



SOCIETE FRANÇAISE DE THERMIQUE

*Groupes «Mesures En Thermique et Techniques Inverses» et
« Thermographie Infrarouge »*

Problèmes Inverses de Champs : Apports et Limitations de la Thermographie Infrarouge

- Journée du lundi 26 mars 2007 -

Contacts :

C. Le Niliot, IUSTI, Marseille, 04 91 10 68 86, christophe.leniliot@polytech.univ-mrs.fr

O. Fudym (RAPSODEE), EMAC, Albi, 05 63 49 30 24, fudym@enstimac.fr

Secrétariat SFT

ENSEM – BP 160 – 54504 Vandoeuvre Cedex (fax :03 83 59 55 44)

SOMMAIRE

Propriétés thermophysiques

Identification de la diffusivité thermique d'un cylindre tournant soumis à un flux de chaleur localisé, JC. Batsale¹, JP. Lasserre², M. Varenne-Pellegrini², L. Authesserre², V. Desormiere², ⁽¹⁾TREFLE – ENSAM Bordeaux, ⁽²⁾CEA-CESTA.

Identification de propriétés thermophysiques par inversion dans l'espace de Hankel, D. Legaie, H. Pron et C. Bissieux, UTAP Reims.

Mesure de la conductivité thermique à haute température de l'UO₂ solide et liquide par thermographie infrarouge, B. Remy¹, A. Degiovanni¹ et D. Staicu², ⁽¹⁾LEMNTA Nancy, ⁽²⁾ITU Karlsruhe.

Cartographies de propriétés thermophysiques, stratégies modales et nodales, applications, JC Batsale¹, M. Bamford¹, J. Toutain¹, C. Pradere¹, A. Kusiak¹, O. Fudym², ⁽¹⁾TREFLE Bordeaux, ⁽²⁾RAPSODEE Albi.

Estimation de sources en thermomécanique

Méthode de reconstruction de champ de source thermique 2D par imagerie IR, N. Renault, S. André, C. Cunat, LEMNTA Nancy.

Analyse thermographique des champs de sources en fatigue des matériaux, A. Chrysochoos, B. Berthel, B. Watrresse, LMGC Montpellier

Estimation de sources et de flux

Interprétation des images infrarouges appliquée à la surveillance des composants face au plasma du tokamak Tore Supra, S. Carpentier¹, J-L. Gardarein¹, G. Dunand¹, Y. Corre¹, C. Le Niliot², F. Rigollet², J-M. Travère¹, ⁽¹⁾CEA Cadarache, ⁽²⁾IUSTI Marseille.

Résolution de problèmes inverses instationnaires de conduction de la chaleur à partir d'observations par thermographie infrarouge, P. Reulet, P. Millan, ONERA/CERT Toulouse.

Paramètres d'interface

Thermographie infrarouge et conduction inverse: estimation d'une source surfacique de chauffage par induction, A. Ouattara, M. Lebouche, M. Gradeck, D. Maillet, LEMNTA Nancy.

Estimation de distributions de résistance thermique à la liaison d'éléments d'assemblage électronique par thermographie infrarouge, V. Feuillet^{1,2}, Y. Jarny¹, Y. Scudeller², ⁽¹⁾LTN, ⁽²⁾LGMPA, Nantes.

Détermination de coefficient d'échange convectif sur plaque mince par thermographie infrarouge, D. Bougeard, Douai.

Identification de la diffusivité thermique d'un cylindre tournant soumis à un flux de chaleur localisé

J.-C. BATSALE*, J.-P. LASSERRE**, M. VARENNE-PELLEGRINI**, L. AUTHESSERRE**, V. DESORMIERE**, J. TOUTAIN*

* TREFLE-ENSAM, UMR 8508, Esplanade des Arts et Métiers, 33400 Talence

** CEA/CESTA, BP 2, 33114 LE BARP Cedex

Ce travail concerne l'identification de la répartition spatiale du flux radiatif impulsionnel appliqué localement à la surface externe d'un cylindre en rotation. Le principe de l'expérience consiste à solliciter le cylindre avec une lampe flash et à analyser sa réponse en température par thermographie infrarouge. Si les propriétés thermophysiques du matériau constituant le cylindre sont connues, le traitement de la réponse en température donne accès à la distribution initiale de température qui est elle-même fonction de la distribution initiale du flux appliqué.

Estimation de la diffusivité :

La réponse en température du cylindre à une sollicitation impulsionnelle est traitée théoriquement par un modèle analytique. L'évolution temporelle théorique de la température moyennée suivant la génératrice d'un cylindre en acier (moyennage d'une colonne de pixel) est représentée sur la figure 1. Le signal contient en particulier des informations relatives à la vitesse de rotation du cylindre (fréquence des pics) et à la diffusion de la chaleur dans la direction circonférentielle (amortissement des pics). Le traitement des données s'effectue en deux temps. Après avoir estimé la vitesse de rotation du cylindre, on peut superposer le champ de température circonférentiel aux différentes périodes. La diffusivité thermique peut alors être déduite de la pente de $\text{Ln}(\theta(\alpha_n, t) / \theta(\alpha_n, 0))$ en fonction du temps où $\theta(\alpha_n, t)$ représente la transformée de Fourier de la température selon la direction circonférentielle du cylindre :

$$\text{Ln}(\theta(\alpha_n, t) / \theta(\alpha_n, 0)) = -a \alpha_n^2 t$$

La principale difficulté expérimentale vient du fait que le cylindre est soumis à d'autres sources de chaleur que le flash (émission résiduelle de la source, réflexions de l'environnement). Ceci se traduit par une modification de la ligne de base du signal qui croît au lieu de rester constante (figure 2). On s'affranchit de ces perturbations à la fois en améliorant le dispositif expérimental et en effectuant un traitement numérique de la ligne de base.

L'estimation de la diffusivité thermique d'un cylindre en acier obtenue ainsi par cette méthode diffère de 5 % de la valeur mesurée par une méthode plus standard telle que la méthode flash.

Estimation de la distribution initiale de température :

L'identification de la fréquence de rotation et celle de la diffusivité étant acquises, une étude ultérieure permettra d'identifier la distribution spatiale du flux initialement appliqué.

L'intérêt des méthodes basées sur une transformation de Fourier spatiale réside dans le fait que pour une excitation flash, on peut séparer les problèmes de transfert de chaleur tridimensionnel en trois problèmes monodimensionnels transitoires. On présentera les avantages et certains aspects de ce type de méthode.

References

- [1] D.MAILLET, S. ANDRE, J.C.BATSALE, A.DEGIOVANNI, C. MOYNE: Thermal quadrupoles- Solving the heat equation through integral transforms - J. Wiley Editor- Chichester - 2000, 270 pages, chap 5 (2000)
- [2] I.PHILIPPI, J.C.BATSALE, D.MAILLET, A.DEGIOVANNI, 1995 - Measurement of thermal diffusivity through processing of infrared images - Rev. Sci. Instrum. 66(1) pp182-192
- [2] I.PHILIPPI, J.C.BATSALE, A.DEGIOVANNI, Mesure de diffusivité thermique par méthode flash - Application à la caractérisation de plaque en mouvement, *SFT1994* (Paris, 17-19 mai 1994)

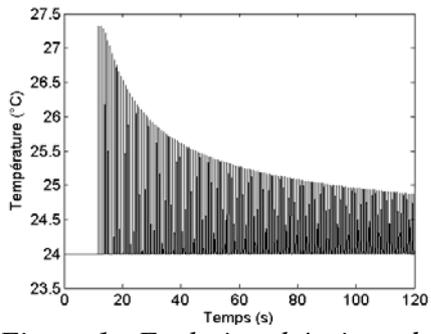


Figure 1 : Evolution théorique de la température en fonction du temps

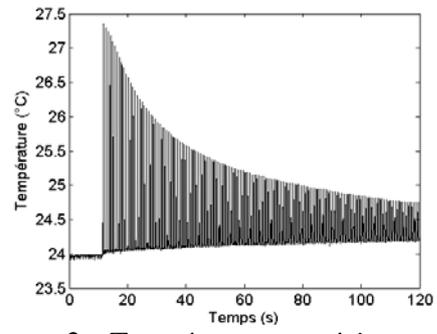


Figure 2 : Température expérimentale en fonction du temps (moyennage des pixels selon la génératrice)

Identification de propriétés thermophysiques par inversion dans l'espace de Hankel

Damien LEGAIE*, Hervé PRON et Christian BISSIEUX

Université de Reims Champagne-Ardenne, Unité de Thermique et Analyse Physique (EA 3802),
Laboratoire de Thermophysique (URCA/UTAP/LTP). (* damien.legaie@univ-reims.fr)

Résumé :

La thermographie infrarouge appliquée aux métaux nécessite l'application d'une couche de revêtement émissif, le plus souvent une fine couche de peinture noire. La technique développée a pour but d'améliorer la précision de l'identification des propriétés thermophysiques de ces revêtements, en vue de l'identification ultérieure des propriétés thermophysiques des métaux par thermographie infrarouge sous excitation laser modulée.

Lors de ce type de mesures par thermographie infrarouge photothermique, il est courant d'utiliser un profil radial de la température complexe, le plus souvent un profil de phase, pour réaliser une estimation de paramètres. Cependant, il nous est apparu que la réponse thermique n'était pas toujours parfaitement de révolution et que le choix d'un profil devenait alors arbitraire, entraînant des biais importants sur la grandeur estimée. Pour résoudre ce problème, nous présentons une méthode utilisant toute la carte thermique. Mais alors, dans l'espace réel, le nombre très important de données fait qu'il est souvent difficile, et toujours fastidieux, de réaliser l'inversion des matrices nécessaires à la procédure d'identification par les moindres carrés.

La méthode proposée consiste à réaliser l'estimation dans l'espace de la transformée utilisée par le modèle direct. Nous présentons donc une étude de l'estimation dans l'espace de Hankel de la conductivité thermique d'un revêtement de peinture noire sur un substrat en acier inox. Cette identification s'appuie à la fois sur un modèle direct bidimensionnel axisymétrique par transformation de Hankel et sur la transformée discrète du même type réalisée à partir de la totalité de la carte des parties réelles et imaginaires, telle que fournie par la détection synchrone.

Avant d'effectuer la transformée discrète, un traitement préalable sur ces cartes est néanmoins nécessaire, consistant d'abord à déterminer le centroïde de la carte des amplitudes. Dans un deuxième temps, un algorithme est lancé afin de replacer chaque pixel en fonction du rayon, soit de sa distance par rapport au centroïde. Enfin, les valeurs calculées par le modèle direct en fonction de la fréquence spatiale et celles de la transformée discrète ont été normées afin de travailler sur des ordres de grandeur plus favorables à l'estimation du paramètre recherché.

Cette méthode d'identification dans l'espace des fréquences spatiales semble particulièrement bien adaptée aux cartes thermiques fournies par les caméras matricielles de thermographie infrarouge. Toutefois, notre exploitation est jusqu'ici restée brute, sans correction des effets de l'échantillonnage et du fenêtrage dans l'espace direct, lesquels ont pour conséquences respectives des phénomènes de repliement et de convolution dans l'espace réciproque. En contrepartie, le bruit haute fréquence est parfaitement filtré.

Mesure de la conductivité thermique à haute température de l'UO₂ solide et liquide par thermographie infrarouge

B. REMY⁽¹⁾, A. DEGIOVANNI⁽¹⁾ et D. STAICU⁽²⁾

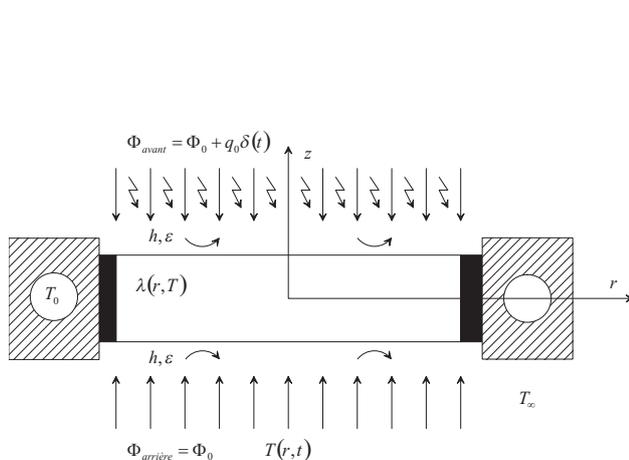
1) Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) UMR CNRS 7563, INPL-ENSEM, UHP 02, avenue de la Forêt de Haye - B.P 160, 54 516 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

2) European Commission, Joint Research Centre, Institute for Transuranium Elements (ITU) 76 125 Karlsruhe, Germany

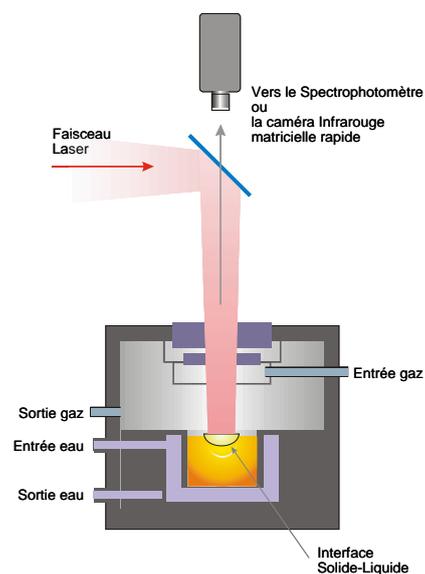
La mesure de la conductivité thermique du dioxyde d'Uranium liquide est une propriété thermique mal connue. Dans la littérature, nous pouvons trouver des valeurs comprises entre 1 et 11 W.m⁻¹.K⁻¹. Ces grandes différences s'expliquent principalement par la difficulté des mesures (la température de fusion est relativement haute $T_f = 3120\text{K}$) et la nature particulière du matériau. La connaissance de cette grandeur est importante pour améliorer la compréhension des mesures faites in-situ et la simulation des réacteurs en conditions extrêmes.

Un dispositif de mesure (Polaris II) en régime permanent est en cours de réalisation à l'I.T.U pour la mesure des propriétés du liquide. Le principe de l'expérience consiste à garder en présence deux phases dans le matériau (solide et liquide) durant l'expérience et à utiliser le solide comme fluxmètre. Pour cette mesure, les propriétés du solide doivent être connues. C'est l'objet du dispositif Polaris I. Le principe de cette dernière expérience repose sur le principe de la méthode Flash. Pour réduire le nombre et la durée des expériences, ce qui est particulièrement intéressant lorsque l'on travaille sur des matériaux radioactifs, l'échantillon est soumis à un gradient de température aussi proche que possible des conditions réelles d'utilisation du matériau, ce qui permet de remonter par une seule expérience à la conductivité thermique du solide en fonction de la température.

Ces deux expériences sont réalisées en utilisant la thermographie infrarouge. La mesure d'un champ thermique au lieu d'une mesure de température locale ou moyenne a rendu possible ce type de mesure.



Polaris I : mesure de la conductivité du solide



Polaris II : mesure de la conductivité du liquide

Références :

International Workshop on Thermo-Physical Properties of Materials Paris, 16-17 October 2006
Measurement of the Thermal Conductivity of Liquid UO₂ by Transient and Steady-State Methods
B. Remy and A. Degiovanni, D. Staicu, M. Sheindlin and C. Ronchi

Cartographies de propriétés thermophysiques, stratégies modales et nodales, applications

M. Bamford*, JC Batsale*, J. Toutain*, C. Pradere*, A kusiak*, O Fudym**,
* TREFLE-ENSAM, UMR 8508, Esplanade des Arts et Métiers, 33400 Talence
** RAPSODEE-EMAC, UMR 2392, Campus Jarlard, 81013 Albi

L'étude de milieux complexes tels que les cellules vivantes ou les matériaux composites par le biais de la thermique est en plein essor notamment grâce aux meilleures résolutions spatiale et temporelle des caméras infrarouges. Cependant la non uniformité de tels milieux nécessite une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques locales.

Dans la littérature, la caractérisation de propriétés thermophysiques locales par le traitement de séquences infrarouges en régime transitoire se fait principalement par une approche nodale [1] basée sur l'implémentation d'un schéma aux différences finies et l'inversion locale d'une matrice de sensibilité. Les problèmes classiques liés à l'estimation de paramètres tels que le manque de sensibilité ou les perturbations causées par le bruit de mesure se posent alors à chaque pixel. De plus, le grand nombre d'inversions à réaliser augmente le temps de calcul qui devient un sujet sensible.

Nous proposons ici plusieurs nouvelles approches pour l'estimation locale de paramètres thermophysiques, classées en deux sous catégories :

Des approches modales basées sur la projection des données brutes sur une base orthogonale et sur l'étude des modes résultants. Cette démarche s'inspire de la décomposition en série de Fourier du signal local pratiquée par Krapez [2], les transformations orthogonales utilisées sont la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) [3,4], et la décomposition en Ondelettes de type « Daubechies 1 » [4]. Les inversions sont effectuées dans les espaces résultants où l'essentiel de l'information est contenue dans un nombre limité de modes prépondérants et où l'influence du bruit est moindre. Chaque mode correspondant à une échelle d'observation différente, il devient possible de faire varier cette échelle d'étude et de caractériser le niveau d'homogénéisation du matériau ou à l'inverse la taille caractéristique et la position de ses hétérogénéités.

Puis une approche nodale [4] basée sur l'étude de la covariance des différentes dérivées partielles du champ de températures. Elle permet une analyse de sensibilité en temps et en espace pour localiser avant estimation les domaines temporels et spatiaux où le bruit est moindre et la sensibilité maximale. Cette analyse de sensibilité peut également servir à restreindre l'intervalle d'étude de l'analyse modale. De plus un critère de troncation est calculé après estimation et sans connaître le bruit de mesure pour discriminer les zones où les estimations sont pertinentes des zones non exploitables.

Ces approches sont calibrées en utilisant les données simulées d'un phénomène de diffusion longitudinale 1D sur un matériau hétérogène après une excitation « flash » non uniforme, à partir desquelles on estime un profil de diffusivités thermiques locales $a(x)$ (m^2/s). Ces méthodes sont ensuite appliquées à l'étude de matériaux composites SiC_f/SiC sous contrainte, pour déterminer d'éventuelles zones d'endommagement avant la rupture (référence [2] et figures (1-4)), elles sont également utilisées pour étudier les transferts thermiques dans des cellules d'oignon lors de la congélation (référence [5] et figures 5 et 6).

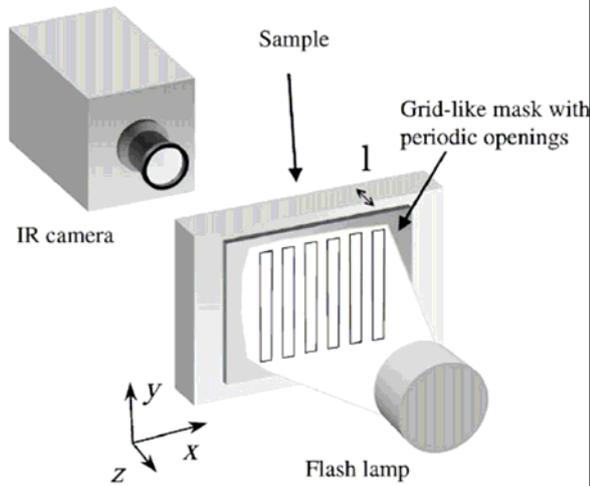


Figure 1 : Dispositif expérimental du « flash » avec grille tel que décrit par Krapez [2]

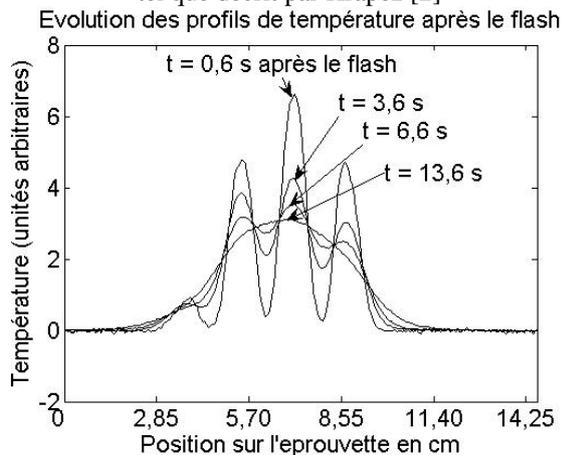


Figure 3 : Evolution des profils de température en face arrière

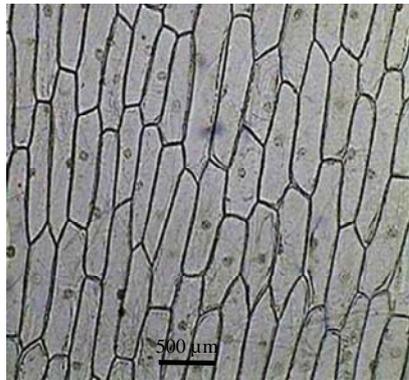


Figure 5 : Image au microscope visible d'un épiderme d'oignon

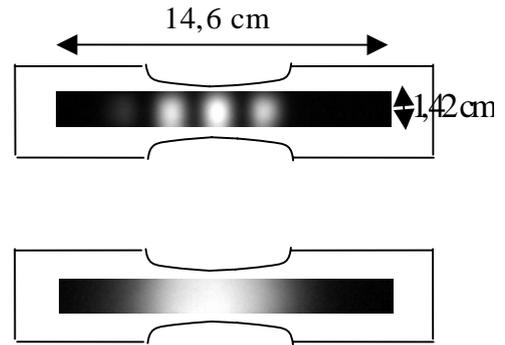


Figure 2 : Images infrarouges face arrière de l'éprouvette après le flash

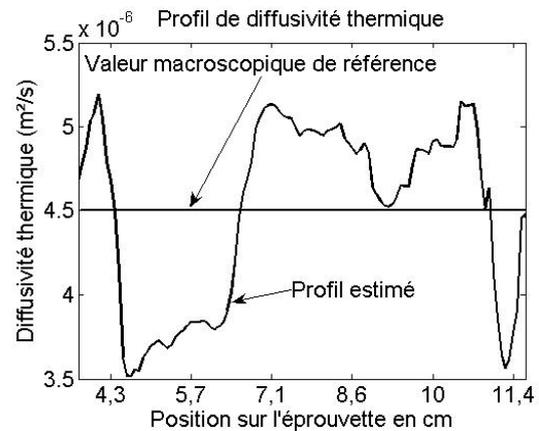


Figure 4 : Profil de diffusivités de l'éprouvette mesuré par la méthode nodale

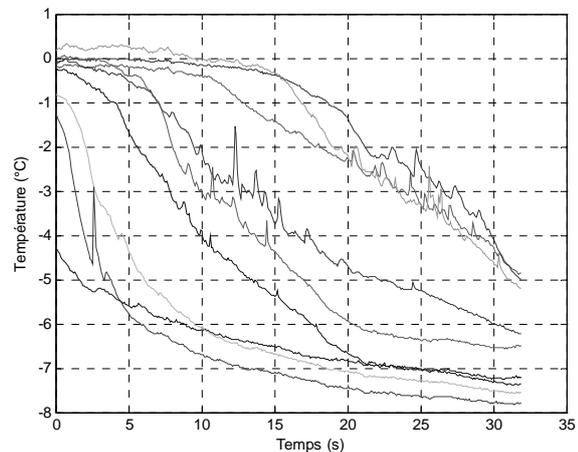


Figure 6 : Evolution de la température de certaines cellules pendant la congélation de l'épiderme

Références

- [1] J.C. Batsale, J.L. Battaglia, O. Fudym, *Autoregressive algorithms and spatially random flash excitation for 3D non destructive evaluation with infrared cameras*. QIRT Journal 1 5-20, 2004.
- [2] Krapez J.C., Spagnolo L., Frieß M., Maier H.P., Neuer G., *Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography*, International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 967–977
- [3] Bamford M., Batsale J.C., Fudym O., *Différentes stratégies pour l'estimation de profils de diffusivités thermiques d'une éprouvette composite SiC/SiC après un flash*, Congrès français de thermique, SFT 2007, les Embiez, 29 mai – 1^{er} juin, à paraître
- [4] Bamford M., Batsale J.C., Fudym O., *Singular value decomposition of infrared image sequences. Application to thermal diffusivity profile estimation after a "flash" excitation*, Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Miami, Florida, U.S.A., April 16-18, 2007, à paraître
- [5] Pradère C., Bamford M., Batsale J.C., *Analyse de pelure d'oignons par thermographie infrarouge*, Congrès français de thermique, SFT 2007, les Embiez, 29 mai – 1^{er} juin, à paraître

Identification de sources de chaleur d'origine thermomécaniques : Présentation de deux méthodes d'estimation et de résultats expérimentaux.

Norbert Renault, Stéphane André, Christian Cunat.

LEMETA-CNRS UMR 7563

Nancy Université,

2,avenue de la Forêt de Haye,

BP160 – 54504 Vandoeuvre Les-Nancy

Norbert.Renault@inpl-nancy.fr, Stephane.Andre@inpl-nancy.fr, Christian.Cunat@inpl-nancy.fr

Dans une perspective de caractérisation thermomécanique des matériaux, nous présentons deux solutions au problème inverse de reconstruction de sources de chaleur à partir d'un film IR 2D.

La première méthode est basée sur l'écriture formelle d'une fonctionnelle 'coût' (un Lagrangien) composée de trois termes : une norme moindres-carrés pour l'écart modèle-expérience sur les champs de température, une contrainte exprimant le respect de l'équation de la chaleur (spécification du modèle), un terme de régularisation. Le traitement numérique de ce Lagrangien passe par une discrétisation type différences finies qui permet d'aboutir à une formulation matricielle classique (problème linéaire) à la différence de ce que l'on attend d'une formulation adjointe. Le caractère mal posé du problème nécessite une régularisation que nous avons basé sur l'introduction, comme information à priori, de la source identifiée préalablement sans régularisation et moyennée sur le domaine. Nous montrons alors que le coefficient de régularisation peut se déterminer optimalement selon le principe de la L-Curve. A partir de simulation éléments finis de transfert thermique 2D, avec sources hétérogènes (localisées), conditions aux limites variables, et ajout d'un bruit corrupteur des données, nous pouvons analyser la qualité de la reconstruction.

La seconde stratégie d'inversion porte sur l'utilisation des transformées intégrales pour la formulation d'une solution directe du problème sur une base modale, premier facteur régularisant, suivi d'une formulation discrète en temps s'appuyant sur la technique des temps futurs de Beck, seconde procédure régularisante. Les résultats obtenus sont identiques à la première méthode.

Enfin, nous appliquons notre algorithme à une situation expérimentale réelle : l'essai de traction à vitesse de déformation imposée constante grâce à un système d'extensométrie vidéo (Vidéotraction). Le matériau considéré est le Polyéthylène Haute Densité. Nous discuterons des difficultés qui viennent s'ajouter par rapport à la simulation de l'inversion et présenterons des résultats.

Analyse thermographique des champs de sources en fatigue des matériaux

A. Chrysochoos, B. Berthel, , B. Wattrisse

*LMGC - UMR 5508, Université MONTPELLIER II, CC 048 Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier cedex 5, Téléphone : 0467143436, Télécopie : 0467144792*

Depuis plusieurs années de nombreuses équipes de recherche ont misé sur les mesures d'auto-échauffement pour développer des méthodes de détermination rapide de la limite de fatigue. L'évolution de la température n'étant pas intrinsèque au matériau, nous avons choisi de travailler en terme de sources de chaleur plutôt qu'en terme de température.

Nous présentons ici une méthode directe de détermination des sources de chaleur accompagnant la fatigue et s'appuyant sur la mesure de champs de température obtenus à l'aide d'une caméra infrarouge. Ces sources de chaleur peuvent avoir, au moins, deux origines. Les premières sont induites par la thermodilatabilité du matériau et correspondent au couplage thermoélastique. Les secondes entraînent des échauffements de nature dissipative associés aux transformations microstructurales irréversibles. La difficulté majeure du traitement d'images pour estimer séparément ces deux types de sources vient du fait que l'amplitude des sources thermoélastiques est le plus souvent très grande devant la puissance moyenne dissipée durant un cycle (rapport souvent entre 100 et 1000).

Du point de vue expérimental, les amplitudes des sources thermoélastiques estimées sont en bon accord avec ce que prévoit la théorie thermoélastique linéaire et isotrope. Pour un niveau de chargement donné, des distributions spatialement hétérogènes mais temporellement constantes de la dissipation moyenne par cycle ont été mises en évidence. L'analyse calorimétrique montre encore que cette dissipation évolue de façon linéaire en fonction de la fréquence de sollicitation pour un niveau de charge donné et ce quelle que soit la zone étudiée. Il a enfin été montré que ces effets dissipatifs hétérogènes sont bien associés aux caractéristiques locales du matériau.

Interprétation des images infrarouges appliquée à la surveillance des composants face au plasma du tokamak Tore Supra

S. Carpentier^{1*}, J-L. Gardarein¹, G. Dunand¹, Y. Corre¹, C. Le Niliot², F. Rigollet², J-M. Travère¹

¹CEA Cadarache, F-13108 St-Paul-Lez-Durance, France

²Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, I.U.S.T.I, UMR CNRS N°6595, Technopôle de Château Gombert, 5 Rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France

* (auteur correspondant : sophie.carpentier@cea.fr)

Résumé -

La surveillance infrarouge des composants face au plasma du tokamak Tore Supra est un outil de sécurité essentiel. L'intégrité de la machine n'est en effet assurée que si la température et le flux de chaleur reçu par ces éléments de paroi, activement refroidis, ne dépassent pas des valeurs seuils à partir desquelles ils subissent des dommages irréversibles. La présence de dépôts carbonés plus ou moins adhérents dans certaines zones de la machine complique cependant l'estimation du flux incident réel. Ces dépôts peuvent en effet chauffer extrêmement rapidement et plus intensément que le substrat, même si les flux reçus sont très faibles. On présente ici une méthode de reconnaissance de forme appliquée au principal composant face au plasma de Tore Supra, le Limiteur Pompé Toroïdal. Ce dernier est l'élément majeur d'interaction avec le plasma et constitue le plancher du tokamak. Le procédé de traitement d'images utilisé ici (warping puis labellisation de l'image infrarouge du composant) a pour objectif de distinguer les pixels associés aux zones propres de ceux situés dans les zones recouvertes de dépôts. Cette différenciation permettra ensuite d'appliquer un calcul de flux incident adapté à chaque cas. La méthode utilisée est basée sur la théorie des systèmes linéaires qui permet d'exprimer les flux déposés sur le Limiteur comme le résultat de la déconvolution linéaire 1D des températures de surface infrarouges avec la réponse impulsionnelle du système. La réponse du composant varie suivant son état de surface (présence ou non d'une couche de dépôts), elle sera calculée par la méthode des quadripôles thermiques, bien adaptée à ce problème puisqu'elle permet de modéliser simplement des matériaux multicouches.

Résolution de problèmes inverses instationnaires de conduction de la chaleur à partir d'observations par thermographie infrarouge

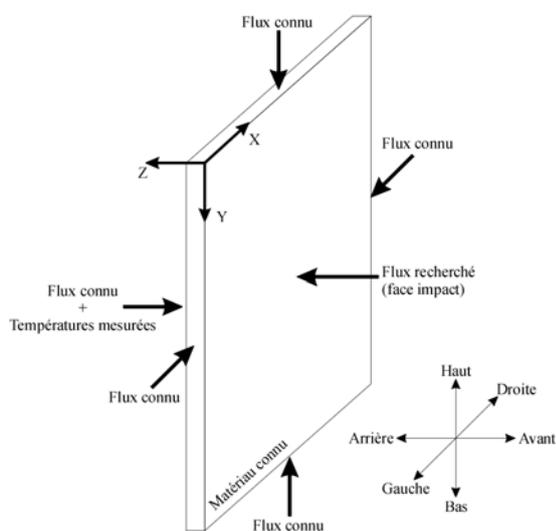
Philippe REULET (Philippe.Reulet@oncert.fr), Pierre MILLAN (Pierre.Millan@oncert.fr)

Résumé

Une méthode inverse de conduction de la chaleur a été développée à l'ONERA depuis de nombreuses années pour identifier les flux de chaleur pariétaux et les températures dans des situations où la mesure directe est impossible [1]. Cette méthode est basée sur la résolution de l'équation de la chaleur dans la paroi soumise au flux inconnu sur sa face avant, et l'utilisation de mesures de température par thermographie infrarouge sur la face arrière non exposée (Figure 1). Le logiciel développé THIDES (Thermal Inverse DESign) intègre aussi bien le calcul direct que la méthode inverse proprement dite [2].

La méthode de résolution inverse utilise la méthode séquentielle de Beck pour minimiser la fonctionnelle représentant l'écart entre les températures mesurées et les températures calculées par le modèle direct. Afin de réduire le nombre d'inconnues recherchées (cartographie $N_x \times N_y$ pour chaque pas de temps), la méthode développée utilise les capacités de la TCD (Transformée en Cosinus Discrète) à extraire les modes de plus grande énergie d'une cartographie 2D et à filtrer les données en éliminant les composantes en dessous d'un seuil fixé par le bruit de mesure. Ainsi à chaque pas de temps, la cartographie de flux inconnue est identifiée à partir d'un nombre réduit de composantes sélectionnées d'après les mesures de température en face arrière.

Cette méthode a été utilisée dans de nombreux domaines : impacts de jets supersoniques chauds, impact de flamme sur paroi [3], flux de chaleur sur maquette en écoulement hypersonique [4].



Propriétés du code

- tridimensionnel
- instationnaire
- plaque épaisseur constante, plane / courbe
- non linéaire (propriétés fonction de la température)

Entrées

- propriétés matériau isotrope / orthotrope
- nombre de pas de temps futurs
- températures mesurées face arrière
- modes identifiés par DCT
- condition aux limite face arrière

Sorties

- cartographies flux faces avant / arrière
- cartographies température faces avant / arrière

Figure 1 : Configuration géométrique de la méthode inverse (code THIDES)

- [1] D. NORTERSHAUSER, "Études des échanges pariétaux en présence des écoulements réactifs à l'aide d'une technique inverse", Thèse SUPAERO, Novembre 2000.
- [2] P. REULET, P. MILLAN, "Resolution of three-dimensional unsteady linear and non linear inverse problems using infrared observations", Eurotherm Winter School, METTI 2005, Aussois, 16-21 Janvier 2005.
- [3] R. LOUBAT, P. REULET, B. ESTEBE, P. MILLAN, "Heat flux characterisation in hot jet and flame/wall interaction by IHCP resolution coupled with infrared measurements", QIRT Journal, Vol.1, n°2, pp. 205-228, 2004.
- [4] A. HOORNAERT, C. PELISSIER, Y. LE SANT, F. THIVET, P. MILLAN, "On-Ground Validation of Rear-Face Thermography to Measure Surface Heat Fluxes in Hypersonic Flows", Fourth International Symposium Atmospheric Reentry Vehicles and Systems, Arcachon, Mars 2005.

Thermographie infrarouge et conduction inverse : estimation d'une source surfacique de chauffage par induction.

A. Ouattara, D. Maillet, M. Gradeck, M. Lebouché
LEMTA – CNRS – INPL - UHP Nancy 1

Le refroidissement de surfaces métalliques portées à haute température (500-600°C) par un jet d'eau impactant (ébullition convective) ou par un spray permet l'extraction de flux très élevés, de l'ordre de 10^6 à 10^7 Wm^{-2} . Ce type de refroidissement joue un rôle important en métallurgie car la vitesse de refroidissement conditionne la cristallisation du produit sidérurgique et détermine par conséquent ses propriétés mécaniques.

Il en est de même dans les chambres de combustion où le spray de combustible impactant les parois est responsable du refroidissement et donc du niveau de température de fonctionnement. La compréhension des phénomènes d'ébullition fait intervenir des couplages fluide/solide complexes qui requièrent donc des expérimentations soignées.

Notre problème est celui de l'estimation de la source surfacique lors du chauffage par induction d'un disque en Nickel grâce à une mesure par thermographie infrarouge du champ de température. Il s'agit là d'un problème de conduction inverse appliquée en régime transitoire.

Nous avons effectué des simulations à basse température en 2D transitoire en utilisant deux approches :

- la première approche dans laquelle, nous nous sommes donnés une distribution spatiale $q(r)$ d'un flux de chauffage que nous avons supposé en créneau appliquée sur une couronne de la rondelle. La résolution du problème basée sur les transformée de Hankel nous a permis d'estimer la source de chauffage imposée. Le problème inverse est ici un problème des moindres carrés pour chaque harmonique. Il s'agit donc plus précisément d'une méthode analytique d'inversion par décomposition en valeurs singulières.

- la seconde approche suppose que le terme source $q(r)$ est la somme de plusieurs flux en créneau ($q(r) = \sum_i q_i(r)$) avec les $q_i(r) = q_i G(r_i, r_{i+1})$ des flux en créneaux définis sur l'intervalle r_i et r_{i+1} et q_i les amplitudes. On estime les flux par la méthode des moindres carrés en calculant les sensibilités pour le système à multiflux.

Dans les deux approches, nous sommes partis de l'hypothèse que la distribution spatiale de flux est indépendante du niveau du chauffage.

La méthode est appliquée ici à un chauffage inductif sur un disque de Nickel de 175mm de diamètre et 5mm d'épaisseur en utilisant une caméra infrarouge à haute résolution (37000pixels vus sur le disque) pour des échauffements faibles (une cinquantaine de degrés) dans un premier temps. Un soin particulier a été apporté à l'étalonnage en température (face revêtue et thermocouple intégré dans le disque pour déterminer son émissivité).

Estimation de distributions de résistance thermique à la liaison d'éléments d'assemblage électronique par thermographie infrarouge

V Feuillet^{1,2}, Y. Jarny¹, Y. Scudeller², ⁽¹⁾ LTN, ⁽²⁾ LGMPA, Nantes

La détection de défauts au niveau des liaisons collées ou brasées des assemblages électroniques présente de nombreux intérêts technologiques. Elle fournit des données alimentant les outils de simulation numérique ou permet encore de tester de nouveaux types de matériaux d'interface [1]. Ce travail traite d'une méthode de mesure non intrusive de distributions 2D de résistance thermique à la liaison de deux éléments d'assemblage pour la détection de défauts.

La méthode consiste à analyser la distribution de température en régime permanent acquise par thermographie infrarouge dans le plan des éléments dissipatifs de la structure étudiée. L'algorithme du gradient conjugué est appliqué pour résoudre le problème inverse associé [2]. La méthode de résolution du problème direct (méthode des Résistances Discrètes de Frontière) est particulièrement adaptée pour traiter le nombre élevé de mesures de température issues d'une caméra infrarouge. Plusieurs simulations numériques sont effectuées montrant l'aptitude de la méthode à reconstruire différents types de distributions. Des améliorations adaptées à l'estimation d'une distribution 2D de paramètres sont apportées à l'algorithme d'inversion. Une méthode d'actualisation de la matrice de sensibilité conduit à la réduction de la durée de résolution du problème inverse. Un raffinement progressif de la liaison permet de déterminer le nombre optimal de composantes de la distribution recherchée.

Un dispositif expérimental reposant sur la méthode de mesure est mis au point [3]. Des éléments chauffants sont réalisés sur des substrats adaptés à l'aide d'une méthode de micro-fabrication associant les procédés de photolithographie et de gravure chimique. Ils sont destinés à l'excitation thermique de l'assemblage à caractériser et sont alimentés électriquement par l'intermédiaire d'un circuit imprimé d'interconnexion sur carte époxy. Une optimisation de la technique expérimentale est pratiquée. L'utilisation d'un revêtement émissif permet d'améliorer la précision de la mesure. La présence de l'alimentation électrique est prise en compte dans les mesures grâce à un calcul analytique de conduction. Le dispositif expérimental mis au point a permis de localiser et de caractériser thermiquement des lames d'air artificiellement créées au sein de liaisons adhésives (Figure 1).

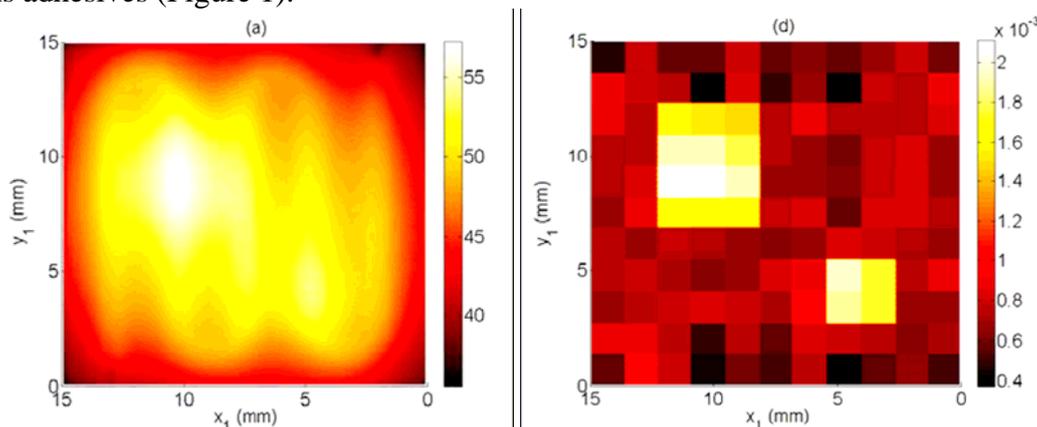


Figure 1 Identification de deux lames d'air au sein d'une liaison adhésive :

(a) champ de température mesuré (°C), (b) distribution de résistance thermique estimée ($\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$).

[1] K. Kurabayashi, K. E. Goodson, «Precision measurement and mapping of die-attach thermal resistance», IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, Vol. 21 (3), pp. 506-514, 1998.

[2] V. Feuillet, Y. Jarny, Y. Scudeller, «Estimation of thermal resistance distributions for die-attach testing in microelectronics», Inverse Problems in Science and Engineering, accepté pour publication en 2007.

[3] V. Feuillet, «Développement d'outils d'analyse thermique pour la conception de composants électroniques de puissance», Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, 2006.

Détermination du champ de coefficients d'échange convectif sur une plaque mince par thermographie infrarouge

Daniel BOUGEARD, Serge RUSSEIL , Abdelilah EL ABBADI

Différentes techniques expérimentales peuvent être utilisées pour déterminer les coefficients d'échanges locaux. Certaines techniques utilisent une condition de flux imposée et déterminent le coefficient d'échange à partir de la mesure du champ de température. La technique est alors stationnaire. Des techniques transitoires sont également utilisées lorsque l'on désire déterminer le coefficient d'échange local pour une répartition de température surfacique uniforme. Ces techniques déterminent le coefficient d'échange à partir de la variation de la température de surface en fonction du temps en partant, au début de l'expérience, d'un champ de température uniforme. En règle générale ces techniques utilisent des hypothèses simplificatrices. Parmi celles-ci deux peuvent paraître fortes : les flux conductifs sont supposés négligeables, le coefficient d'échange est supposé constant durant l'expérience instationnaire.

Dans cet article, nous utilisons une méthode transitoire utilisant une plaque mince permettant de faire l'hypothèse d'un problème thermique bidimensionnel. Le champ de température transitoire en surface de la plaque est mesuré par thermographie infrarouge. Le coefficient d'échange local est alors déterminé à partir d'une méthode directe faisant intervenir une intégration discrète de l'équation de l'énergie. Cette intégration peut être effectuée entre différentes bornes temporelles. Dans cet article nous présentons deux types de bornes : un temps de refroidissement constant, et une différence de température locale constante. Les résultats montrent deux résultats importants :

- l'hypothèse de flux conductifs latéraux négligeables n'est pas toujours valide localement.
- Le choix des bornes d'intégration influe le résultat, montrant que le coefficient d'échange varie en fonction du temps.

Cette dernière constatation est précisée à partir de simulations numériques montrant que le coefficient d'échange local est influencé par les variations spatiales locales de la température.

Les voies actuelles de développement consistent à mettre en œuvre une méthode inverse qui permettra de déterminer le champ de coefficient d'échange convectif à partir de la minimisation des écarts quadratiques entre les champs de températures calculés à partir d'un problème direct bidimensionnel, et les champs mesurés au cours du refroidissement. La méthode pourra alors permettre de déterminer la variation temporelle du coefficient d'échange convectif.

L'article présente également quelques résultats obtenus à l'aide des différentes méthodes sur une géométrie correspondant à un écoulement de canal en cours de développement et un écoulement de jonction entre un tube et une plaque.