

# Mesure de température en régime dynamique sur des matériaux opaques à haute température par méthodes multi-spectrales

## Dynamic temperature measurements of opaque materials at high temperatures using multi-spectral methods

Kamal ENNASS <sup>\*(1,2,3)</sup>, Benjamin REMY <sup>(1,2)</sup>, Vincent SCHICK <sup>(1,2)</sup> et Johann MEULEMANS <sup>(2,3)</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique et Appliquée, Université de Lorraine, CNRS, 2 Av. de la Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>2</sup> Laboratoire commun Canopée, CNRS, Université de Lorraine, Saint-Gobain

<sup>3</sup> Saint-Gobain Research Paris, 39 quai Lucien Lefranc, F-93303 Aubervilliers, France

\* (auteur correspondant : kamal.ennass@saint-gobain.com)

**Résumé** - La mesure de la température est soumise à des perturbations dues aux nombreux biais et bruits de mesure. Le contrôle précis de la température lors des procédés de fabrication des matériaux est un point crucial pour l'obtention des propriétés désirées. Dans le cadre de cette étude, l'outil métrologique utilisé est la thermographie infrarouge multi-spectrale qui présente l'avantage d'être une méthode sans contact, donc non perturbatrice des transferts de chaleur. Cet article présente les méthodes développées et les résultats théoriques obtenus sur l'estimation d'une température dynamique à la surface d'un matériau opaque, en prenant en compte des différents types de biais.

**Mots-clés** : Métrologie thermique ; Thermographie infrarouge ; Haute température ; Méthodes inverses.

**Abstract** - Temperature measurements are subject to disturbances due to numerous measurement biases and experimental noises. Precise temperature control during material manufacturing processes is crucial for obtaining the desired properties. In the context of this study, the metrological tool used for the measurements will be the multi-spectral infrared thermography, which presents the advantage of being a non-contact method, therefore not interfering with heat transfer. This article presents the theoretic results of the methods developed for the estimation of a dynamic temperature in an opaque material, while taking into account the different types of bias of the methods.

**Keywords**: Thermal metrology; Infrared thermography; High temperature; Inverse methods.

## 1. Introduction

Les mesures fiables et robustes des hautes températures sont essentielles pour de nombreuses applications industrielles. Une mesure précise permettra de contrôler et piloter des procédés industriels plus finement et de diminuer leur consommation énergétique.

Les principales problématiques industrielles concernant le développement de nouveaux matériaux portent sur la convenance entre les modèles développés (« *fit for purpose model* ») et leur mise en œuvre pour répondre aux questions de dimensionnement ou d'assistance technique avec un délai raisonnable. La validation et la calibration des modèles peuvent alors s'appuyer sur des grandeurs physiques mesurées *in situ* ou *in operando*.

La thermographie infrarouge multi-spectrale est un outil métrologique non-perturbateur qui permet de mesurer et de visualiser des champs de température sans contact à la surface d'un matériau. Contrairement aux outils de mesure avec contact (thermocouples, thermomètre à résistance...) qui présentent un risque d'endommagement aux hautes températures, les outils sans contact ont l'avantage de ne pas perturber le transfert de chaleur dans les matériaux avec une installation et maintenance relativement simples.

Il existe plusieurs travaux menés sur la mesure sans contact de la température de surface, nous pourrions citer notamment la pyrométrie à bande large, la pyrométrie monochromatique, la pyrométrie bichromatique (Krapez 2011 [1]), la pyrométrie polychromatique (ou multi-spectrale) (Araujo 2017 [2] ; Coates 1981[3] ; Duvaut 1995 [4] ; Gardner 1981 [5]), la pyrométrie active (Loarer et al. 1990 [6] ; Loarer & Greffet 1992 [7] ; Eyal et al. 1998 [8]), Les biais des méthodes multi-spectrales ont aussi été récemment documentés (Krapez 2019 [9]).

Dans cet article, nous nous intéressons à la mesure non-intrusive de température sur des matériaux opaques. Cette étude est la continuité des travaux de thèse de Christophe Rodiet au LEMTA [10]. L'un des résultats importants de ces travaux a été de définir des longueurs d'ondes optimales pour la mesure de la température la plus précise possible en régime stationnaire tenant compte du rapport signal/bruit et de la méconnaissance de l'émissivité.

Dans le cadre de cette étude, nous prenons en compte la résolution temporelle pour évaluer l'applicabilité des algorithmes de minimisation et des mesures par voie optique dans le cas dynamique. Un défi majeur est la méconnaissance des propriétés optiques des matériaux et leur évolution en fonction de la température, la longueur d'onde et le temps, ce qui peut détériorer la précision d'estimation et présente un biais sur les différentes méthodes développées.

## 2. Méthodes

La méthodologie privilégiée consiste à combiner la thermographie infrarouge multi-spectrale avec des techniques inverses pour l'estimation de la température à la surface à partir d'un problème d'optimisation. La fonction coût que nous avons choisi de minimiser est l'écart quadratique entre le flux expérimental mesuré par la caméra infrarouge (ou simulé dans le cas des simulations numériques) et l'expression analytique du flux émis par un corps opaque donnée par la loi de Planck :

$$J(\beta(1), \beta(2), \dots) = \sum_{i=1}^n (\varphi^{exp}(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i, \beta(1), \beta(2), \dots))^2 \quad (1)$$

Avec  $\beta$  le vecteur de paramètres à estimer et  $\varphi(\lambda_i, T) = \varepsilon_{\lambda_i} \frac{c_1 \lambda_i^{-5}}{\exp(\frac{c_2}{\lambda_i T}) - 1}$  le flux radiatif émis par le corps opaque d'une émissivité  $\varepsilon_{\lambda_i}$  à la température T et la longueur d'onde  $\lambda_i$ .

Le nombre de longueurs d'ondes utilisées pour l'estimation (nombre d'équations) dépend du nombre de paramètres à estimer. L'existence des longueurs d'ondes optimales d'estimation en fonction du niveau de température du matériau que l'on souhaite caractériser, a été déjà démontré [10]. Ces longueurs d'ondes sont calculées en minimisant l'écart-type sur la température.

Dans le cas où nous souhaiterions estimer uniquement la température (méthode mono-spectrale), la matrice de sensibilité du flux au vecteur des paramètres  $\beta = T$  (de dimension (1x1) dans ce cas) à estimer serait définie par :

$$X = \frac{\partial \varphi(T)}{\partial T} \quad (2)$$

Nous pouvons aussi retrouver la matrice de variance-covariance à partir de la matrice de sensibilité  $X$  et l'écart-type sur le flux supposé constant  $\sigma_\varphi = 8.97 * 10^4 W.m^{-2}$  (valeur expérimentale obtenue avec la caméra infrarouge Cedip Titanium) :

$$cov(\beta) = \sigma_T^2 = (X^t X)^{-1} \sigma_\varphi^2 \quad (3)$$

La longueur d'onde optimale d'estimation est donc calculée en déterminant la valeur qui minimise l'écart-type sur la température :

$$\lambda_{opt} = argmin_\lambda(\sigma_T(T, \lambda)) \quad (4)$$

Nous calculons les longueurs d'ondes optimales dans l'intervalle de température [800K-1200K] que nous souhaitons estimer avec les méthodes multi-spectrale dans la partie suivante. Nous obtenons les valeurs suivantes avec l'écart-type minimal à chaque niveau de température :

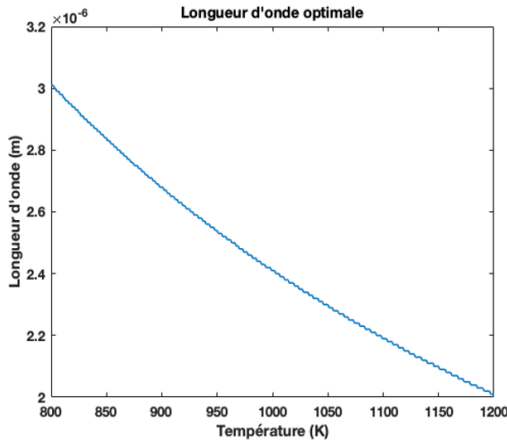


Figure 1 : Longueur d'onde optimale en fonction de la température à estimer

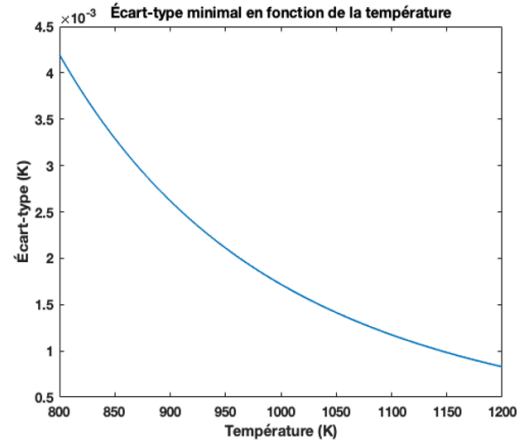


Figure 2 : L'écart-type minimal en fonction de la température à estimer

Nous utilisons la méthode de Levenberg-Marquardt pour l'estimation des paramètres [11,12], cet algorithme est implémenté dans un code Matlab [13] que nous utilisons.

### 3. Résultats

Les résultats présentés dans cette partie sont issus des simulations numériques, le flux radiatif « expérimental » est donc un signal simulé à partir de la loi de Planck auquel nous rajoutons un bruit de mesure  $\sigma_\varphi$  et un biais sur le flux qui représente la réflexion de 10% du flux provenant de l'environnement qui entoure le corps opaque et qui est réfléchi par sa surface.

La première méthode utilisée est la méthode mono-spectrale dans laquelle le seul paramètre à estimer est la température car nous supposons que l'émissivité du matériau est déjà connue.

Nous avons besoin que d'une seule longueur d'onde pour l'estimation dans le cas d'un système déterminé dans lequel le nombre de longueurs d'ondes égale au nombre de paramètres. Vu que la longueur d'onde optimale de mesure dépend du niveau de température et que nous sommes en train d'estimer des températures dynamiques, nous avons décidé de travailler avec une longueur d'onde optimale globale qui est la moyenne arithmétique des longueurs d'ondes optimales des températures à estimer. Les écart-types sur la température obtenus dans ce cas restent dans le même ordre de grandeur que les valeurs minimales.

Il existe un biais systématique dans la méthode mono-spectrale qui se traduit par la méconnaissance de la valeur d'émissivité qui correspond au matériau.

Nous simulons un flux radiatif à partir d'une température qui varie linéairement entre 800K et 1200K d'un corps opaque à la longueur d'onde optimale globale  $\lambda_{opt, globale} = 2.44\mu m$ .

Nous avons estimé la température dynamique et l'erreur d'estimation (résidu) pour différents niveaux de biais allant de 10% à 90% avec une émissivité réelle unitaire  $\varepsilon = 1$  (un biais de 10% signifie une émissivité supposée connue de 0.9 au lieu de 1).

L'erreur totale d'estimation est composée de l'erreur stochastique qui provient de la présence du bruit de mesure et de l'erreur systématique due au biais de la méthode utilisée. Plusieurs simulations ont démontré que la valeur de l'erreur stochastique est négligeable devant l'ordre de grandeur de l'erreur systématique. Nous supposons donc que l'erreur totale est égale à l'erreur systématique. Les résultats sont représentés sur la Figure 3:

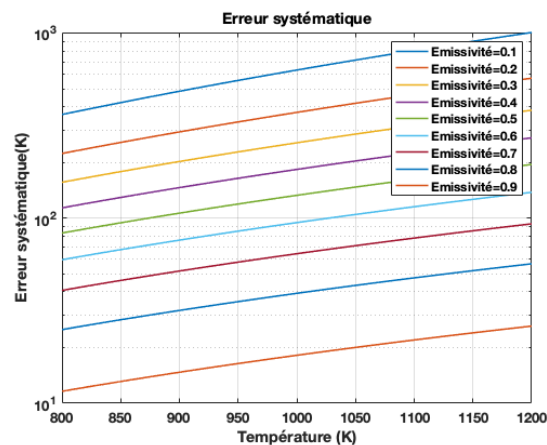


Figure 3 : L'erreur systématique sur la température en fonction de la température pour différents niveaux de biais. Méthode mono-spectrale.

Nous observons que même dans le cas d'un niveau de biais faible de 10%, l'erreur générée a un ordre de grandeur non-négligeable de  $10^1$  K. Quand la valeur connue de l'émissivité est loin de la valeur réelle (le cas d'un biais de 90%), nous arrivons à 1000K d'erreur. En pratique, nous n'atteignons jamais des niveaux de biais aussi élevés.

Nous constatons que la méthode mono-spectrale n'est pas pertinente pour l'estimation de la température car nous connaissons rarement la valeur réelle de l'émissivité et cela conduit à des erreurs systématiques non négligeables sur l'estimation.

Pour contourner ce biais, nous allons estimer simultanément la température et l'émissivité du corps à l'aide d'une méthode « bi-spectrale ». La fonction coût à minimiser dans le cas de cette méthode est :

$$J(T, \varepsilon) = \sum_{i=1}^2 (\varphi^{exp}(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i, T, \varepsilon))^2 \quad (5)$$

Comme dans le cas de la méthode mono-spectrale, il existe un biais systématique dans la méthode bi-spectrale qui provient de l'hypothèse que l'émissivité reste constante dans la bande spectrale utilisée, ce qui n'est souvent pas le cas.

Nous travaillons avec une émissivité spectrale simulée avec le modèle de Drude suivant (qui arrive à décrire la dépendance spectrale de l'émissivité des matériaux métalliques purs et de surface lisse [10,14]) :

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{A}{\sqrt{\lambda - \lambda_0}} \quad (6)$$

Les paramètres A et  $\lambda_0$  sont calculés selon la variation souhaitée en fixant la valeur de l'émissivité aux deux extrémités de la bande spectrale (deux équations pour deux paramètres). Nous quantifions de la même manière l'erreur systématique obtenue à cause de ce biais aux longueurs d'ondes optimales globales  $\lambda_{opt, globale} = \{1.85\mu m, 4.52\mu m\}$  :

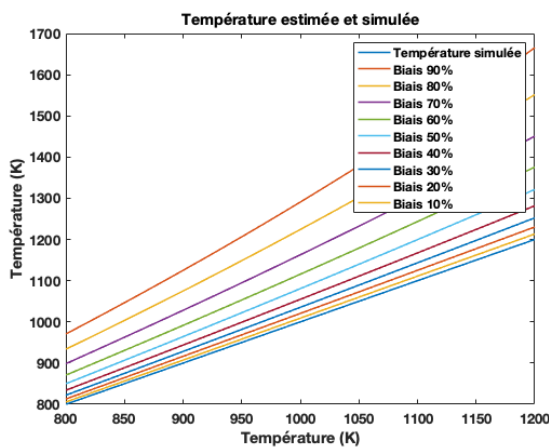


Figure 4 : Température estimée en fonction de la température. Méthode bi-spectrale.

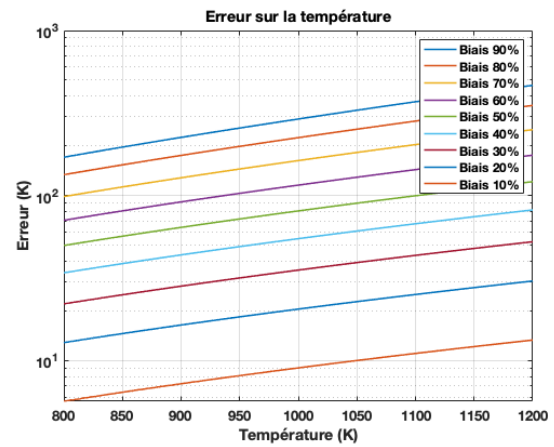


Figure 5 : Erreur systématique en fonction de la température. Méthode bi-spectrale.

Nous sommes donc amenés à développer une méthode qui arrive à estimer une émissivité spectrale pour une estimation plus précise sur la température. Nous introduisons donc, dans l'expression analytique de la loi de Planck, un modèle en éléments finis qui décrit la variation spectrale de l'émissivité :

$$\varphi = \left( \sum_{j=1}^n \varepsilon_{\lambda_j} N_j(\lambda) \right) \cdot \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \quad (7)$$

L'avantage de l'utilisation des fonctions chapeaux  $N_j(\lambda)$  de type P1 (des polynômes d'interpolation de degré inférieur ou égal à 1) dans le modèle de l'émissivité est qu'elles

permettent d'assurer la continuité du modèle mais également de sa dérivée presque partout. La méthode est généralisable avec d'autres polynômes P2 ou P3 (les splines cubiques) pour modéliser des fonctions plus régulières.

Pour l'estimation, nous comparerons les résultats obtenus avec deux algorithmes différents : Levenberg-Marquardt (LVM) [11,12] et Particle Swarm Optimization (PSO) [15]. Contrairement au Levenberg-Marquardt, le PSO permet d'ajouter des contraintes d'intervalle sur les paramètres à estimer. Nous utilisons la toolbox Matlab « particleswarm ».

Nous choisissons d'estimer 7 coefficients d'émissivité  $\varepsilon_{\lambda_j}$  pour suivre la courbure du comportement expérimental (ou simulé) de l'émissivité. Avec un nombre faible de coefficients estimés, le modèle à fonctions linéaires par morceaux engendrerait des erreurs d'émissivité non négligeable aux longueurs d'ondes où la valeur du coefficient n'était pas estimée.

L'émissivité simulée est de type Drude variant entre 1 et 0.6 dans la gamme spectrale  $\lambda = [2\mu m, 4\mu m]$ , les deux extrémités correspondent à  $\lambda_1$  et  $\lambda_4$  des filtres expérimentaux disponibles  $\lambda_{exp} = \{2\mu m, 2.35\mu m, 2.85\mu m, 4\mu m\}$ . Les valeurs des longueurs d'ondes d'estimation varient selon le type de système : déterminé ou hyper-spectrale (nombre de longueurs d'ondes supérieur au nombre de paramètres) avec  $\Delta\lambda = cte$ . Les flux sont simulés à partir d'une température constante  $T=800K$  sans bruit de mesure et sans biais pour étudier les erreurs d'estimation sans l'influence de l'écart-type stochastique.

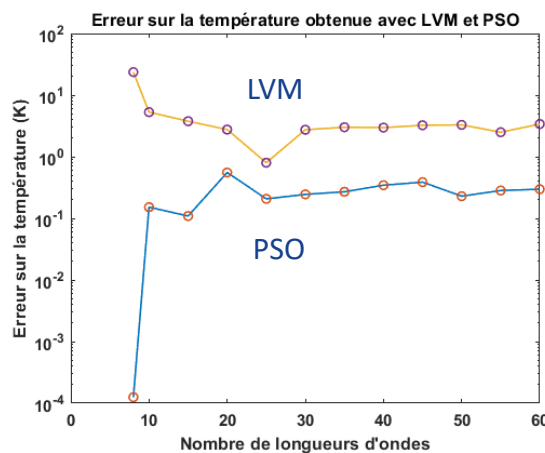


Figure 6 : Erreur sur la température en fonction du nombre de longueurs d'ondes et de l'algorithme de minimisation. Méthode multi-spectrale.

Nous observons dans la Figure 6 que les erreurs obtenues avec l'algorithme PSO sont plus faibles que celles qui résultent du Levenberg-Marquardt. Mais l'algorithme PSO est très dépendant de la position initiale, qui est générée aléatoirement à chaque estimation.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt peut donner dans certains cas des émissivités qui dépassent l'unité quand la température est sous-estimée, tout en minimisant la fonction coût.

Nous obtenons la plus faible erreur sur la température en utilisant 8 longueurs d'ondes avec PSO et 25 longueurs d'ondes avec Levenberg-Marquardt (en hyper-spectrale), mais l'évolution de l'erreur en fonction du nombre de longueurs d'ondes n'est pas monotone.

Avec l'algorithme du PSO, l'hyper-spectrale engendre des erreurs supérieures à celles obtenues avec le système déterminé. Nous travaillons donc avec un système déterminé pour l'estimation d'une température dynamique et l'émissivité spectrale du polyborosilazane (Si-C-N) à 1297K dans la gamme spectrale  $\lambda = [4\mu m, 8\mu m]$  [16] en prenant en compte le bruit de mesure et le biais sur le flux. Cette simulation a pour but d'évaluer l'applicabilité de la méthode développée sur des variations d'émissivité correspondant aux matériaux réels :

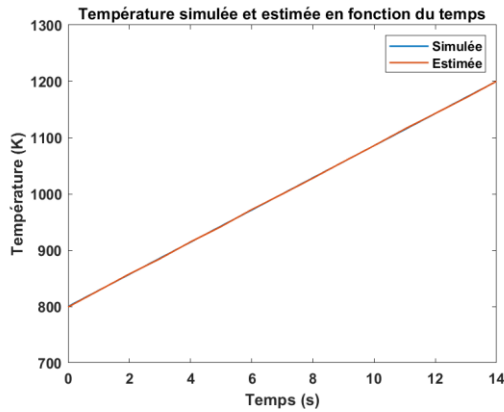


Figure 7 : Température estimée et simulée en fonction du temps. Méthode multi-spectrale.

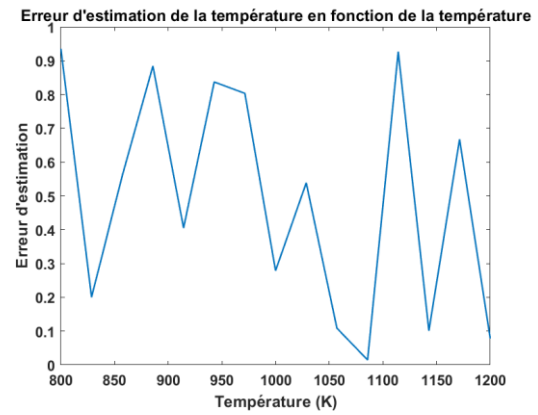


Figure 8 : Erreur systématique en fonction de la température. Méthode multi-spectrale.

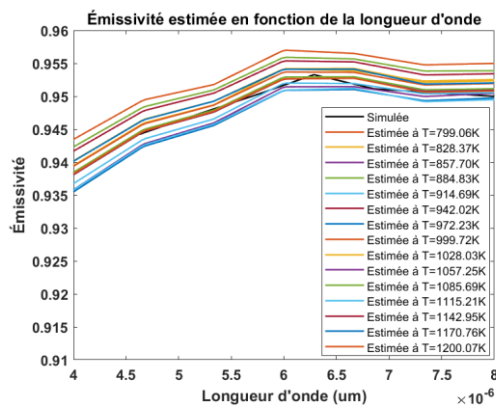


Figure 9 : Émissivité estimée et simulée en fonction de la longueur d'onde. Méthode multi-spectrale.

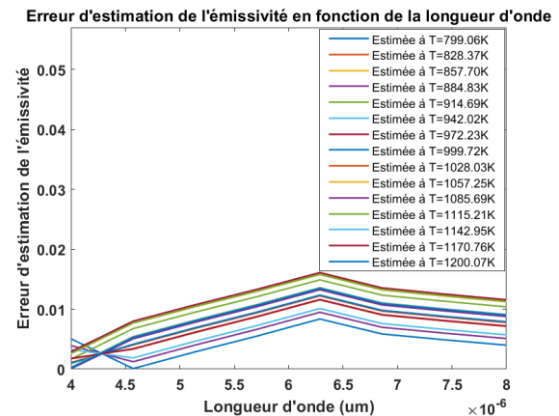


Figure 10 : Erreur d'estimation de l'émissivité en fonction de la longueur d'onde. Méthode multi-spectrale.

Nous observons que les erreurs obtenues sur les températures (cf. Figure 8) et les émissivités estimées (chaque couleur correspond à une émissivité estimée à un niveau de température différent) (cf. Figure 10) sont faibles et négligeables, avec des ordres de grandeurs de  $10^{-1}$ K sur la température et de  $10^{-2}$  globalement sur l'émissivité, même dans le cas des matériaux réelles et en présence du biais et du bruit de mesure.

#### 4. Conclusion et perspectives

Trois méthodes d'estimation de la température ont été développées, la méthode mono-spectrale qui estime la température en supposant que l'émissivité est connue, la méthode bi-spectrale qui suppose que l'émissivité est constante et l'estime avec la température et la méthode multi-spectrale qui modélise l'émissivité à l'aide des éléments finis.

Les méthodes mono et bi-spectrales en régime dynamique sont capables d'estimer la température avec une haute précision qu'en absence de biais systématique sur l'émissivité, Dans le cas des biais fort, l'erreur systématique peut atteindre jusqu'à  $10^3$  K.

La méthode multi-spectrale nous permet d'estimer simultanément une émissivité spectrale et la température dynamique avec une haute précision même dans des conditions expérimentales simulées. Même si l'algorithme du PSO nous donne des résultats prometteurs, cet algorithme est très dépendant des conditions initiales alors que le Levenberg-Marquardt est déterministe mais ne permet pas d'imposer des contraintes sur les paramètres. La solution que nous envisageons à étudier est d'implémenter une méthode bayésienne sur la fonctionnelle à minimiser. La validation expérimentale des méthodes présentées est aussi envisagée.

### Références

- [1] : J. C. Krapez. Radiative Measurements of Temperature, Thermal Measurements and Inverse Techniques, Heat Transfer, p.587104377, 2011.
- [2] : A. Araujo. Multi-spectral pyrometry - a review. *Measurement Science and Technology*, vol. 28, issue 8, 2017.
- [3] : P.B. Coates. Multi-Wavelength Pyrometry. *Metrologia*, vol. 17, number 3, 1981.
- [4] : F. Meriaudeau. Real time multispectral high temperature measurement: Application to control in the industry. *Image and Vision Computing*, vol. 25, issue 7, pp. 1124-1133, 2007.
- [5] : J. L. Gardner, T. P. Jones and M. R. Davies. A six-wavelength pyrometer. *High Temperature - High Pressure*, vol. 13, pp. 459-466, 1981.
- [6] : T. Loarer, J. J. Greffet and M. Huetz-Aubert. Noncontact surface temperature measurement by means of a modulated photothermal effect. *Applied Optics*, vol. 29, issue 7, pp. 979-987, 1990.
- [7] : T. Loarer and J. J. Greffet. Application of the pulsed photothermal effect to fast surface temperature measurements. *Applied Optics*, vol. 31, issue 25, pp. 5350-5358, 1992.
- [8] : O. Eyal, V. Scharf and A. Katzir. Fiber-optic pulsed photothermal radiometry for fast surface-temperature measurements. *Applied Optics*, vol. 37, issue 25, pp. 5945-5950, 1998.
- [9] : J. C. Krapez. Measurements without contact in heat transfer: multiwavelength radiation thermometry. Principle, implementation and pitfalls. In: *METTI 7 Advanced School: Thermal Measurements and Inverse Techniques*, Porquerolles, France, 2019.
- [10] : Ch. Rodiet. Mesure de Température par Méthodes Multi-Spectrales et Caractérisation Thermique de Matériaux Anisotropes par Transformations Intégrales : « Aspects Théoriques et Expérimentaux ». Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2014.
- [11] : K. Levenberg. A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, vol. 2, pp. 164-168, 1944.
- [12] : D. W. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, vol. 11, issue 2, pp. 431-441, 1963.
- [13] : R. I. Shrager, R. Muzic, and A. Jutan. leasqr.m, version 3. beta, 1994.
- [14] : J. Taine and J. P. Petit. *Transferts thermiques*. Dunod, 2003.
- [15] : J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization, Proceedings of ICNN'95 - *International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [16] : G. Neuer and G. Jaroma-Weiland. Spectral and Total Emissivity of High-Temperature Materials. *International Journal of Thermophysics*, vol. 19, issue 3, 1998.