

Étude comparative de deux approches, thermocouples intégrés et thermographie infrarouge, pour la surveillance thermique d'une infrastructure de transport

Thibaud TOULLIER^{1,2}, Jean DUMOULIN^{1,2}, Laurent MEVEL^{1,2}

¹ Ifsttar, COSYS-SII, Route de Bouaye, 44344, Bouguenais, France

² Inria, Équipe I4S, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes, France

Résumé - Cette étude s'intéresse à l'évaluation et à l'amélioration de solutions d'instrumentation thermique pour la surveillance long terme d'infrastructures de transport de nouvelle génération. Un site d'essais a été équipé de thermocouples et d'un système de thermographie infrarouge couplé au suivi de paramètres environnementaux. Une méthode de reconstruction spatiale des images infrarouges est présentée. Les données de mesure acquises sur site, puis post-traitées, sont analysées sur le plan temporel. Une conclusion sur les résultats obtenus et des perspectives sont proposées.

Nomenclature

$L_{i,j}$	Luminance du pixel (i, j)
T	Température, °C
τ	Transmission
ϵ	Emissivité
R, B, F	Constantes d'étalonnage
<i>Indices et Exposants</i>	
obj	Objet
atm	Atmosphère
opt	Optique
env	Environnement

<i>Paramètres Extrinsèques</i>	
$T_{3 \times 1}$	Matrice de translation
$R_{3 \times 3}$	Matrice de rotation
<i>Paramètres Intrinsèques</i>	
f	Focale de la caméra
(c_x, c_y)	Centre optique de la caméra
a	Ratio d'aspect
s_k	Skew

1. Introduction

Dans le cadre du projet Routes de Cinquième Génération (R5G - www.ifsttar.fr/recherche-expertise/nos-grands-projets/r5g-route-de-5eme-generation) de l'IFSTTAR, des recherches sont conduites sur de nouvelles structures dégivrantes ou à température apaisée. Le contrôle opérationnel de telles structures requiert la mise au point de solutions de surveillance thermique *in-situ* à bas coût et robustes. La présente étude s'intéresse à l'évaluation et à l'amélioration de solutions d'instrumentation thermique pour du suivi long terme. L'utilisation de caméras infrarouges non-refroidies a fait l'objet de premiers travaux sur des structures ouvertes au trafic [5], avec des résultats prometteurs dans une optique de contrôle non destructif. Plus traditionnellement, des fibres optiques ou des thermocouples peuvent aussi permettre la surveillance thermique d'une infrastructure. Néanmoins, leur mise en oeuvre peut s'avérer complexe en phase de construction ou sur un site existant, avec une possibilité de rupture pendant l'exploitation. *A contrario*, la thermographie infrarouge permet une instrumentation *a priori* plus aisée et sans contact. Cependant, un tel contexte applicatif nécessite des mesures complémentaires afin de convertir en température les flux radiatifs (en niveaux numériques) mesurés par thermographie infrarouge. En effet, le calcul de la température va dépendre de paramètres spatiaux, météorologiques ainsi que des caractéristiques propres à l'objet observé. L'ensemble de ces paramètres

va engendrer un biais entre la donnée en température calculée et la valeur réelle. Ainsi, un système multi-capteur a été mis en place afin d'améliorer le processus de conversion des valeurs obtenues par thermographie infrarouge en température [4]. L'évolution des technologies, des moyens de calculs notamment par GPGPU et des moyens d'acquisition permettent alors la synchronisation et le couplage de ces données pour exploiter au mieux les mesures infrarouges. Toutefois, le positionnement de la caméra par rapport à la scène joue un rôle important dans le calcul final de la température. En effet, la projection de la scène 3D entraîne une résolution non constante sur l'image. Dans ce contexte nous étudions une méthode de redressement de l'image infrarouge intégrant une connaissance géométrique de la scène observée. Cette méthode est alors mise en oeuvre sur des données infrarouges acquises sur un site d'essais en extérieur. Une comparaison des mesures de température obtenues par thermographie infrarouge avec des mesures par thermocouples localisés en surface de la structure est alors proposée et analysée. Enfin, nous proposons une évaluation de l'écart entre les deux méthodes de mesure en régime dynamique.

2. Site d'essais et considérations sur l'instrumentation associée

Les mesures sont réalisées sur une section instrumentée d'une structure de transport en béton. Plusieurs thermocouples ont été intégrés à cœur lors de sa construction. Par la suite, d'autres thermocouples ont été collés en surface et une chaîne d'acquisition des valeurs mesurées par les thermocouples a été déployée sur site. En parallèle, un système de surveillance par thermographie infrarouge couplé à la mesure locale des paramètres météorologiques et des flux aux petites et grandes longueurs d'ondes a été mis en oeuvre sur cette même zone. L'ensemble des systèmes de mesure déployés sur site permet de réaliser des mesures sur plusieurs mois avec un échantillonnage temporel de l'ordre de la minute pour l'ensemble des capteurs (thermographie infrarouge, données environnementales, thermocouples).

Le flux reçu par la caméra thermique dépend à la fois des conditions environnementales lors de la mesure et des propriétés thermo-optiques de la scène de mesure [4, 8]. Par ailleurs, la mise en oeuvre sur le terrain d'une caméra infrarouge positionnée sur un mât de mesure conduit à un échantillonnage spatial non constant de la surface de la scène surveillée. Dans une telle configuration d'essai, le flux de rayonnement atténué par l'atmosphère dépend de la position du point de mesure dans la scène comme l'illustre la Figure 1.

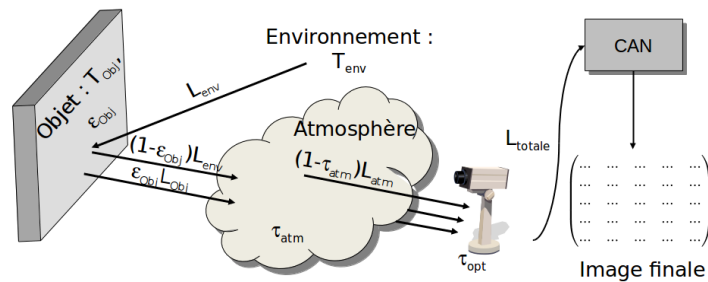


Figure 1: Illustration des différentes contributions radiatives reçues par la caméra infrarouge.

En première approche, on peut exprimer pour chaque point de l'image infrarouge la luminance L_{totale} suivant l'équation radiométrique simplifiée afin de remonter à la valeur du flux reçu par la caméra suivant l'expression couramment utilisée en thermographie infrarouge, à savoir pour chaque pixel du capteur matriciel suivant l'équation 1.

$$L_{totale} = \epsilon_{obj} L_{obj} \tau_{atm} \tau_{opt} + (1 - \epsilon_{obj}) L_{env} \tau_{atm} \tau_{opt} + (1 - \tau_{atm}) L_{atm} \tau_{opt} + L_{opt} (1 - \tau_{opt}) \quad (1)$$

On peut alors déduire de cette équation, l'expression de la contribution radiative propre de notre objet :

$$L_{obj} = \frac{L_{totale} - (1 - \epsilon_{obj})L_{env}\tau_{atm}\tau_{opt} - (1 - \tau_{atm})L_{atm}\tau_{opt} - L_{opt}(1 - \tau_{opt})}{\epsilon_{obj}\tau_{atm}\tau_{opt}} \quad (2)$$

Afin de tenir compte des variations des conditions environnementales au cours de la mesure, une station météo couplée au système infrarouge nous retourne les informations locales nécessaires au calcul des différentes quantités. Les valeurs de luminance réfléchies, optiques et atmosphériques sont obtenues à partir de l'injection de connaissances *a priori* des propriétés thermo-optiques des matériaux constitutifs de la scène, des composants du système infrarouge et des conditions atmosphériques. Par exemple, la valeur de la transmission atmosphérique τ_{atm} est recalculée en fonction du point de l'image, des conditions de température extérieure et de l'humidité relative. L'étalonnage préalable du système nous permet de remonter alors à une température fonction du niveau numérique associé à la luminance pour chaque pixel de l'image suivant l'équation 3.

$$T_{obj} = \frac{B}{\log\left(\frac{R}{L_{obj}}\right) + F} \quad (3)$$

où R , B , F , sont des constantes d'étalonnage. Finalement, en combinant alors l'équation 2 et l'équation 3, on peut exprimer la température de l'objet en fonction des valeurs mesurées.

L'équation 1 montre la forte interaction qui existe entre notre système mesure-objet et l'environnement. L'incertitude due à l'estimation des transmittances, de l'émissivité et des luminances atmosphériques influence de manière non négligeable le résultat final [1, 3]. Comme le montrent [13] dans leur simulation, le flux solaire, la température de ciel ou encore les précipitations sont autant de paramètres qui peuvent être source d'erreur lors de la conversion en température des mesures infrarouges.

Le positionnement de la caméra va aussi influencer le calcul de la température qui est fonction de l'angle et de la distance caméra-objet. La projection qui résulte de l'optique de la caméra entraîne une résolution variable sur l'image. D'autres facteurs spatiaux causent eux aussi des erreurs dans le calcul de la température. On peut notamment citer l'effet de pixels mélangés. En effet, dû à la discrétisation engendrée par la prise de vue, le flux collecté en un pixel peut correspondre à la projection d'une surface qui peut englober une combinaison de propriétés thermo-optiques de matériaux. L'impact sera alors fort sur l'approximation faite sur l'émissivité de l'objet en ce point [9].

Nous proposons dans la suite une méthode pour redresser l'image afin d'avoir un échantillonnage spatial à pas constant. L'objectif est d'extraire au mieux les données thermiques pour les comparer aux thermocouples.

3. Reconstruction spatiale des images infrarouges

La résolution de l'équation radiométrique simplifiée en tout point de l'image infrarouge requiert la connaissance de paramètres spatiaux liés à la configuration scène-capteur sur le site de mesure. Pour identifier les paramètres spatiaux en tout point de l'image infrarouge, une méthode de calibration a été étudiée et mise en œuvre pour les mesures effectuées sur site réel. Cette méthode utilise une transformation linéaire directe (Algorithme "Gold Standard") [7]. On définit la matrice de calibration M telle que pour tout couple $(x, X) \in \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^3$ de points associés entre le monde réel et l'image observée, on a :

$$x = MX \quad (4)$$

On peut exprimer la matrice M en coordonnées homogènes telle que :

$$M = \begin{pmatrix} f & s_k & c_x \\ 0 & af & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_3 & T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Ce système possédant 11 degrés de liberté, il est nécessaire de connaître *a priori* les coordonnées associées de 6 points pour pouvoir le résoudre. Ces 6 points seront alors normalisés tels que :

- Le barycentre des deux ensembles de points soit à l'origine du repère.
- Les points se trouvent en moyenne autour de la boule unité de leur espace en norme euclidienne.

On définit alors deux matrices de normalisation T et U :

$$\hat{X}_i = UX_i, \hat{x}_i = Vx_i \quad (6)$$

L'algorithme de Levenberg-Marquardt est ensuite utilisé afin de minimiser l'erreur géométrique (équation 7) [2, 11]. Une décomposition en valeurs singulières est préalablement calculée pour initialiser notre algorithme vers une solution "proche" de la solution recherchée.

$$\min \sum_{1 \leq i \leq N} d(\hat{x}_i, M\hat{X}_i) \quad (7)$$

Afin de minimiser cette erreur, la connaissance de la matrice jacobienne est nécessaire [10]. Nous optons pour le calcul de la solution analytique de cette matrice qui peut être obtenue à l'aide d'un logiciel de calcul formel. Nous présentons ici la forme non dérivée. Soient (X, Y, Z) et (su, sv, s) les points associés du monde réel et de l'image respectivement. On a d'après l'Equation 4 :

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

On calcule alors la matrice jacobienne pour l'algorithme de Levenberg-Marquardt :

$$J_M = \frac{\partial(\hat{u} - u, \hat{v} - v, 1 - s)}{\partial(f, a, c_x, c_y, s_k, t_x, t_y, t_z, w_x, w_y, w_z)} \quad (9)$$

où $T = (t_x, t_y, t_z)$ et (w_x, w_y, w_z) est obtenu par la formule de rotation de Rodrigues [6]. Les étapes de l'algorithme sont présentées Figure 2. On peut noter que la minimisation se fait sur trois composantes. En effet, la minimisation des composantes u et v est suffisante pour obtenir une estimation de la matrice. Cependant, ici nous forçons la minimisation par $s = 1$ (équation 10), ce qui a pour effet d'augmenter la contrainte sur le système et ainsi d'introduire une nouvelle composante à la matrice jacobienne dans le calcul.

$$\begin{aligned} 1 - s &= X \times \left(\frac{w_y \times \sin(\|W\|)}{\|W\|} + \frac{w_x \times w_z \times (\cos(\|W\|) - 1)}{\|W\|^2} \right) - t_z \\ &- Y \times \left(\frac{w_x \times \sin(\|W\|)}{\|W\|} - \frac{w_y \times w_z \times (\cos(\|W\|) - 1)}{\|W\|^2} \right) \\ &- Z \times \left(\frac{(\cos(\|W\|) - 1) \times (w_x^2 + w_y^2)}{\|W\|^2} + 1 \right) + 1 \end{aligned} \quad (10)$$

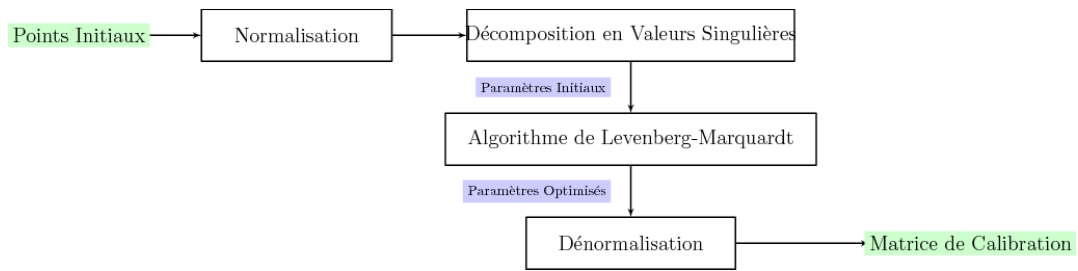


Figure 2: Algorithme de Calibration

Une fois calibrée, une carte des distances est calculée et pourra alors être injectée dans notre modèle de calcul de température (voir Figure 4a). Il est à noter que pour le moment la carte des distances n'intervient que dans le calcul de la transmittance atmosphérique. Toutefois, dans notre configuration d'essais, la carte des distances (12m au maximum) a peu d'influence sur la valeur de la transmission atmosphérique au regard de celle dûe aux variations des conditions environnementales (par exemple l'influence de l'évolution temporelle de l'humidité relative). La calibration permet aussi d'obtenir l'angle entre la caméra et l'objet (Figure 4b) défini par la Figure 3. De telles données nous permettent alors de redresser l'image afin d'extraire les profils thermiques et de les comparer aux valeurs locales des thermocouples implantés en surface.

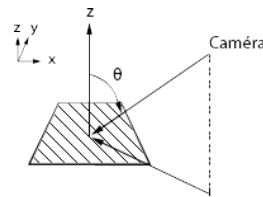


Figure 3: Angle entre l'objet et la caméra

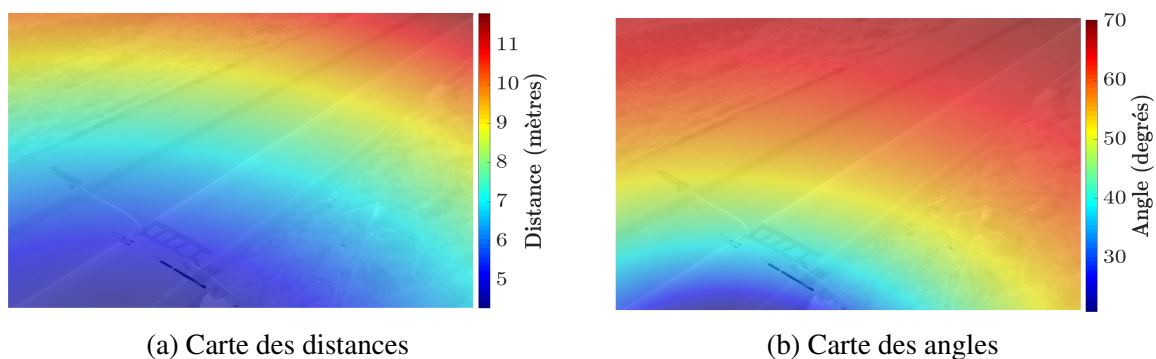


Figure 4: Valeurs issues de la calibration : distance et angle entre la caméra et l'objet observé.

4. Analyse des résultats

La Figure 5 présente une comparaison de deux signaux mesurés, par thermocouples localisés en surface et par extraction de données sur les images infrarouges redressées avec le modèle de calcul présenté au paragraphe 3. Après calibration, la position des thermocouples sur l'image permet d'extraire les valeurs de température sur la séquence d'images pour reformer le signal

thermique sur une période donnée. La Figure 5 montre ainsi l'évolution de la température pour les deux systèmes de mesure infrarouge et thermocouples. L'écart entre ces deux séries temporelles a été calculé en considérant la moyenne sur une courte fenêtre de temps, permettant ainsi de prendre en compte l'éventuelle déformation temporelle entre les deux modèles due à des différences de fréquences d'acquisition entre les deux systèmes utilisés. Si les deux signaux sont relativement proches (espérance de 0, 70°C et écart-type de 0, 69°C environ), l'écart n'est pas nul et peut être important sur des périodes de temps spécifiques (par exemple en présence d'hydrométéores non pris en considération dans la présente étude au niveau de la correction de mesure des images infrarouges).

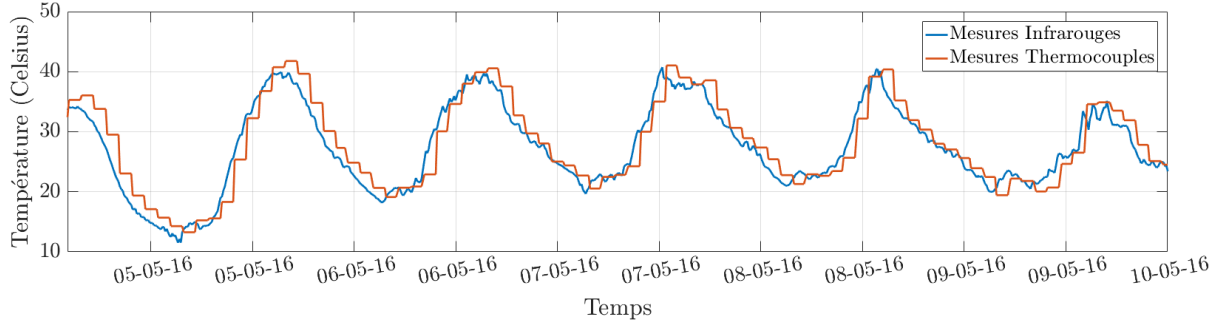


Figure 5: Mesures infrarouges comparées aux mesures thermocouples

Pour compléter cette première analyse temporelle et évaluer la robustesse de la mesure infrarouge, nous avons utilisé l'algorithme DTW (Dynamic Time Warping) [12]. Cet algorithme permet d'optimiser l'alignement de deux observations temporelles en minimisant la distance entre chacun de leurs points. La distance ainsi calculée donne une information sur la similitude des deux signaux. En calculant localement la distance DTW entre la mesure infrarouge et la mesure thermocouple, on peut ainsi voir l'impact des différentes conditions externes sur la mesure infrarouge. Pour conduire cette analyse nous considérons que la mesure thermocouple constitue notre référence pour nos comparaisons en certains points des images infrarouges

Pour ce faire, considérons deux observations $X = (x_i)$ et $Y = (y_j)$, $1 \leq i \leq N$, $1 \leq j \leq M$. On initialise alors une matrice dtw telle que :

$$dtw(i, j) = \begin{cases} \infty, & \text{si } i = 0 \text{ ou } j = 0 \\ 0, & \text{si } i = j = 0 \end{cases} \quad (11)$$

En définissant une fonction coût $c(x_i, y_j)$ la distance DTW est calculée en programmation dynamique avec l'équation 12.

$$dtw(i, j) = c(x_i, y_j) + \min_{\substack{1 < i \leq N \\ 1 < j \leq M \\ |i-j| < w}} \begin{cases} dtw(i-1, j-1) & \text{correspondance} \\ dtw(i-1, j) & \text{insertion} \\ dtw(i, j-1) & \text{suppression} \end{cases} \quad (12)$$

w représente la différence temporelle maximale qu'on tolère entre les deux signaux. Dans notre cas, nous avons calculé la distance DTW non pas sur l'ensemble des deux signaux mais en définissant une fenêtre glissante en chaque point. Nous avons défini une fenêtre d'observation de 6 heures et admis une désynchronisation maximale (w) de ± 2 heures. La distance euclidienne entre les deux signaux a été choisie comme fonction coût. Enfin, la valeur finale a été divisée par la taille de notre fenêtre d'observation afin d'obtenir une valeur "moyenne". Cette méthode nous permet ainsi de quantifier l'écart entre les systèmes de mesure sur une période donnée,

pour des conditions d'expérimentation proches. On observe alors que la similitude entre les deux mesures sera plus ou moins importante selon la période considérée (Figure 6). Les maxima observés sur ce graphe correspondent à des périodes pluvieuses, dont l'impact reste à prendre en considération dans le protocole de correction des mesures par thermographie infrarouge en extérieur.

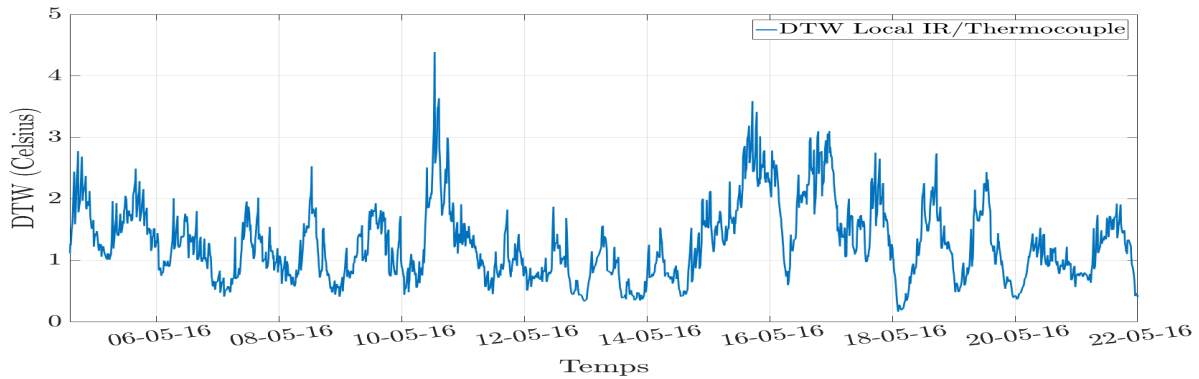


Figure 6: Comparaison par Dynamic Time Warping entre thermogramme infrarouge et le signal thermocouple associé.

Enfin, La Figure 7 montre le résultat de l'algorithme de redressement d'image, issu du logiciel que nous avons développé. L'image redressée avec un profil thermique sélectionné en bleu est montrée Figure 7b. La mesure infrarouge initiale est présentée Figure 7a.

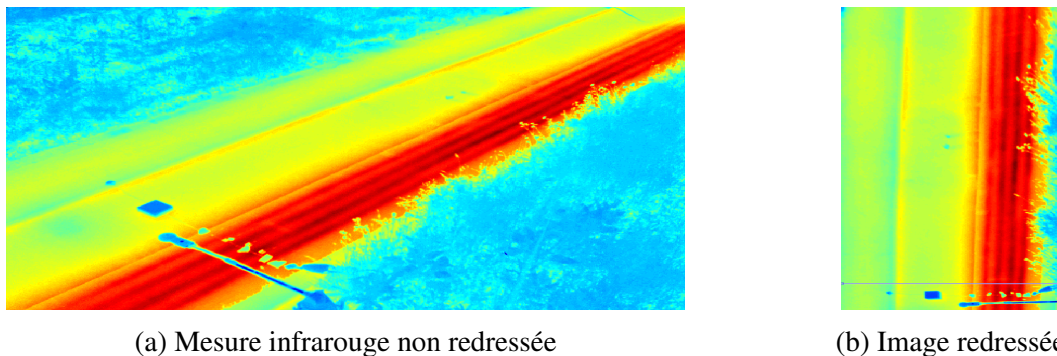


Figure 7: Résultat du redressement de l'image.

5. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans cette étude un modèle de conversion en température de niveaux numériques d'images infrarouges couplé à une méthode de redressement d'images. Les températures ainsi calculées ont été comparées à des valeurs issues de mesures par des thermocouples localisés en surface de la scène de mesure. Le redressement de l'image a permis d'extraire les profils thermiques d'intérêt et de corriger les erreurs de projection. Si des écarts existent entre les deux méthodes de mesure présentées, les résultats obtenus par thermographie infrarouge sont encourageants. Les caméras thermiques permettent ainsi de mesurer la température en de nombreux points de la scène, difficilement réalisable avec des thermocouples.

Les travaux conduits dans cette étude ont permis d'aborder des problèmes de surveillance thermique aux temps longs avec une résolution spatiale et temporelle différente de celle rencontrée pour les systèmes satellitaires ou aéroportés (changement d'échelle). Des améliorations à apporter au modèle de calcul que nous utilisons sont cependant possibles. En effet, notre expérimentation grandeur nature nous a permis de collecter et de synchroniser de nombreuses

données, thermiques, météorologiques et solaires. L'exploitation de ces données se poursuit et devrait nous permettre de raffiner notre modèle de calcul afin de mieux prendre en considération les différentes conditions météorologiques observées.

Références

- [1] Y. May Chang. An Investigation Into The Factors Affecting Infrared Temperature Measurements For Building Applications. SPIE, 780(Thermosense IX) :11–18, 1987.
- [2] Edwin K. P. Chong and Stanislaw H. Zak. An Introduction to Optimization. Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey, 4th edition edition, February 2013.
- [3] K. Chrzanowski. Influence of measurement conditions and system parameters on accuracy of remote temperature measurement with dualspectral IR systems. Infrared Physics & Technology, (37) :295–306, 1996.
- [4] Jean Dumoulin and Vincent Boucher. Infrared thermography system for transport infrastructures survey with inline local atmospheric parameter measurements and offline model for radiation attenuation evaluations. Journal of Applied Remote Sensing, 8(1) :084978–084978, 2014.
- [5] Jean Dumoulin, Antoine Crinière, and Rodolphe Averty. The detection and thermal characterization of the inner structure of the ‘Musmeci’ bridge deck by infrared thermography monitoring. Journal of Geophysics and Engineering, 10(6) :064003, December 2013.
- [6] Jay P. Fillmore. A note on rotation matrices. IEEE Computer Graphics and Applications, 4(2) :30–33, 1984.
- [7] Richard Hartley and Andrew Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York, 2 edition edition, April 2004.
- [8] J.R. Howell, R. Siegel, and M.P. Pinar. Thermal Radiation Heat Transfer. CRC Press, 5th edition, 2010.
- [9] Hamlyn Jones and Xavier Sirault. Scaling of Thermal Images at Different Spatial Resolution : The Mixed Pixel Problem. Agronomy, 4(3) :380–396, July 2014.
- [10] Donald W. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2) :431–441, 1963.
- [11] J.C. Pérez Muñoz, C.A. Ortiz Alarcón, A.F Osorio, C.E Mejía, and R. Medina. Environmental applications of camera images calibrated by means of the Levenberg–Marquardt method. Computers & Geosciences, 51 :74–82, February 2013.
- [12] Diego F. Silva and Gustavo EAPA Batista. Speeding up all-pairwise dynamic time warping matrix calculation. In Proceedings of the 2016 SIAM International Conference on Data Mining, pages 837–845. SIAM, 2016.
- [13] Sven Van De Vijver, Marijke Steeman, Nathan Van Den Bossche, Kim Carbonez, and Arnold Janssens. The influence of environmental parameters on the thermographic analysis of the building envelope. In 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 2014), 2014.