

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE

Groupes : « Thermographie »

Journée thématique organisée par :
Laurent Ibos (CERTES/UPEC), Jean Dumoulin (COSYS/ UGE)

16 octobre 2025

Accueil à partir de 9h30 à
FIAP, 30 rue Cabanis, Paris 14 - Métro Glacière

« Avancées technologique sur les capteurs, standardisation, estimation de paramètres d'intérêt (température, flux, émissivité, ...) à partir d'images thermiques »

Résumé de la Journée : Les applications de la thermographie infrarouge à la mesure de températures de surface ou de flux sont de plus en plus nombreuses. Elles s'accompagnent de progrès sur la technologie des capteurs et leur intégration dans des boîtiers de caméras avec des capacités de calcul plus ou moins importantes. Toutefois, la détermination précise d'une température de surface et de l'incertitude de mesure associée à partir de la luminance mesurée par une caméra, se heurte toujours au double problème de la connaissance de l'émissivité de la surface (paramètre dépendant de nombreux facteurs) d'une part et de l'influence de l'environnement (rayonnement des surfaces voisines et contribution de l'atmosphère) d'autre part. Cette journée sera organisée autour de communications orales courtes (15-20 minutes) et une large place sera consacrée aux échanges entre les participants. Quelques présentations pourront également être effectuées sous forme de posters. Les communications pourront concerner tous les sujets pour lesquels on souhaite obtenir une carte de températures ou de flux à partir d'une image thermique ou d'une séquence d'images voire les travaux conduits au niveau des capteurs et imageurs thermiques. Une attention particulière devra être accordée à l'estimation des biais et des incertitudes de mesure. Par ailleurs, ces communications pourront concerner des travaux finalisés ou bien en cours de développement.

Contacts : Laurent Ibos (ibos@u-pec.fr), Jean Dumoulin (jean.dumoulin@univ-eiffel.fr)

BULLETIN D'INSCRIPTION à envoyer impérativement par mail à : sft-journees-contact@orange.fr

Aucune réservation ne sera faite sans retour de ce document.

L'inscription est considérée comme acquise et comme due dès lors du renvoi de ce bulletin qui tient lieu de **DEVIS**.

Nom : Prénom :
Organisme :
Adresse :
Courriel :

Désire s'inscrire à la **journée d'étude SFT du 16 octobre 2025** en tant que : (cocher la case correspondante)

- Conférencier : 50 €
 Membre SFT à titre individuel : 85 €
 Membre adhérent à la SFT par l'appartenance à une société adhérente : 140 €
 (Cachet de la société adhérente) :
 Non-membre de la SFT : 180 €

(Le prix signalé inclut le repas de midi qui est organisé sur place, les pauses et l'accès aux documents)

Avec le mode de règlement suivant : (cocher la case correspondante)

- Par chèque à l'ordre " Société Française de Thermique" à envoyer à :
Pierre MILLAN Journées SFT 62, avenue des Pyrénées – 31280 MONS
 (Une facture acquittée sera retournée par mail à l'adresse mentionnée sur ce bulletin d'inscription)
 Par bon de commande qui vous sera adressé par ma société (**uniquement par mail**).

Date : Signature :

NOTA : Le repas ne peut être garanti qu'aux personnes s'inscrivant au moins 15 jours avant la rencontre

Programme de la journée

Résumés des communications disponibles à la suite de ce programme

9h30 : Accueil/café

- 10h00 - 10h05 : Introduction de la journée (Jean Dumoulin et Laurent Ibos)
- 10h05 - 10h45 : **Laurent Dussopt** et **Maher Hamdi**, CEA LETI, « Capteurs intégrés et systèmes pour l'imagerie infrarouge thermique multispectrale »
- 10h45 - 11h10 : Présentations flash des posters (3 minutes max /poster)

Poster 1 : **Samuel Maillard**, SAFRAN Composites, « Normalisation des essais CND par Thermographie infrarouge »,

Poster 2 : **Thibaud Toullier, Nathanaël Gey, Mathias Malandain, Jean Dumoulin**, Univ. Gustave Eiffel, Inria, COSYS,I4S Team « DAM2 - A Scalable and Compliant Solution for Managing enriched Infrared images as FAIR Research Data »

Poster 3 : **Boualem Merainani, Thibaud Toullier, Jean Dumoulin**, Univ. Gustave Eiffel, Inria, COSYS, I4S Team, « Détection et suivi de boîtes d'essieux par thermographie infrarouge »

Poster 4 : **Théo Chavatte**, Univ. Bordeaux, I2M, « Banc de calibration pour mesurer des températures absolues par caméra infrarouge et mesures d'émissivité »

Poster 5 : **Célia Sanz**, Univ. Bordeaux, I2M, « Multi-scale thermophysical property mapping of Ceramic Matrix Composites »

Poster 6 : **Ludovic Gavérina**, ONERA – DMAS, « Le flying spot à l'ONERA : de la modélisation physique à l'intelligence artificielle »

Poster 7 : **Tanguy Davin, Julie Vacandare, Lanhui Lin, Ahmed Ben Hassana, Mouldi Ben Azzouna, Fabrice Barbe, Vieille Benoit**, Groupe de physique des matériaux (GPM) – INSA Rouen, Mécanique des matériaux, « Caractérisation de flux et de températures pour les matériaux composites et inertes soumis à une flamme kérosène ».

Poster 8 : **Florian Crouau**, Univ. Bordeaux, I2M, « Imagerie thermique super-résolue par méthode de compressive sensing »

11h10 - 11h40 : Pause et discussion autour des posters

- 11h40 - 12h10 : **Jean-Claude Krapez**, ONERA – DOTA, « Multiwavelength thermometry without a priori emissivity information: from promise to disillusionment »
- 12h10 - 12h30 : **Kamal Ennass, Benjamin Remy, Johann Meulemans, Vincent Schick**, Univ. de Lorraine, CNRS, LEMTA, « Imagerie hyperspectrale FT-IR pour la thermographie de surfaces à haute température via la séparation température–émissivité »

12h30 - 14h00 : Repas

- 14h00 - 14h20 : **Stéphane Chevalier et al.**, Univ. Bordeaux, I2M, « Mesure de température au sein des matériaux : du CND vers la tomographie thermique super résolue »
- 14h20 - 14h40 : **Thomas Pierre, Helcio R. B. Orlando, Philippe Le Masson, Édouard Geslain, Coline Bourgès, Julien Bergeras Pierre**, « Estimation simultanée des conductivités de matériaux orthotropes par thermographie - Premiers tests »
- 14h40 - 15h00 : **Jonathan Gaspar, Fabrice Rigollet, Estelle Romulus, Jean-Laurent Gardarein**, Univ. Aix Marseille, IUSTI, « Problématiques de thermographie IR quantitative en Tokamak : un panorama »

15h - 15h40 : Pause et discussion autour des posters

- 15h40 - 16h00 : **Jean-Pierre Monchau**, Themacs Ingénierie, « Mesure d'émissivité dans le domaine des températures cryogéniques »
- 16h00 - 16h20 : **Jean-Nicolas Frouart, Samuel Maillard**, SAFRAN Composites, « Première approche de caractérisation des caméras IR en vue d'une calibration spécifique aux applications CND »

16h20 - 16h40 : Discussion et synthèse de la journée avec prospective basée sur les exposés précédents et ouvertures sur de nouvelles problématiques

Résumés des Communications

- 10h05 - 10h45 : **Laurent Dussopt et Maher Hamdi**, CEA LETI, « Capteurs intégrés et systèmes pour l'imagerie infrarouge thermique multispectrale »

Résumé : L'imagerie multispectrale en gamme infrarouge thermique permet de distinguer finement les signatures spectrales présentes dans la scène, améliorant la précision de mesure de la température, la détection de matériaux, ou révélant des défauts ou processus invisibles en imagerie classique. Elle enrichit la thermographie en révélant des contrastes spécifiques liés à l'émissivité ou à la composition chimique. Les caméras infrarouges multispectrales actuelles utilisent des imageurs large bande classiques auxquels sont ajoutés des filtres externes; elles souffrent de limitations importantes en termes de coût, d'encombrement ou de vitesse. Le CEA développe des capteurs intégrés capables à terme de répondre à ces limitations et étudient également leur mise en œuvre dans des systèmes de thermographie absolue. Cette présentation donnera un état des lieux des travaux en cours et de ses perspectives.

- 11h40 - 12h10 : **Jean-Claude Krapez**, ONERA – DOTA, « Multiwavelength thermometry without a priori emissivity information: from promise to disillusionment »

Résumé : Infrared (IR) thermography provides 2D radiance maps of the IR radiation leaving the surfaces of a scene, based on preliminary calibration. Then, to convert radiance maps into temperature maps, we need to know the emissivity of each element of the scene conjugated to each of the detector elements in the camera's focal plane. Compared to the single band approach, multispectral thermography gives useful insight for detecting anomalies showing distinct spectral signatures, e.g. to detect gas leaks or assess air or water pollution. In addition to that, can spatially distributed multispectral information help solve the inverse temperature-emissivity separation problem? Multiwavelength thermometry (MWT) is known to be an underdetermined problem having a continuous infinity of solutions. For this reason, and right from the origin of MWT, it appeared necessary to introduce information on emissivity to assess temperature, for example, by means of an analytical model. Overlooking these recommendations, a number of papers appeared in the early 2000s exploring the idea that we could do without any a priori knowledge of emissivity. Growth became exponential from 2020 onward, with the allegedly successful application of neural networks, genetic algorithms, and other novel optimization methods. The aim of the present work is to recall the consequences of MWT as an underdetermined inverse problem, to highlight the errors made by ignoring them, and to bring us back to harsh reality: we must introduce information on emissivity in order to evaluate temperature accurately. Furthermore, this information has to be fully consistent with the true spectral emissivity. To this end, we propose a new method for optimal selection of the emissivity model. A series of blind tests was set up to benchmark different inversion algorithms. The results confirm the failure of the temperature-emissivity separation when no emissivity information is available, despite the multiwavelength approach, which in any case comes as no surprise.

- 12h10 - 12h30 : **Kamal Ennass, Benjamin Remy, Johann Meulemans, Vincent Schick**, Univ. de Lorraine, CNRS, LEMTA, « Imagerie hyperspectrale FT-IR pour la thermographie de surfaces à haute température via la séparation température–émissivité »

Résumé : Dans les environnements industriels à haute température (800–1200 K), le contrôle précis de la température est un enjeu clé pour la maîtrise des procédés de transformation et la qualité des produits. Les capteurs de contact, intrusifs et peu fiables à ces températures, s'avèrent inadaptés pour les matériaux en mouvement (fibres, vitrages, bains de verre, céramiques, laminaires). Les méthodes optiques offrent une alternative prometteuse, mais leur précision reste limitée par la méconnaissance des propriétés optiques du matériau, en particulier l'émissivité (surfaces opaques) et l'émittance (milieux semi-transparents). Cette étude propose une approche de thermographie infrarouge basée sur l'imagerie hyperspectrale par transformée de Fourier, couplée à une technique d'inversion déterministe de type moindres carrés. Pour les

matériaux opaques, des simulations Monte Carlo et des validations expérimentales avec la caméra Hyper-Cam (Telops, résolution spectrale jusqu'à 1 cm^{-1} sur $1.5\text{--}5.1\ \mu\text{m}$) et un four à induction montrent que la modélisation de l'émissivité spectrale sur une base de polynômes d'éléments finis P1-1D régularise efficacement le problème inverse, permettant l'estimation simultanée de l'émissivité et de la température avec des erreurs relatives $< 3\%$ pour différents niveaux de température et d'oxydation.

Pour les milieux semi-transparents absorbants-émetteurs non diffusants, des simulations préliminaires sur du verre plat mettent en évidence, lors d'une modélisation du profil interne de température par une fonction linéaire par morceaux, des incertitudes d'interpolation inférieures à $1.6\% \pm 4.3\%$.

- 14h00 - 14h20 : **Stéphane Chevalier et al.**, Univ. Bordeaux, I2M, « Mesure de température au sein des matériaux : du CND vers la tomographie thermique super résolue »

Résumé : L'imagerie infrarouge (IR) est développée au sein de l'équipe imagerie et caractérisation thermique (ICT) de l'I2M depuis plus d'une vingtaine d'année. L'équipe de recherche a mis en place plusieurs méthodologies actives (chauffage local) basées sur le champ de température relatif pour l'identification de défauts (fissure, délaminage...) et de propriétés thermiques locales anisotropes (diffusivité) au sein de matériaux opaques. Plus récemment, de nouveaux travaux ont ouvert à la voie vers la mesure de température absolue à la surface de milieux hétérogènes grâce à des bancs de calibration où il est possible de prendre en compte l'ensemble du chemin optique ainsi que la mesure d'émissivité sur la plage spectrale de la caméra. Associé à cela, un travail important au sein de l'équipe est actuellement mené pour améliorer à la fois la résolution spatiale des caméras, jusqu'à $5\mu\text{m}/\text{px}$ en adaptant des algorithmes de super résolution utilisés dans l'optique visible, et pousser nos méthodes vers la tomographie thermique dans des matériaux semi-transparent.

Lors de cette journée, ces différents travaux en cours et achevés seront présentés, avec un focus à la fois sur la méthodologie mais aussi sur les applications. Nous discuterons - entre autres - du CND temps réel qui peut être effectué lors de la fabrication additive grâce à l'imagerie thermique, de la mesure de champs de température et de masse dans des puces microfluidiques (semi-transparentes) ainsi que la reconstruction 3D d'une trace thermique laser dans un matériau diélectrique.

- 14h20 - 14h40 : **Thomas Pierre (intervenant), Helcio R. B. Orlando, Philippe Le Masson, Édouard Geslain, Coline Bourgès, Julien Bergeras Pierre**, « Estimation simultanée des conductivités de matériaux orthotropes par thermographie - Premiers tests »

Résumé : Les premiers résultats de cette étude concerne l'estimation, à partir de données simulées, des trois composantes de la conductivité thermique d'un parallélépipède solide orthotrope chauffé par laser. Expérimentalement une seule caméra infrarouge est utilisée pour l'observation simultanée de quatre de ses faces. La température de la surface chauffée est utilisée comme condition limite, tandis que celles des trois autres surfaces sont utilisées pour la résolution d'un problème inverse de type bayésien. Une transformation intégrale est appliquée sur les données expérimentales utilisées pour l'analyse inverse, en utilisant les valeurs propres liées au problème de conduction thermique original. Peu de modes transformés sont utilisés pour la résolution du problème inverse, compressant ainsi spatialement les données fournies par la caméra infrarouge.

- 14h40 - 15h00 : **Jonathan Gaspar, Fabrice Rigollet, Estelle Romulus, Jean-Laurent Gardarein**, Univ. Aix Marseille, IUSTI, « Problématiques de thermographie IR quantitative en Tokamak : un panorama »

Résumé : Nous présenterons les différents défis que constitue la thermographie quantitative en Tokamak (machine de fusion thermonucléaire qui confine un plasma chaud au cœur d'une chambre toroïdale en tungstène), aussi bien pour des raisons de protection de la machine que pour aider à la compréhension de l'interaction plasma paroi : forts gradients de température (entre 70°C et 1000°C sur quelques centimètres typiquement), faible émissivité, réflexions multiples dans l'enceinte, altération des propriétés radiatives des matériaux. Les aspects expérimentaux seront présentés mais également les approches de modélisation de cette scène radiative complexe imagée par une caméra infrarouge.

- 15h40 - 16h00 : **Jean-Pierre Monchau**, Themacs Ingénierie, « Mesure d'émissivité dans le domaine des températures cryogéniques »

Résumé : De la température ambiante aux températures cryogénique, dans de nombreux cas d'études où les dispositifs sont sous vide, les seuls échanges thermiques en présence sont des échanges radiatifs. Ainsi, il est important de connaître la valeur de l'émissivité avec bonne précision afin de pouvoir contrôler ces échanges radiatifs. Un dispositif original a été développé afin de pouvoir mesurer ce paramètre jusqu'à des températures de 20K.

- 16h00 - 16h20 : **Jean-Nicolas Frouart, Samuel Maillard**, SAFRAN Composites, « Première approche de caractérisation des caméras IR en vue d'une calibration spécifique aux applications CND »

Résumé : A ce jour, les différents fournisseurs de caméra IR commercialisent leurs produits, quel que soit leur domaine d'utilisation, selon des spécifications répondant aux applications de mesure de température. Dans le cas des applications de Contrôle Non Destructif par Thermographie Infrarouge, les utilisateurs choisissent leur caméra sur la base de critères souvent arbitraires (plage de longueur d'onde, fréquence d'acquisition, gamme de température, champ de vue) sans avoir forcément le recul nécessaire en fonction de l'application cible. De plus, les caméras sont généralement fournies avec des calibrations en température qui ne sont que très rarement exploitées en CND. Le suivi dans le temps des caméras IR passe généralement par une maintenance chez le fournisseur qui fait quelques vérifications des composants, met à jour les tables de NUC, la liste des « bad pixels » et les calibrations selon ses propres règles. L'utilisation croissante des caméras IR pour du contrôle en production/maintenance nécessite aujourd'hui de déterminer les règles de calibration en accord avec le besoin industriel. Cette présentation vise à exposer les travaux en cours pour suivre les caméras IR utilisées chez Safran, en vue de déployer une méthodologie interne et pourquoi pas tendre vers une norme spécifique.