



Sujet de thèse Institut Clément Ader Albi

Titre du sujet	Thermoréfectométrie polychromatique du proche à l'infrarouge court pour la mesure de champs de température sur des matériaux texturés et de géométrie complexe
Responsables	Directeur : Yannick Le Maoult - Professeur Lemaoult@mines-albi.fr 05 63 49 33 39 Co-directeur : Thierry Sentenac – Maître Assistant HDR sentenac@mines-albi.fr 05 63 49 30 61
Laboratoire	Institut Clément Ader (ICA, CNRS UMR 5312) groupes MICS

Ecole doctorale : MEGeP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés

Mots clés : Propriétés radiatives, mesures thermiques, thermographie, réflectivité.

Résumé : La mesure de champs de températures sans contact basée sur l'analyse de la luminance de la scène observée avec une caméra, implique la résolution de l'équation radiométrique qui relève, même dans le cas le plus simple, de deux inconnues: la température de luminance et l'émissivité. La thermoréfectométrie proche infrarouge bichromatique, développée dans le projet ANR « Real Time True Temperature », résout cette équation par la mesure, simultanée et in-situ, du champ de température de luminance, par thermographie classique, et du champ d'émissivité par une méthode de réflectométrie spécifique. En effet, la mesure « classique » indirecte de l'émissivité par réflectométrie demande la mesure de la réflectivité directionnelle-hémisphérique. La méthode retenue mesure la seule réflectivité bidirectionnelle et la réflectivité directionnelle hémisphérique est déduite à travers un modèle, appelé le facteur de diffusion. Le modèle le plus simple suppose une homothétie de la fonction de distribution des réflectivités bidirectionnelles à deux longueurs d'onde. Cette modélisation permet des mesures de champs de températures dans une gamme de 600°C à 1000°C et sur des matériaux plutôt spéculaires et de forme plane placée perpendiculairement au plan de la caméra. L'objectif de la thèse est d'étendre la gamme de mesure de température de 200°C à 1000°C et d'aborder des matériaux texturés avec différentes rugosités (éventuellement proches des longueurs d'onde d'observation) et de forme concave. Ces objectifs impliquent une modélisation du facteur de diffusion plus générale capable de considérer les comportements des matériaux texturés sur la large gamme de longueur d'onde et la géométrie de la pièce observée. Cette modélisation prendra en compte les indices optiques du milieu, qui dépendent de la température et de la longueur d'onde, la rugosité de surface et les angles d'observation. Cette modélisation entrainera la conception d'un thermoréfectomètre à plusieurs longueurs d'onde afin de résoudre le nouveau système formé.

Description du sujet :

- Contexte scientifique

Dans de nombreux domaines comme le nucléaire [Reichle09], l'aéronautique [Lempereur08] ou le solaire [Balat02], le diagnostic thermique des réacteurs ou des moteurs est un enjeu important. Un diagnostic thermique basé sur la mesure de champs de températures sans contact à partir de caméras présente de nombreux avantages. Il ne demande pas d'instrumentation préalable et il introduit peu ou pas de perturbations des échanges thermiques. Il est donc faiblement intrusif et se prête bien à des mesures in-situ. De plus, le champ de températures peut être mesuré avec une résolution temporelle de quelques millisecondes. Cette performance autorise des mesures en ligne et sur des scènes dynamiques ou des objets en mouvement. Ensuite, cette mesure de champs peut être obtenue avec une large gamme des résolutions spatiales, sur des surfaces de quelques millimètres carrés à quelques mètres carrés. Enfin, des résolutions thermiques de quelques 100mK sur une large gamme de températures sont envisageables. Cependant cette mesure de champ de température sans contact, basée sur l'analyse de la luminance de la scène observée avec une caméra, se heurte, depuis le début du XXème siècle, à la résolution de l'équation radiométrique qui relève, même dans le cas le plus simple, de deux inconnues: la température de luminance et l'émissivité. La détermination de la température de surface, dite vraie, demande donc la connaissance de ces deux grandeurs physiques.

Dans le cadre de la mesure de champs (en opposition aux mesures ponctuelles), la première classe de méthode exploite des longueurs d'onde particulières pour lesquelles le comportement de l'émissivité est remarquable. Pour les matériaux diélectriques, il existe une longueur d'onde, dite de Christiansen, pour laquelle l'émissivité est unitaire. Pour les matériaux métalliques, à la longueur, dite du point χ « Chi », l'émissivité est indépendante de la température. La seule mesure de température de luminance, par thermographie monochromatique [Rousseau05, Teodorescu07], conduit à une détermination directe du champ de température vraie. Cependant, ces méthodes relativement « théoriques » ne sont réellement efficaces que dans le cas de matériaux purs sans altération de l'état de surface. Pour les hautes températures, est également répertoriée la thermographie dans le domaine spectral ultra-violet [Pierre:2008] qui diminue l'impact de l'erreur commise sur l'émissivité sur l'erreur de la température vraie. La deuxième classe de méthode consiste à formuler une hypothèse sur l'évolution de l'émissivité en fonction de la longueur d'onde et résout l'équation radiométrique à plusieurs longueurs d'onde à travers une méthode appelée thermographie polychromatique. Le modèle le plus simple est de supposer que le rapport des émissivités à deux longueurs d'onde est connu et constant. La thermographie bi-chromatique [Meriaudeau07] réalise la mesure de champ de température à deux longueurs d'onde et résout l'équation radiométrique à ces deux longueurs d'onde. Pour des matériaux avec des variations d'état de surface, la thermographie polychromatique [Simmons05] introduit un modèle d'évolution de l'émissivité en fonction de la longueur d'onde à N-1 paramètres. Les mesures de températures de luminance réalisées à N longueurs d'onde permettent d'estimer les N-1 paramètres du modèle de l'émissivité et la température vraie. Il est cependant difficile d'appréhender une mesure sur des scènes avec des comportements hétérogènes de l'émissivité : une scène composée d'un matériau diélectrique et/ou métallique ; ou une croissance d'une couche d'oxyde non homogène spatialement.

L'approche requise en contexte de mesure dynamique avec une évolution hétérogène de l'émissivité avec la température et l'état de surface de l'objet mesuré, repose sur une mesure, simultanée et in-situ, de l'émissivité et de la température de luminance. La méthode dite de « thermorélectométrie bichromatique », proposée dans la thèse [Gilblas12], repose sur une mesure simultanée du champ de température de luminance, par la méthode de thermographie classique, et du champ d'émissivité par une méthode de réflectométrie spécifique. Les deux mesures sont réalisées à deux longueurs d'onde.

La mesure indirecte de l'émissivité par réflectométrie requiert la mesure de la réflectivité directionnelle-hémisphérique, c'est-à-dire la mesure du rayonnement réfléchi dans toutes les directions de l'hémisphère. L'originalité de la méthode réside dans la mesure de la seule réflectivité bidirectionnelle, c'est-à-dire dans une seule direction, et le calcul la réflectivité directionnelle hémisphérique à travers un modèle. Pour la thermoréflectométrie bichromatique, ce modèle, appelé facteur de diffusion, suppose une homothétie de la forme de la réflexion à différentes longueurs d'onde. Ainsi, l'équation radiométrique à résoudre comporte deux inconnues qui sont le facteur de diffusion et la température vraie. Elle peut donc être résolue par une mesure de la température de luminance et de la réflectivité bidirectionnelle, à deux longueurs d'onde. Cette modélisation suppose que les matériaux sont optiquement opaques et elle présente des limitations pour des matériaux avec une rugosité moyenne qui est de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde. De plus, ce modèle ne considère pas les orientations entre la pièce et la caméra et donc la géométrie de la pièce. Les pièces mesurées sont donc supposées planes. Enfin, le domaine spectral de fonctionnement de la thermoréflectométrie actuelle est le proche infrarouge. La température minimale détectable est donc au-dessus de 600°C. Cette gamme de mesure ne permet pas d'aborder des procédés d'élaboration mettant en oeuvre des matériaux polymères, composites ou métalliques à basse température.

- **Objectifs de la thèse**

La limitation actuelle en terme de gamme de température de la thermoréflectométrie bichromatique proche infrarouge peut être dépassée par un élargissement de la gamme spectrale de fonctionnement vers l'infrarouge court. Les avancées technologiques récentes (diodes laser IR entre 3 et 4 μm) sont une réelle opportunité pour adresser des températures plus faibles (200-500°C). Cependant, la mesure des réflectivités bidirectionnelles pour des écarts entre longueurs d'onde plus importants dans la bande infrarouge implique une modélisation plus avancée et physique du facteur de diffusion. Ces avancées seront de plusieurs ordres. La première est la prise en compte des possibles changements de la « Bidirectional Reflectivity Distribution Function » (BRDF) entre les longueurs d'onde de mesure. La deuxième correspond à l'intégration de la rugosité du matériau pour considérer les matériaux diffus. La troisième relève de la prise en compte de l'angle d'observation entre la pièce et la caméra. Enfin, l'estimation d'un nombre plus important de paramètres du modèle du facteur de diffusion engendre l'augmentation du nombre de mesure à différentes longueurs d'onde.

L'objectif de la thèse est donc de proposer un modèle du facteur de diffusion physique en s'appuyant sur une étude approfondie des propriétés radiatives et notamment de la BRDF en fonction des indices optiques du matériau, qui dépendent de la température et de la longueur d'onde, de la rugosité de surface et des angles d'observation. Cette thèse présente donc un objectif majeur qui est la conception d'une nouvelle méthode de thermoréflectométrie à plusieurs longueurs d'onde, appelée thermoréflectométrie polychromatique.

- **Plan de travail**

La thèse débutera par une étude bibliographique pour identifier les modèles d'émissivité et de réflectivité et des mesures à froid sur des échantillons tests (céramiques, aciers réfractaires, etc.). Le résultat attendu est une première modélisation du facteur de diffusion représentant les comportements des matériaux céramiques et métalliques oxydés.

L'étape suivante reposera sur une simulation de la méthode de thermoréflectométrie pour évaluer l'apport du modèle du facteur de diffusion plus évolué et pour appréhender le temps et la méthode de résolution d'un système multi-longueurs d'onde.

En parallèle, seront menées des mesures à chaud des propriétés radiatives sur des moyens expérimentaux en cours de développement.

La thèse se poursuivra par la conception et le développement complet d'un nouveau prototype de thermoréflectomètre. Enfin, ce dernier devra être évalué en termes de gain en précision de mesure sur

des matériaux fortement oxydés et des diélectriques. Inhérent au développement de nouvelles méthodes de mesures, la comparaison avec des méthodes mesures de référence, valides dans des situations précises, conclura la thèse.

Les contributions attendues sont donc un système de mesure de thermorélectométrie polychromatiques associé à un modèle physique de réflexion approprié validé sur des moyens expérimentaux novateurs.

- **Contexte de la thèse**

Ce travail amont s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut Clément Ader et le laboratoire PROCédés, Matériaux et Energie Solaire.

Compétences requises du candidat :

Le candidat devra posséder un diplôme du second cycle (master ou ingénieur) en sciences de l'ingénieur avec une forte composante en thermique et instrumentation (optique). La connaissance des bases de la thermographie infrarouge serait très appréciée. La possession d'un master de recherche et d'un stage de fin d'études dans un centre recherche seraient des plus indéniables. Le candidat devra montrer un goût prononcé pour l'expérimentation. Suivant la volonté du candidat, un séjour de recherche à l'étranger pourra être envisagé.

Contacts :

- Yannick Le Maout - ICA-A - Ecole des Mines d'Albi-Carmaux
Groupe Métrologie, Identification et Contrôle des Systèmes (MICS)
Mines Albi - Route de Teillet _ 81 013 Albi
Tel. : 05 63 49 33 39 - Email: Yannick.lemaout@mines-albi.fr

- Thierry SENTENAC - ICA-A - Ecole des Mines d'Albi-Carmaux
Groupe Métrologie, Identification et Contrôle des Systèmes (MICS)
Mines Albi - Route de Teillet _ 81 013 Albi
Tel.: 05 63 49 30 61 - Email: sentenac@mines-albi.fr

- Rémi Gilblas - ICA-A - Ecole des Mines d'Albi-Carmaux
Mines Albi -Route de Teillet _ 81 013 Albi
Tel.: 05 63 49 31 57 - Email: rgilblas@mines-albi.fr

Références:

[Reichle09], "Concept and development of ITER divertor thermography diagnostic", Journal of Nuclear Materials,2009.

[Lempereur08], Lempereur C. ; Andral, R. et Prudhomme J.Y., "Surface temperature measurement on engine components by means of irreversible thermal coatings, Measurement Science and Technology,2008.

[Balat02], Balat-Pichelin M.; Hernandez D. Olalde G.; Rivoire B. et Robert J.F., "Concentrated solar energy as a diagnostic tool to study materials under extreme conditions", American Society of Mechanical Engineers, 2002.

[Pierre:2008], Pierre T.; Remy B. et Degiovanni A., « Microscale temperature measurement by the multispectral and statistic method in the ultraviolet-visible wavelengths », Journal of Applied Physics, 2008.

[Meriaudeau07], Meriaudeau, F., "Real time multispectral high temperature measurement: Application to control in the industry, Image and Vision Computing, 2007.

[Simmons05], Simmons D. F.; Fortgang C. M. et Holtkamp D. B.,

« Using multispectral imaging to measure temperature profiles and emissivity of large thermionic dispenser cathodes, Review of Scientific Instruments, 2005.

[Gilblas12], Gilblas, R., « Mesure de champs de températures vraies par thermoréfectométrie proche infrarouge », Thèse de l'Université de Toulouse, 2012.

[Phong75], Phong B. T., « Illumination for computer generated pictures », Commun. ACM, 1975.

[Cook81], Cook R. et Torrance K. « [A reflectance model for computer graphics](#) » Computer Graphics (SIGGRAPH '81 Proceedings), Vol. 15, No. 3, July 1981, pp. 301–316.

[Rousseau05], B. Rousseau, J.F. Brun, D. Meneses DeSousa, P. Echegut, "Temperature Measurement: Christiansen Wavelength and Blackbody Reference", International Journal of Thermophysics, V. 26, N. 4, P. 1277-1286, 2005.

[Teodorescu07], G. Teodorescu, "radiative emissivity of metals and oxidized metals at high temperature", PhD thesis, Auburn university, 2007