anisothermes, Taine J., Petit J.P., Dunod, 2^{ème} Ed., Paris 1995.
- [20] Guide d'étalonnage des capteurs de température de surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures, guide 1, nov 2004.