

# Caractérisation de la mesure de température dynamique par microthermocouple refroidi par effet Peltier.

Sofiane AMRANE, Éric GAVIGNET, Philippe BAUCOUR, François LANZETTA\*

Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 7174  
 Université de Franche-Comté/CNRS/ENSMM/UTBM  
 Département ENERGIE  
 Parc technologique – 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort  
 \*(auteur correspondant : [francois.lanzetta@univ-fcomte.fr](mailto:francois.lanzetta@univ-fcomte.fr))

**Résumé** - Cet article présente les premiers résultats expérimentaux de travaux portant sur le développement d'une méthode de mesure originale permettant de remonter simultanément à la température et à l'hygrométrie d'un gaz humide. Le psychromètre réalisé à cet effet est constitué de deux microthermocouples collés et isolés électriquement. Le premier est un microthermocouple de type E et de diamètre 127  $\mu\text{m}$ , que l'on refroidit par effet Peltier. Le second microthermocouple, de type K et de diamètre 25.4  $\mu\text{m}$  est utilisé comme référence. Deux types d'essais ont été réalisés: des essais en régime statique sans injection de courant et des essais en régime dynamique avec injection de courant (de 5 à 80 mA) dans le thermocouple E, faisant ainsi varier sa température. Les résultats sont comparés à ceux obtenus à l'aide d'une caméra thermique.

## Nomenclature

$I$	courant, mA	<i>Symboles grecs</i>	
$T_c$	température au centre de la jonction, °C	$\Delta$	différence
$T_d$	température au début de la jonction, °C	$\epsilon$	émissivité
$T_h$	température du thermocouple, °C	<i>Indices et exposants</i>	
$T_m$	température moyenne de la jonction, °C	<i>max</i>	valeur maximale
		<i>réf</i>	référence

## 1. Introduction

De façon générale, deux techniques de mesures peuvent être utilisées afin de déterminer une température : les techniques dites intrusives et les méthodes non intrusives. La première catégorie repose sur l'utilisation de sondes telles que les sondes platine, les thermomètres ou encore les sondes à thermocouples qui restent les plus utilisées dans l'industrie ou les laboratoires de recherches [1]. Les méthodes non intrusives reposent quant à elles essentiellement sur l'utilisation de systèmes tels que les pyromètres ou les caméras infrarouges largement utilisées à l'heure actuelle [2]. Le travail expérimental présenté utilise ces deux approches dans le but de caractériser de deux façons distinctes un psychromètre dont l'élément sensible est un microthermocouple. Un second microthermocouple, collé sur cet élément sensible, permettra d'obtenir directement les variations de températures créées par le passage d'un courant électrique tandis qu'une caméra Infrarouge donnera de façon non intrusive une cartographie thermique de la surface de la sonde. Ces deux techniques seront ensuite comparées et exploitées afin d'évaluer l'influence de la conduction causée par l'effet Joule et l'effet Peltier dans les fils ainsi que de la convection sur la mesure de température [3, 4].

## 2. Principe du psychromètre

La réalisation du psychromètre repose sur l'utilisation de deux microthermocouples collés entre eux et isolés électriquement (Figure 1). Le premier thermocouple constitue l'élément sensible de la sonde et est réalisé par soudage au micro chalumeau. Il est traversé par un courant d'intensité variable  $I$  permettant de le refroidir par effet Peltier. D'autres phénomènes responsables de la variation de température sont également à prendre en compte comme l'effet Joule et l'effet Seebeck [5]. Le second thermocouple est un thermocouple de type K, étalonné au préalable par rapport à une sonde de platine de type PT100, et dont la jonction chaude a été réalisée par soudage à l'arc. Il est utilisé comme référence et a pour but de mesurer la différence de température obtenue lors du passage du courant dans l'élément sensible. Plusieurs types de sondes ont été testés mettant en jeu différents paramètres de l'élément sensible tels que la nature des couples thermoélectriques, les diamètres des fils ou encore l'intensité du courant à injecter afin de déterminer la configuration optimale donnant la variation de température la plus importante.

Trois types de couples thermoélectriques ont ainsi été réalisés et caractérisés : Type E (Chromel - Constantan), Type J (Fer - Constantan), Type K (Chromel - Alumel) pour trois diamètres différents de fils : 80  $\mu\text{m}$ , 127  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$ . De la même façon, plusieurs intensités de courant sont imposées avec des valeurs variant de 1 à 100 mA.

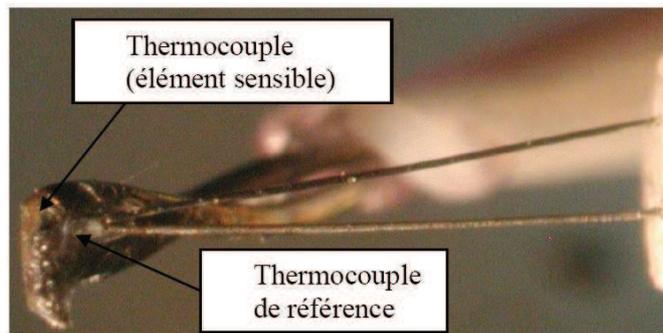


Figure 1 : *Vue du psychromètre.*

Le banc de test mis au point afin de caractériser le psychromètre est représenté Figure 2. Il est constitué d'un châssis de type « Compaq DAQ » (National Instrument) piloté à l'aide du logiciel LabVIEW et équipé d'un module de mesure de température et d'un module de sortie tension. La valeur du courant disponible en sortie de ce châssis restant faible, un montage suiveur réalisé autour d'un amplificateur de courant (OPA 548) est inséré entre le module de tension et le thermocouple à refroidir afin de fournir un courant suffisant. Lorsque l'on applique une tension par l'intermédiaire du châssis aux bornes de l'amplificateur de puissance, on impose un courant dans la jonction du premier microthermocouple ce qui a pour effet de le refroidir. Les variations de températures obtenues sont alors mesurées par le second microthermocouple et enregistrées à l'aide du module d'acquisition de données. En mode dynamique, la caractérisation consiste à envoyer des signaux en forme de créneaux (de durée et d'amplitude variables) et correspondant à des phases successives de refroidissement et de relaxation.

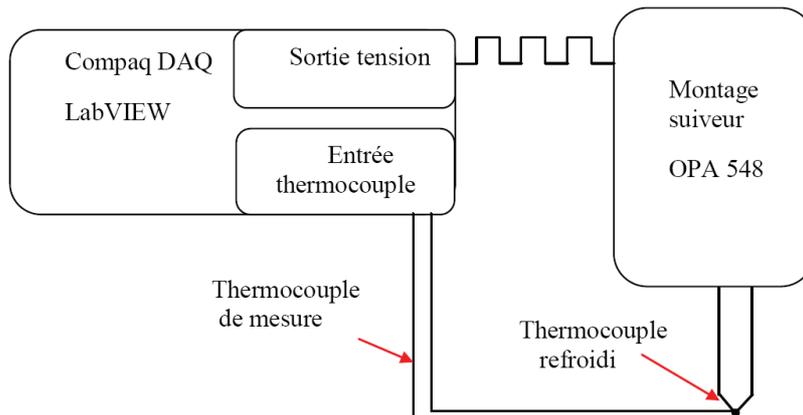


Figure 2 : Principe du banc de test.

Un exemple de résultats est représenté figure 3. Il correspond aux variations de température obtenues aux bornes du microthermocouple de référence collé sur un microthermocouple de type E de diamètre 127  $\mu\text{m}$ . L'ensemble de la sonde est plongé dans un enceinte en verre fermé hermétiquement et placé dans un bain thermostaté à 20°C. Un troisième thermocouple (Type K, 25  $\mu\text{m}$ ) fournit la température moyenne de l'enceinte ( $TC_{Ref}$ ). Cette figure représente la réponse du capteur à un signal carré de fréquence 0,025 Hz et d'intensité 35 mA. La phase de refroidissement par effet Peltier correspond à un état haut du signal de commande ce qui engendre le passage du courant à travers la jonction. Lors de la commutation de ce signal, le courant s'annule entraînant ainsi une remontée de la température à la valeur ambiante.

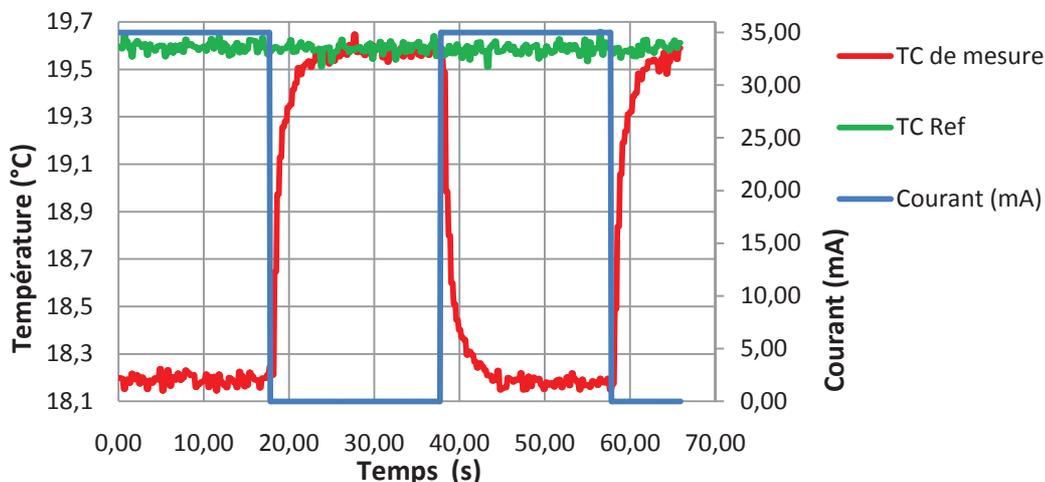


Figure 3 : Variations de température mesurées aux bornes du microthermocouple de référence.

La caractérisation du psychromètre consiste à trouver les paramètres thermoélectriques (propriétés thermophysiques, coefficient de Seebeck), dimensionnels (diamètre des fils) et électriques (intensité du courant, fréquence d'excitation) donnant la variation de température la plus élevée entre les deux phases du signal de commande. De nombreux essais ont permis de mettre en évidence qu'une valeur d'intensité de 35 mA pour une fréquence de 0,025 Hz génère la variation de température la plus élevée et ce, quelle que soit la configuration du thermocouple. L'influence de l'intensité du courant traversant la jonction est illustrée figure 4 sur laquelle sont représentées les variations de température en fonction de ce paramètre pour trois thermocouples de types différents (E, J et K) mais de diamètre identique (127  $\mu\text{m}$ ) et dans les mêmes conditions que précédemment. Les courbes obtenues mettent clairement en évidence une meilleure sensibilité du thermocouple de type E, par rapport aux autres couples, avec une variation de température de -1,5°C pour un courant de 35 mA.

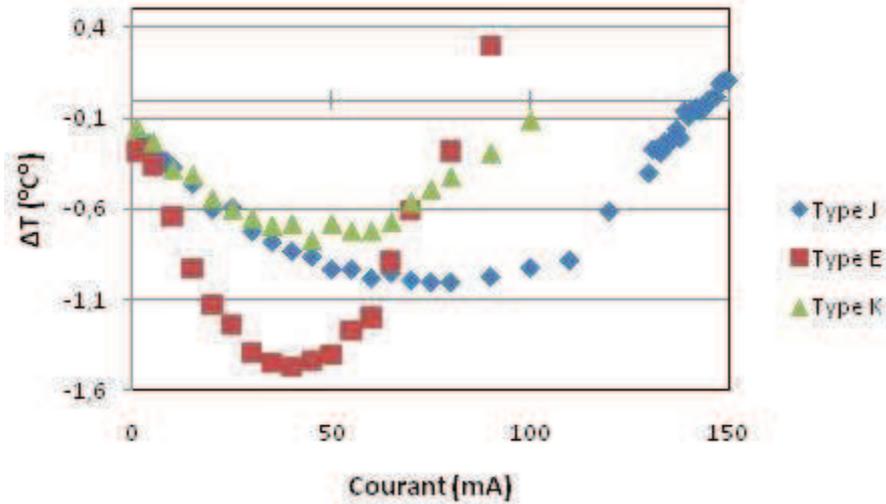


Figure 4 : Comparaison des réponses des thermocouples en fonction du courant.

## 4. Essais avec la caméra thermique

### 4.1. Banc d'essais

Le banc d'essais est constitué de la caméra infrarouge associée au système de mesure par microthermocouples (Fig. 5). L'emploi d'une caméra thermique permet de mesurer de façon non intrusive, les variations des températures de surface des microthermocouples [6]. Nous avons utilisé une caméra matricielle CEDIP Titanium FLIR Série SC7000 (figure 5), avec un détecteur photovoltaïque InSb, de résolution 640x512 pixels et une bande spectrale de 1.5 μm - 5 μm (IR moyen) pour un pas de 15μm. Le détecteur assure la transformation du flux incident en tension, avec un temps d'intégration variable puis les valeurs de tension sont ensuite transformées en température grâce à des courbes d'étalonnages [7]. Le logiciel ALTAIR pilote cette caméra et permet d'enregistrer et de traiter les images mais également de modifier certains réglages comme la taille des pixels, la focale, l'émissivité ou encore la valeur de la température ambiante [8, 9].

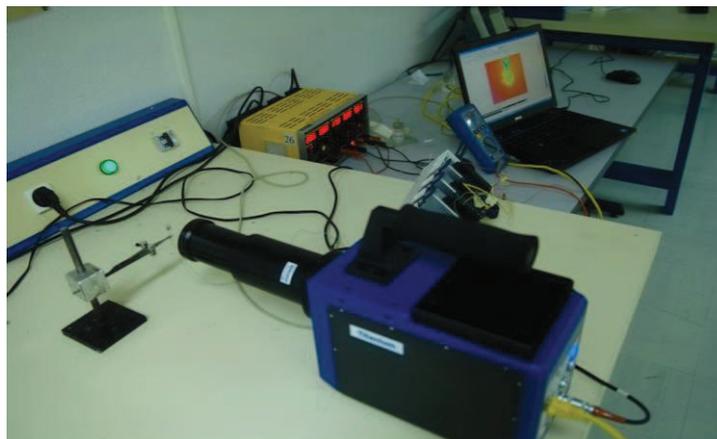


Figure 5: Dispositif expérimental (l'enceinte de protection des microthermocouples a été enlevée)

### 4.2. Essais en régime statique

Les premiers essais sont effectués en régime statique, sans injection de courant. Le but est de mesurer les différences de température entre le thermocouple et la caméra thermique.

Plusieurs essais ont été réalisés en faisant varier les paramètres de la caméra (émissivité et focale), afin de trouver le bon réglage. Les thermocouples sont placés dans une enceinte afin de minimiser les effets de la convection (Fig. 5).

La figure 6 représente un thermogramme des variations de température surfaciques le long des deux microthermocouples dans des conditions géométriques correspondantes à celles de la figure 1. Les évolutions des températures sont données à partir du logiciel Altair, les mesures étant prises sur une période de 30 s. Sur chaque fil on mesure ainsi la température à différentes abscisses, le long d'une ligne, désignées par FIL11, FIL12 et FIL13 pour le fil 1 et par FIL21, FIL22 et FIL23 pour le fil 2 (moyenne de la température au niveau de chaque chaque pixel le long de la ligne droite). On calcule la température moyenne en début de jonction ( $T_d$  centre de la zone cerclée « Début de jonction », moyenne de température de chaque pixel dans le cercle), et la température au centre de la jonction ( $T_C$ , centre de la zone cerclée « Centre de jonction », température du pixel au centre du cercle). Toutes ces températures sont ensuite comparées à celles ( $Th$ ) fournies par le microthermocouple (Figs. 7 à 9).

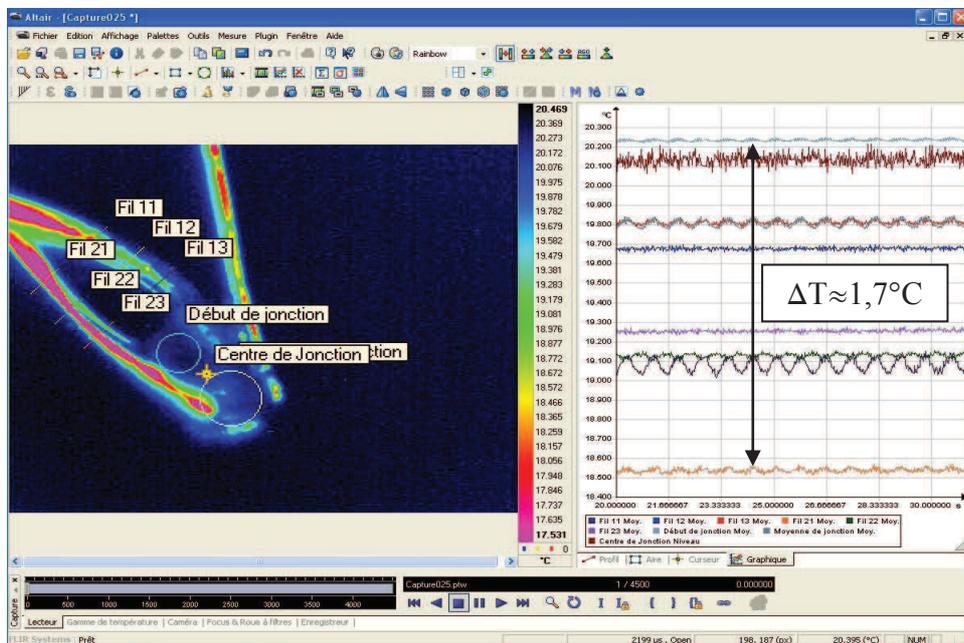


Figure 6 : Thermogrammes du dispositif

D'après ce thermogramme (Fig. 6) on remarque une différence de température entre les fils et la jonction d'environ 1,7°C. Les données fournies par la caméra infrarouge sont le résultat d'une chaîne de phénomènes physiques et électroniques. A chaque instant, chaque pixel de la matrice du détecteur délivre un signal électrique qui est une fonction linéaire du flux photonique reçu pendant le temps d'intégration (une fraction de la période d'acquisition des images).

Les figures 7 à 9 présentent des thermogrammes pour lesquels l'émissivité de la jonction varie, pour les mêmes conditions expérimentales. Ainsi, l'écart maximal de température  $\Delta T_{max}$  des points de mesure varie de 0.2°C à 0.6°C; quand on baisse l'émissivité, la température donnée par la caméra thermique augmente. Le microthermocouple ayant été étalonné en statique, si l'on considère sa température ( $Th$ ) comme « référence », la caméra thermique fournit des températures proches de celles de  $Th$  lorsque l'émissivité de la jonction est fixée à  $\epsilon = 0.9$  (Fig. 8) et, dans ces conditions, l'écart de température ( $\Delta T = Th - T_C$ ) est minimal et sa valeur est  $\Delta T \approx 0.2$  °C. On a aussi remarqué que la température au niveau de la jonction n'est pas parfaitement homogène, si l'emplacement du point au centre de la jonction change ne serait-ce que d'un pixel, la température enregistrée change de  $\pm 0,3$ °C. D'autre part, la

jonction n'est pas une sphère ou un cylindre parfait et cette zone présente des propriétés thermophysiques non homogènes dues entre autre à la fusion des deux matériaux constituant le thermocouple (Chromel - Constantan).

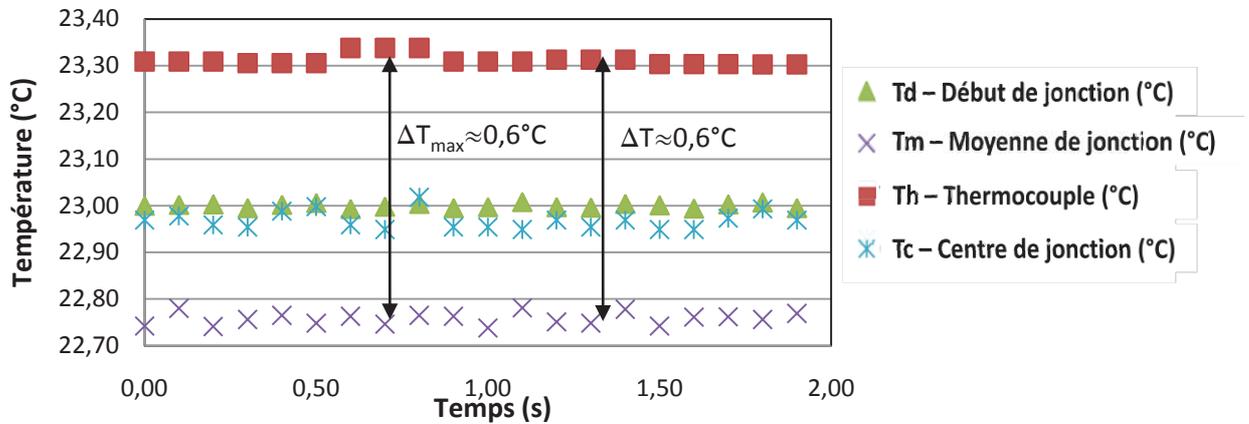


Figure 7 : Essais statiques, émissivité  $\epsilon = 1$ .

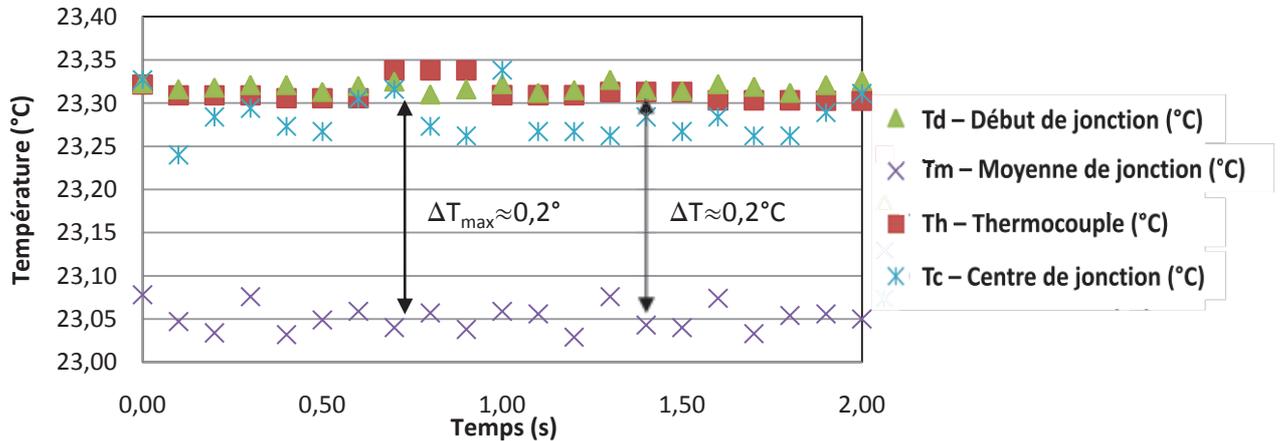


Figure 8 : Essais statiques, émissivité  $\epsilon = 0,9$ .

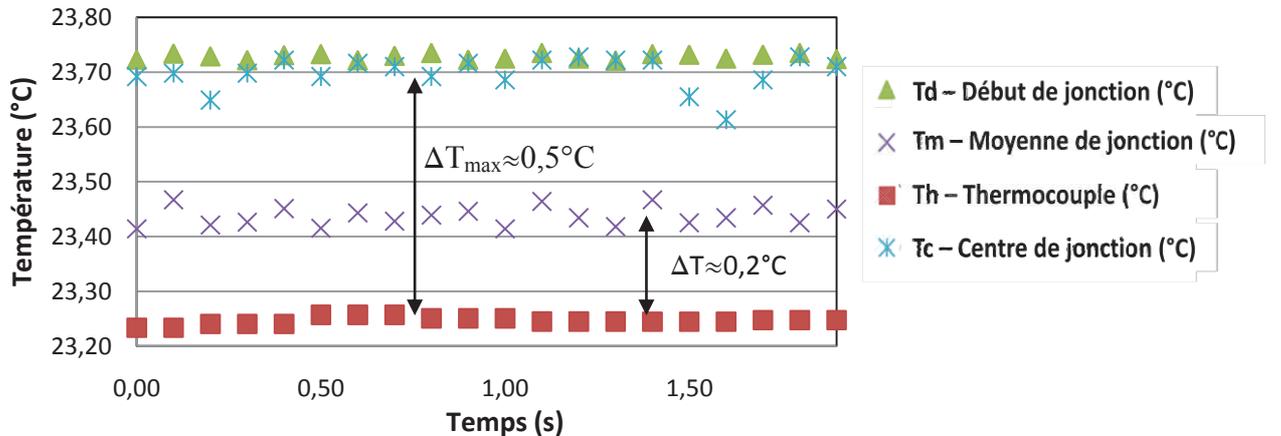


Figure 9 : Essais statiques, émissivité  $\epsilon = 0,8$ .

### 4.3. Essais en régime dynamique

La caractérisation dynamique du capteur consiste à exciter l'élément sensible (thermocouple de type E) à l'aide d'un signal périodique d'amplitude variable dans les mêmes

conditions expérimentales que précédemment. Différentes valeurs d'intensité de courants (de 5 à 80 mA) peuvent ainsi être choisies afin de refroidir la jonction par effet Peltier. La figure 10 donne un exemple de réponse du capteur à un signal d'excitation de fréquence 0,02 Hz et d'intensité 30 mA. Les mesures issues du thermocouple sont comparées à celles obtenues par la caméra pour différents points de la jonction définis au préalable et pour une émissivité fixée à 0,9.

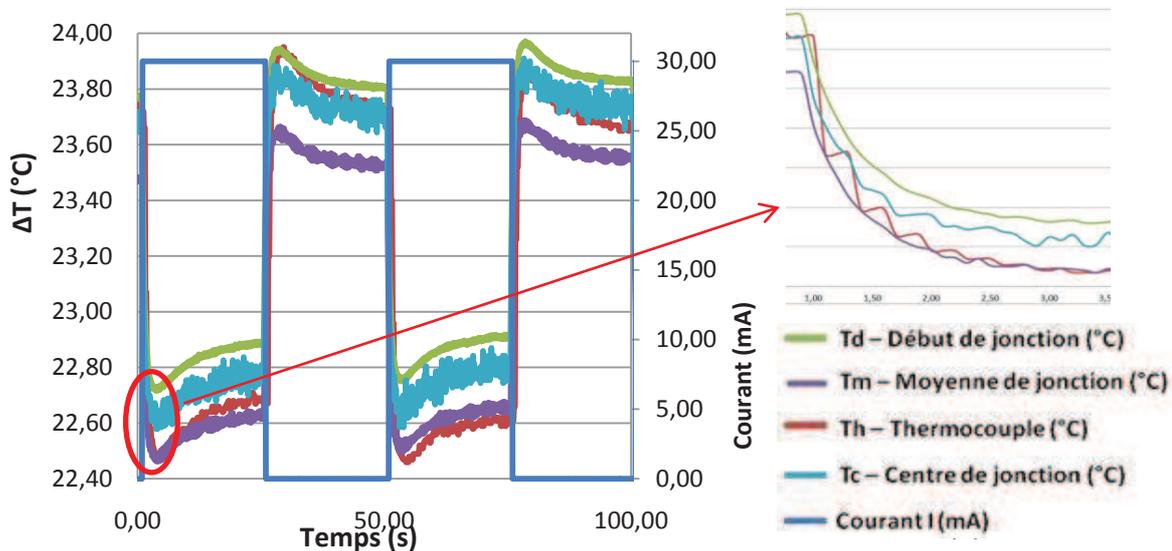


Figure 10 : Essais en régime dynamique pour un courant de 30 mA

Malgré des allures et des dynamiques identiques, on peut noter une différence d'amplitude de 0,2°C en moyenne entre les mesures issues du microthermocouple ( $T_h$ ) et celles provenant de la caméra notamment au niveau du point correspondant à la moyenne de jonction ( $T_c$ ). Les résultats restent toutefois comparables entre les deux méthodes sachant que l'influence de la couche de colle entre les deux microthermocouples reste indéterminée.

Des pics de températures, dus à l'inertie thermique causée par effet Joule, sont également observables en début de phase de refroidissement et de phase de repos. Le thermogramme représenté figure 11 permet de caractériser la dissipation de chaleur apportée par effet Joule depuis les fils jusqu'à la jonction ainsi que la convection s'établissant autour. Ce thermogramme est réalisé pour une ligne de mesure moyennée placée sur chaque fil, la distance entre la jonction et les points de mesures étant d'environ 400  $\mu\text{m}$  et pour un cercle placé au centre de la jonction avec une mesure moyennée de sa surface. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence des variations identiques mais avec des amplitudes différentes.

## 5. Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés dans ce travail concernent la mesure de température sur un microthermocouple refroidi par effet Peltier. Deux techniques de mesures, l'une par l'intermédiaire d'une caméra thermique et l'autre à l'aide d'un second microthermocouple fixé sur le premier thermocouple d'étude, ont été mises en place et ont abouti à des résultats cohérents. Ces mesures ont notamment permis d'établir une configuration optimale donnant la plus grande variation de température pour une valeur de courant fixée et ainsi trouver un compromis entre les différents paramètres du thermocouple (diamètre des fils, type, intensité du courant).

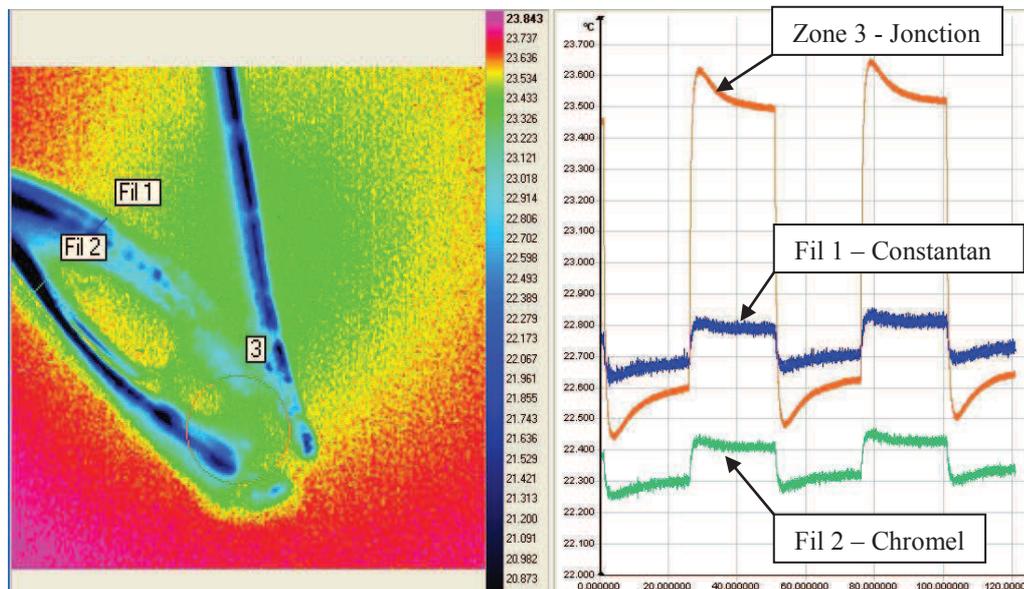


Figure 11 : Thermogramme en essais dynamiques pour un courant d'intensité  $I = 30 \text{ mA}$  à différentes abscisses le long des fils 1 (Chromel) et 2 (Constantan) et au centre de la jonction. On met en évidence les pertes par conduction le long des fils par une baisse de la température entre le centre de la jonction et les abscisses.

L'utilisation de la caméra thermique a également donné la possibilité de quantifier l'influence des effets de la conduction dans les fils (effet Joule) et la convection autour de la jonction, la difficulté principale étant d'estimer l'émissivité de la jonction. Ces travaux de caractérisation sont une première étape vers la conception d'une sonde psychrométrique afin de remonter simultanément à la température et à l'hygrométrie d'un gaz humide à partir d'un seul et unique thermocouple.

## Références

- [1] J.G. Webster, Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRCnetBase, 1999.
- [2] C. Le Niliot, P.Gallet, Infrared thermography applied to the resolution of inverse heat conduction problems: recovery of heat line sources and boundary conditions, *Revue Générale de Thermique*, 37(8), September (1998), 629–643.
- [3] W. Skierucha, Design and performance of psychrometrics soil water potential meter, *Sensors and Actuators*, 118, (2005), 86-91.
- [4] S. Amrane, E. Gavignet, P. Baucour, F. Lanzetta, Microthermocouple psychrometer design and characterization, 15 International congress of metrology, Paris, 3-6 Octobre 2011.
- [5] D.H. Jung, I.K. Moon, Y.J. Yun, C.D. Park, S.M. Chung, Y.H. Jeong, Measuring thermophysical properties of gases with a single thermocouple: Peltier vacuum gauge, *Thermochimica Acta*, 455, (2007), 40–45.
- [6] F. H.Sepúlveda Palma, Déformation de champs thermiques et traitement d'images infrarouges. Application, à la caractérisation de systèmes dynamiques. Thèse, Université de Toulouse, 10 décembre 2009.
- [7] G. Gaussorgues, La Thermograohie Infrarouge, Lavoisier, 1989, ISBN 2-8506-547-9.
- [8] CEDIP, Altair user manual, DL00U-F, Paris.
- [9] CEDIP, Titanium user manual, DC019U-A, Paris.