

Développement d'un fluxmètre imageur hyperspectral sans contact par thermographie infrarouge

Contactless hyperspectral imaging fluxmetry by infrared thermography

Abderezak AOUALI^{1*}, Stephane CHEVALIER¹, Alain SOMMIER¹, Jean-Christophe BATSALE¹, Christophe PRADERE¹

¹I2M, UMR CNRS-UB-ENSAM 5295

Esplanade des Arts et Metiers, 33405 Talence Cedex, France.

*(auteur correspondant : abderezak.aouali@u-bordeaux.fr)

Résumé - La connaissance de la forme et de la densité de flux thermique délivré par une source est primordiale pour tous dispositifs expérimentaux. Cette connaissance nécessite le développement d'une méthode qui s'appuie sur un modèle mathématique décrivant le transfert thermique. Un dispositif basé sur un thermoconvertisseur hyperspectral ainsi qu'une méthode inverse liée au transfert conductif sont présentés dans ce travail. Cela permettra d'estimer la forme ainsi que la densité d'énergie d'une source thermique dans une très large gamme spectrale.

Mots-clés : Fluxmétrie hyperspectrale ; Thermographie infrarouge ; Méthodes inverses.

Abstract - The knowledge of the shape and density of the heat flux delivered by a source is of prime interest for all experimental setups. This knowledge requires the development of a method based on a mathematical model describing the heat transfer. A setup based on a hyperspectral thermoconverter as well as an inverse thermal method related to the conductive transfer is presented in this work. The estimation of the shape and the energy density of a heat source is performed for a very wide spectral range.

Keywords: Hyperspectral fluxmetry; Infrared thermography; Inverse methods.

Nomenclature

| | | | |
|-----------|---|-----------------------|--|
| a | diffusivité thermique, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ | T | température, K |
| C_p | chaleur spécifique, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ | <i>Symboles grecs</i> | |
| e | épaisseur, m | α, β | fréquences spatiales, m^{-1} |
| h | coefficient d'échange convectif, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ | ϵ | émissivité |
| \hat{h} | réponse impulsionnelle | λ | conductivité thermique, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| p | variable de Laplace, s^{-1} | ρ | masse volumique, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| P | puissance, W | ψ | coefficient de calibration, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Q | source interne, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ | | |
| t | temps, s | | |

1. Introduction

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'un projet ADEME qui vise à caractériser thermiquement et chimiquement les torches à plasma. L'enjeu principal est la mesure des champs 3D de

la température et du flux sans contact en vue de l'optimisation énergétique des torches.

La connaissance du flux thermique est souvent primordiale dans certains domaines, citons à titre d'exemple les domaines de la construction, de l'aéronautique, de l'aérospatiale, ou de l'optique. Cette connaissance du flux thermique peut : (i), permettre la réalisation de bilans thermiques, (ii), servir de données d'entrées à des modèles ou (iii), contrôler des procédés.

Dans les travaux précédents, il existe de nombreuses méthodes d'estimation des sources de chaleur en fonction de la nature du transfert thermique : conduction, convection ou rayonnement. On s'intéressera dans cette étude uniquement aux méthodes inverses thermiques liées au transfert conductif. Dans les travaux de Garderein et al. [1], il a été développé un système basé sur un thermocouple permettant d'estimer les flux locaux en se basant sur des méthodes inverses thermiques analytiques. Une autre étude de Zeribi et al. [2] rapporte la fabrication d'un capteur de flux thermique en se basant sur la méthode du gradient de température spatiale. La reconstruction spatiale des sources thermiques a été abordé par Groz et al. [3, 4] en utilisant des modèles analytiques ainsi que deux méthodes d'inversion (statistique et déconvolution par Toeplitz) sans pour autant atteindre l'aspect quantitatif de l'estimation de l'amplitude du flux thermique. Dans la continuité de ces travaux, il devient important de développer de nouveaux capteurs de flux sans contact (reconstruction spatiale de la source ainsi que sa densité de flux) qui soient efficace dans une large gamme spectrale (hyperspectral).

Ici l'objectif est de développer un capteur de flux hyperspectral en utilisant un film de carbone très fin et homogène appelé thermoconvertisseur hyperspectral basé sur la technologie EMIR développée par Balageas et al [5]. Des études ont été faites sur le thermoconvertisseur [6, 7] et ont démontré sa capacité à absorber le rayonnement dans une très large gamme spectrale (du visible aux ondes radio) avec des proportionnalités différentes (selon la longueur d'onde). Ce capteur permettra d'estimer la répartition spatiale de la source ainsi que sa densité d'énergie. Dans cette communication, nous présentons le montage expérimental ainsi que le modèle analytique et la méthode inverse utilisée. Ensuite, une méthode de calibration du thermoconvertisseur hyperspectral est décrite afin de mettre en évidence l'aspect quantitatif du capteur. Enfin, des résultats obtenus par le capteur pour des sources de différentes gammes spectrales sont exposés.

2. Matériel et méthodes

2.1. Dispositif expérimental

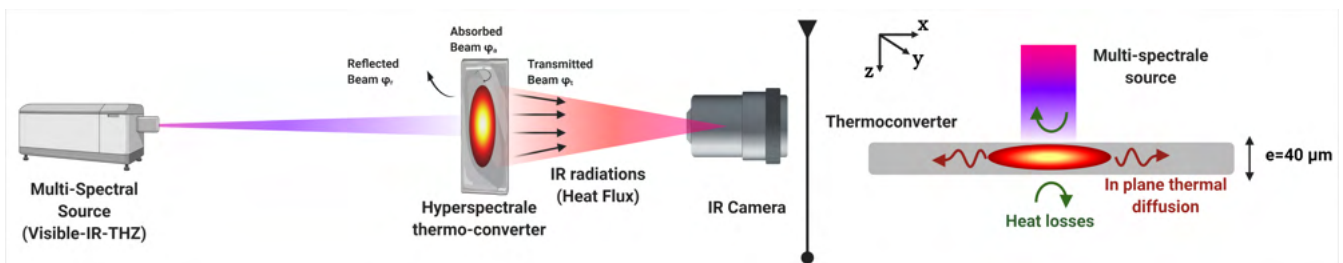


Figure 1 : Schéma du montage expérimental

Le montage expérimental est décrit dans la figure 1.a. Une source multi-spectrale permet d'éclairer et d'exciter thermiquement le thermoconvertisseur. En réponse le thermoconvertisseur chauffe et réémet des radiations infrarouges. Une caméra infrarouge de type Insb (FLIR SC700) conçue pour la gamme spectrale $[1.5\mu\text{m}-5.5\mu\text{m}]$ placée derrière le thermoconvertisseur (qui est assimilé à un corps noir $\epsilon \approx 1$ [6]) permet de faire les acquisitions.

2.2. Modèle mathématique

L'évolution du champ de température dans le thermoconvertisseur (épaisseur = 40 μm) est régie par l'équation de conduction 3D chaleur avec une source volumique interne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} + Q(x, y, z, t), \\ -\lambda_x \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x/2} = 0, \\ -\lambda_y \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y/2} = 0, \\ -\lambda_z \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=e/2} = hT(x, y, e/2, t), \\ -\lambda_z \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=-e/2} = -hT(x, y, e/2, t), \\ T(x, y, z, t = 0) = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Pour une petite valeur de "e", les gradients de température dans l'épaisseur du thermoconvertisseur peuvent être négligés. En supposant la linéarité des pertes de chaleur le long de la direction z (aillette), l'équation précédente peut s'écrire :

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = a_x \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} - \underbrace{\frac{2h}{\rho C_p e}}_{1/\tau} T(x, y, t) + \frac{Q(x, y, t)}{\rho C_p}, \quad (2)$$

Avec $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$. Une façon de résoudre l'équation Eq. 2 est d'appliquer une transformée de Laplace temporelle et deux transformées en cosinus spatiales au champ de température $T(x, y, t)$. On obtient de ce fait l'équation suivante :

$$p\Theta(\alpha_n, \beta_m, p) = -a_x \alpha_n^2 \Theta(\alpha_n, \beta_m, p) - a_y \beta_m^2 \Theta(\alpha_n, \beta_m, p) - \frac{1}{\tau} \Theta(\alpha_n, \beta_m, p) + \frac{\phi(\alpha_n, \beta_m, p)}{\rho C_p}, \quad (3)$$

Et

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, p) \underbrace{\left(p + a_x \alpha_n^2 + a_y \beta_m^2 + \frac{1}{\tau} \right)}_K = \frac{\phi(\alpha_n, \beta_m, p)}{\rho C_p}, \quad (4)$$

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, p) = \frac{\phi(\alpha_n, \beta_m, p)}{\rho C_p (p + K)}. \quad (5)$$

Pour trouver le profil de température espace-temps, il faut effectuer deux transformations en cosinus inverses dans l'espace et une transformation de Laplace inverse dans le temps.

Afin de s'affranchir de la contribution du ρC_p du thermoconvertisseur (inconnu) et du volume de la source dans le modèle, un coefficient de calibration ψ sera déterminée (voir partie **Calibration**). Il convient donc de noter que dans le cas du point source avec excitation Dirac temporelle, l'équation Eq. 5 s'écrit :

$$Q(x, y, t) = \delta(x, y, t), \text{ on a : } \mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t) = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\psi \cdot \delta(\alpha_n, \beta_m)}{(p + K)} \right) = \psi \cdot \delta(\alpha_n, \beta_m) \exp(-Kt). \quad (6)$$

Dans ce cas, l'équation Eq. 6 correspond à la réponse impulsionnelle du point source dans l'espace de Fourier.

2.3. Méthode inverse

On se basant sur l'équation Eq. 5, la température de sortie peut simplement s'écrire comme un produit de convolution espace-temps de la source et de la réponse impulsionnelle :

$$T(x, y, t) = Q(x, y, t) \otimes \hat{h}(x, y, t), \quad (7)$$

Où $\hat{h}(x, y, t)$ est la réponse impulsionnelle dans l'espace réel.

Après le passage dans la base de Fourier spatiale :

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, t) = \int_0^{+\infty} \phi(\alpha_n, \beta_m, t - t_0) \times \mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t_0) dt_0 \quad (8)$$

Cela représente une convolution temporelle de la source et de la réponse impulsionnelle dans la de Fourier spatiale :

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, t) = \phi(\alpha_n, \beta_m, t) \otimes_t \mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t) \quad (9)$$

Enfin, la source peut être déduite de l'équation Eq. 9 :

$$\phi(\alpha_n, \beta_m, t) = \theta(\alpha_n, \beta_m, t) \otimes_t \frac{1}{\mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t)} \quad (10)$$

Ensuite, pour chaque mode, une inversion par moindres carrés linéaires avec une régularisation de Thikonov [8] est effectuée, pour cela, nous définissons :

- S : Matrice Toeplitz [9] (matrice de réponse impulsionnelle) de taille $(t \times t)$ estimée à partir de la réponse impulsionnelle définie dans l'équation Eq. 6.
- D : Matrice de dérivation [8, 9] de taille $(t \times t)$, tous les termes de la matrice sont des zéros sauf les termes diagonaux et surdiagonaux qui valent respectivement de 1 et -1 .
- μ : Coefficient de régularisation [10, 11].

Ensuite, l'expression suivante permet d'estimer la source dans la base de Fourier spatial :

$$\phi(\alpha_n, \beta_m, t) = (S'_{i,j,t \times t} S_{i,j,t \times t} + \mu D'_{t \times t} D_{t \times t})^{-1} S'_{i,j,t \times t} \times \theta(\alpha_n, \beta_m, t) \quad (11)$$

Enfin, pour trouver la distribution spatiale de la source, deux transformations en cosinus inverse sont nécessaires.

2.4. Calibration

Afin d'estimer le flux d'excitation, une calibration du modèle est nécessaire. La diffusivité thermique a pu être estimée par la méthode du Flying Spot [12] et vaut $a_x = a_y = 4.7 \times 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pour calibrer le thermoconvertisseur, on utilise une méthode par effet Joule basée sur un fil de chromel de longueur (50 mm), de diamètre (200 μm), et de résistance (618 m Ω). Le montage réalisé est décrit dans la figure 3, un générateur électrique est connecté au bord du fil de chromel et permet de délivrer une tension régulée. Le thermoconvertisseur est collé sur le fil qui est isolé par une mousse. Enfin, une caméra infrarouge permet de faire les acquisitions.

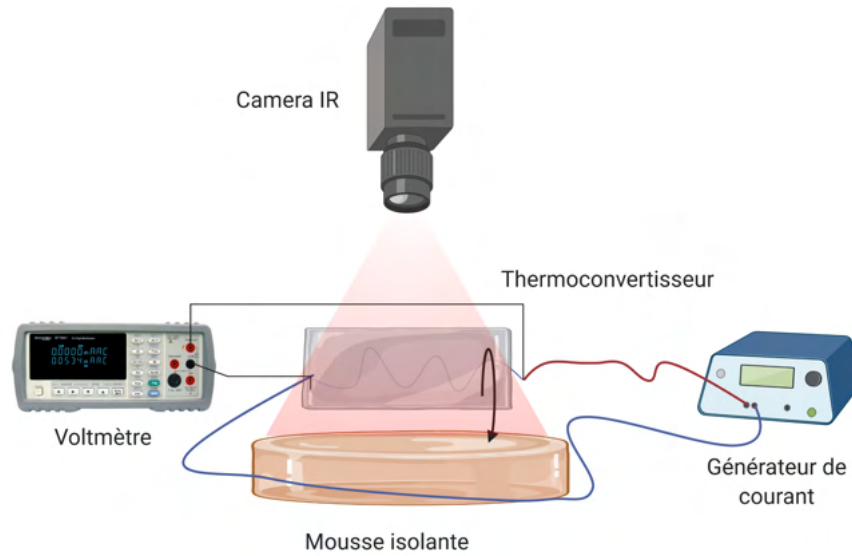


Figure 2 : Montage expérimental de la calibration du thermoconvertisseur par effet Joule

La méthodologie utilisée consiste à délivrer différentes tensions qui sont mesurées aux bornes du fil de chromel. La puissance injectée peut donc être déduite pour chaque mesure. La méthode inverse est appliquée pour reconstruire la source d'excitation, et un flux proportionnel au volume du fil et au ρC_p du thermoconvertisseur est estimé (voir figure 3). Un coefficient de calibration peut être déduit des différents flux estimés et de la connaissance de la puissance injectée au préalable (voir figure 4).

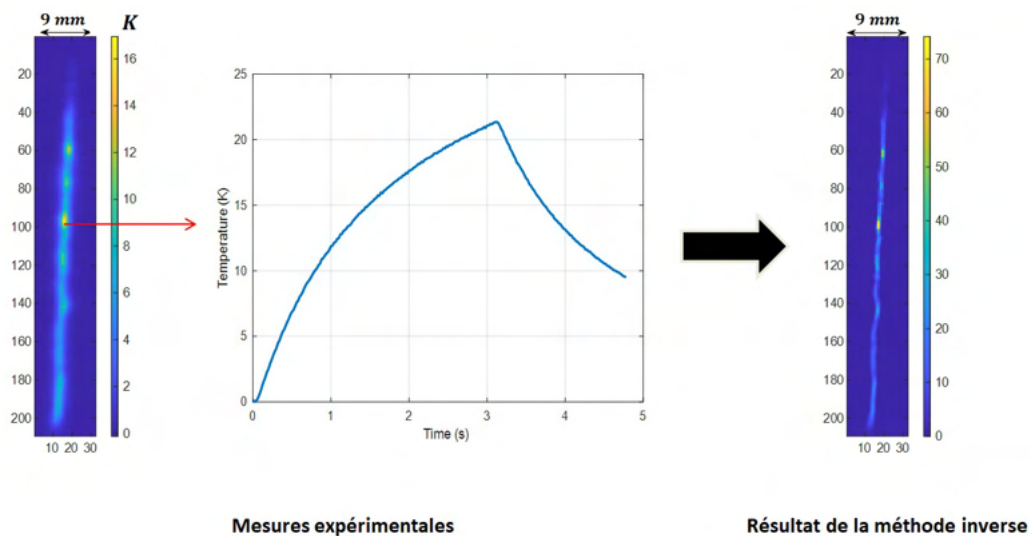
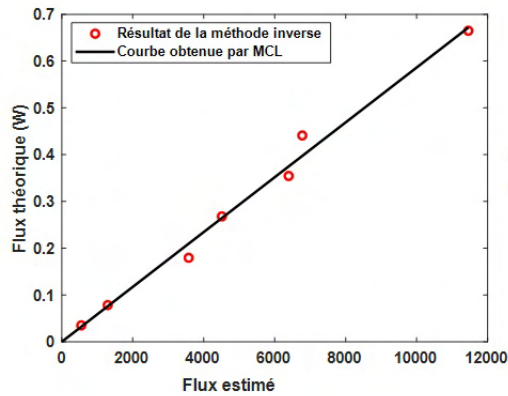


Figure 3 : Mesures expérimentales par effet joule pour un flux théorique de 0,354W et résultat de la méthode inverse



- Coefficient de calibration : $\psi = 5,8 \cdot 10^{-5}$
- L'écart-type est égale à $1,47 \cdot 10^{-6}$ avec une erreur de $114 \mu W$ sur la valeur du flux estimée

Figure 4 : Courbe de calibration du thermoconvertisseur par effet joule

3. Résultats et discussions

3.1. Resistance chauffante : $R = 73 \Omega$; $U = 4,93 V$; $P = 333 mW$

Le thermoconvertisseur est chauffé par la résistance pendant 3 secondes, le champ de température au cours du temps a été mesuré par la caméra infrarouge, ensuite. La méthode inverse a été appliquée et le flux a été estimé en calculant l'intégrale de l'image obtenue.

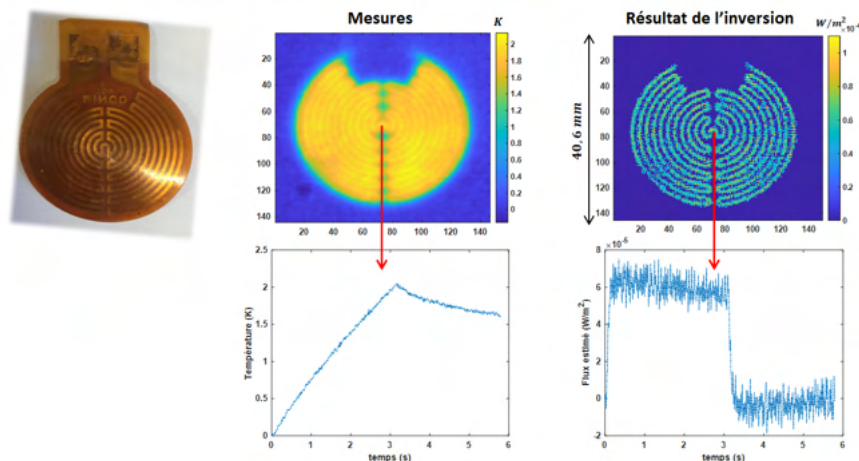


Figure 5 : Résultat de la méthode inverse sur une résistance chauffante de forme complexe

$$P_{\text{estimée}} = \sum_{i=1}^{i=140} \sum_{j=1}^{j=140} \phi_{\text{estimée}} = 332,6 mW$$

Le flux estimée est de $332.6 mW$ par rapport à un flux théorique de $333 mW$, avec une erreur de 0.12% .

3.2. Source Laser dans le proche infrarouge : longueur d'onde = $980 nm$; $P = 280 mW$

L'absorbance du thermoconvertisseur dans l'Infrarouge a été mesurée par [6] et est quasiment de 100% . Le thermoconvertisseur est excité dans ce cas par un Laser de longueur d'onde de $980 nm$. Les mêmes étapes décrites dans le cas de la résistance chauffante sont nécessaires pour l'estimation du flux.

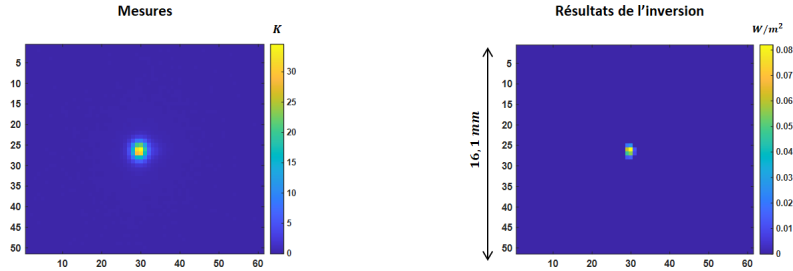


Figure 6 : Résultat de la méthode inverse sur une source laser dans le proche infrarouge

$$P_{\text{estimée}} = \sum_{i=1}^{i=60} \sum_{j=1}^{j=50} \phi_{\text{estimée}} = 272 \text{ mW}$$

Le flux estimée est de 272 mW par rapport à un flux théorique de 280 mW , avec une erreur de 2.86% .

3.3. Source giga-Hertz : longueur d'onde = 3 mm ; $P = 400 \text{ mW}$

L'absorbance du thermoconvertisseur dans le giga-Hertz a été mesurée par [6] et est quasiment de 61% . Le thermoconvertisseur est excité dans ce cas par une source GHZ de longueur d'onde de 3 mm . Les mêmes étapes décrites dans le cas de la résistance chauffante sont nécessaires pour l'estimation du flux.

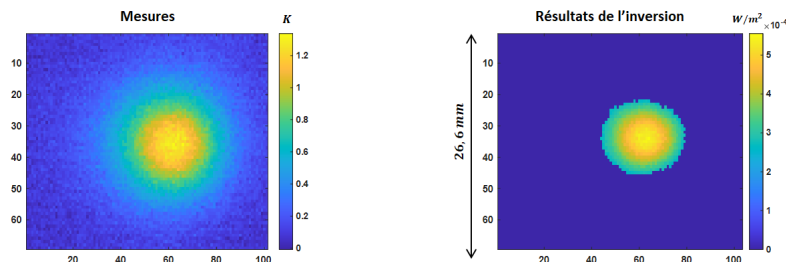


Figure 7 : Résultat de la méthode inverse sur une source giga-Hertz

$$P_{\text{estimée}} = \sum_{i=1}^{i=67} \sum_{j=1}^{j=100} \phi_{\text{estimée}} = 246 \text{ mW}$$

Le flux estimée est de 246 mW par rapport à un flux théorique de $400 \text{ mW} \times 62\% = 248 \text{ mW}$, avec une erreur de 0.81% .

4. Conclusion

Une méthode permettant d'estimer la forme ainsi que la densité du flux d'une source thermique multispectrale en utilisant un thermoconvertisseur hyperspectral a été présentée dans ces travaux. Elle permet, grâce à un modèle des transferts de chaleur au sein du thermoconvertisseur de construire une réponse impulsionnelle qui servira essentiellement à reconstruire la forme de la source, et, grâce à une calibration du thermoconvertisseur par effet Joule d'estimer la densité de flux de la source.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ADEME pour le soutien de ce travail à travers le projet IGAR avec Arcelor-Mittal.

Références

- [1] Gardarein, J. *et al.* Miniaturized heat flux sensor for high enthalpy plasma flow characterization. *Inverse Problems in Science and Engineering* (2013).
- [2] Zribi, A. *et al.* Design, fabrication and characterization of thin film resistances for heat flux sensing application. *Sensors and Actuators A : Physical* (2016).
- [3] Groz, M., Abisset-Chavanne, E., Meziane, A., Sommier, A. & Pradere, C. Bayesian inference for 3d volumetric heat sources reconstruction from surfacic ir imaging. *Applied science* (2020).
- [4] Groz, M., Abisset-Chavanne, E., Meziane, A., Sommier, A. & Pradere, C. Three-dimensional reconstruction of thermal volumetric sources from surface temperature fields measured by infrared thermography. *Applied science* (2019).
- [5] Balageas, D. L., Levesque, P. & Deom, A. A. Characterization of electromagnetic fields using a lock-in infrared thermographic system. In *Thermosense XV : An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications*, vol. 1933, 274–285 (International Society for Optics and Photonics, 1993).
- [6] Romano, M. *et al.* Broadband sub-terahertz camera based on photothermal conversion and ir thermography. *Journal of infrared, millimeter and terahertz waves* (2016).
- [7] Pradere, C. *et al.* Photothermal converters for quantitative 2d and 3d real-time terahertz imaging. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* (2010).
- [8] Tikhonov, A. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization. *Russian Academy of Sciences : Moscow, Russia* **151** (1963).
- [9] Gray, R. Toeplitz and circulant matrices : A review. *Found. Trends Commun. Inf. Theory* **2**, 155–239 (2006).
- [10] E, P. Sur un theoreme general relatif aux equations integrales de premiere espece et sur quelques problemes de physique mathematique. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* **29**, 79–97 (2010).
- [11] Vogel, C. Computational methods for inverse problems. *SIAM : Philadelphia, PA, USA* **23**, 79–97 (2002).
- [12] Gaverina, L., Batsale, J., Sommier, A. & Pradere, C. Pulsed flying spot with the logarithmic parabolas method for the estimation of in-plane thermal diffusivity fields on heterogeneous and anisotropic materials. *Journal of Applied Physics* **121**, 115105 (2017).