

Mesure de température et/ou de déformation à chaud par caméra proche infrarouge

Anthony DELMAS^{1,2,3*}, Yannick LE MAOULT^{1,2}, Jean-Marie BUCHLIN³, Thierry SENTENAC^{1,2}, Jean-José ORTEU^{1,2}

¹ Université de Toulouse ; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE ; ICA (Institut Clément Ader) ; F-81013 Albi Cedex 09, France

² Ecole des Mines Albi ; Campus Jarlard, F-81013 Albi, France

³ Institut von Karman de Dynamique des Fluides, Chaussée de Waterloo 72, 1640 Rhode-Saint-Genèse, Belgique

* (auteur correspondant : anthony.delmas@vki.ac.be)

Résumé – Ce travail traite du problème relatif à l'« effet mirage » rencontré lors de la mesure de la température et/ou de la déformation d'un objet à haute température par voie optique. Nous mettons en évidence le phénomène et présentons différentes méthodes pour le quantifier et l'observer, soit de façon numérique (méthode du lancer de rayons) soit de façon expérimentale (stéréo-corrélation et strioscopie).

Nomenclature

K	constante de Gladstone-Dale, m^3/kg
M	masse molaire de l'air, kg/mol
N	nombre d'Avogadro $6,022141.10^{23} mol^{-1}$
n	indice de réfraction
P	pression atmosphérique, Pa
R	constante des gaz parfait $J/mol/K$
T	température, K

Symboles grecs

α_o	polarisabilité d'une molécule $C^2.m^2.J^{-1}$
ϵ_o	permittivité du vide $kg^{-1}.m^{-3}.A^2.s^4$
ρ	masse volumique, kg/m^3
θ	angle entre le rayon et la normale à la surface iso-indice, rad

1. Introduction

L'ICA (Institut Clément Ader) Albi compte différents axes de recherche dont un consacré à la mesure, c'est l'axe MODT (Méthodes Optiques innovantes pour la métrologie Dimensionnelle et Thermique). Dans l'industrie ou bien dans un centre de recherche, il est souvent préférable de réaliser les mesures sans qu'il y ait contact et donc sans dégradation (contrôle non destructif). L'axe MODT développe tout particulièrement des méthodes de mesure sans contact de déformation et de température. La thèse de S. Claudinon [1] a mis en évidence la nécessité d'utiliser dans certains cas les méthodes optiques dans la mesure de déformation à chaud. Ce travail a montré que pour de hautes températures de surface ($>800^\circ C$), la mesure est fortement perturbée et ne conduit pas à des résultats fiables. D'autres études présentent l'« effet mirage » lui-même comme un moyen de mesure [2,3]. De son côté, l'Institut von Karman (IVK) développe depuis plusieurs années des techniques de visualisation et de mesures telles que la strioscopie, la LDV, la PIV et la thermographie infrarouge qui joue un rôle important dans l'analyse des phénomènes aérothermiques. Nous nous proposons d'étudier dans une première partie la déviation des rayons lumineux lors de la traversée d'une zone de convection naturelle autour d'un cylindre chaud. L'approche suivie repose sur une méthode de lancer de rayons qui permet le suivi de l'information optique en provenance de points fixes. Dans une deuxième partie, nous présentons des résultats préliminaires de visualisation obtenus à partir d'une technique particulière de stéréo-corrélation et par strioscopie, que nous confrontons aux simulations numériques. En fin

d'article nous indiquons aussi quelques unes des perspectives relatives à la correction de ces perturbations.

2. Etude de la déviation des rayons

On s'intéresse ici aux problèmes liés aux mesures effectuées sur des pièces chaudes. En effet, lorsqu'une pièce chaude se trouve dans un milieu ambiant beaucoup plus froid, il se crée un gradient de température et donc d'indice de réfraction autour dudit objet. Or, les caméras travaillant dans le visible (0,38 μm à 0,78 μm) et le proche infrarouge (0,78 μm à 1,7 μm) seront, a priori, plus sensibles aux variations d'indices de réfraction de l'air que les caméras travaillant dans l'infrarouge lointain. Une méthode pertinente pour étudier la déviation d'un rayon optique est celle du lancer de rayons. Un code basé sur cette méthode a été mis au point à l'ICA Albi lors d'une étude du chauffage IR de préforme en injection soufflage [4]. Des modifications ont été portées au code de lancer de rayon pour pouvoir analyser l'effet d'un gradient d'indice de réfraction sur la propagation des rayons. Pour obtenir le champ d'indice de réfraction nécessaire au code de lancer de rayon il est nécessaire de connaître le champ de température autour de l'objet étudié. Nous avons choisi d'étudier le panache convectif qui se développe autour d'un cylindre chaud de 3cm de rayon et 10cm de hauteur. Le champ thermique est obtenu par simulation numérique effectuée à l'aide du logiciel Fluent. La simulation réalisée est faite en axisymétrique ; une révolution autour du cylindre fournira le champ de température entier. La figure 1 montre la carte de température 2D autour du cylindre à 700K (les températures des matériaux étudiés au laboratoire étant comprises entre $\approx 400\text{K}$ et 1700K, des polymères aux barrières thermiques) :

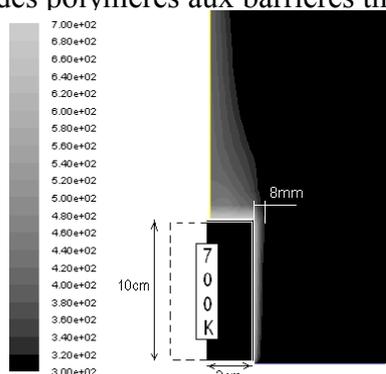


Figure 1 : Champ de température 2D autour d'une cylindre à 700K (Fluent)

La connaissance du champ de température et l'application de la loi de Gladstone-Dale [5] nous conduisent à la distribution de l'indice de réfraction.

$$n_{\lambda} - 1 = K_{\lambda} \cdot \rho(T) \quad (1)$$

où

$$K_{\lambda} = \frac{N \cdot \alpha_0}{2 \cdot \epsilon_0} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) : \quad (2)$$

La constante de Gladstone-Dale K est fonction de la longueur d'onde λ (car α_0 dépend de λ), mais dépend peu de la température T et de la pression P . Sa valeur a été tabulée pour des longueurs d'onde dans des conditions de température et de pressions différentes. Nous choisissons dans un premier temps de travailler dans le visible, avec la longueur du laser He-Ne par exemple : $\lambda=632,8 \text{ nm}$ (rouge) et $K=0,2256 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$. Dans notre cas, l'air pouvant être considéré comme un gaz parfait, on obtient :

$$\rho = \frac{352,86}{T} \quad (3)$$

En combinant les équations (1) et (3), nous établissons (pour un laser He-Ne) :

$$n - 1 = 0,079.T^{-1} \quad (4)$$

La relation 4 est implantée dans notre code de lancer de rayons qui travaille comme l'illustre la Figure 3. Le plan d'origine est composé d'éléments émetteurs repérés par leurs coordonnées y et z . Chaque élément lance normalement au plan d'origine un rayon. En traversant la zone perturbée il subit de nombreuses réfractions. Le champ d'indice autour du cylindre est discrétisé selon la coordonné radiale r et la coordonnée axiale z afin de créer un grand nombre de cellules d'indice constant. Le passage du rayon d'une cellule à une autre est régi par la loi de Snell-Descartes (passage d'une cellule i à une cellule j) :

$$n_i.\sin(\theta_i) = n_j.\sin(\theta_j) \quad (5)$$

Un fois le rayon sorti de la dernière cellule, donc de la perturbation thermique, il continue sa course pour rencontrer le plan cible, plan d'arrivée dont la position selon x peut être ajustée afin d'accentuer l'effet de distorsion. En effet, plus l'écran sera loin et plus la déviation du rayon entre son point d'origine et son point d'arrivée sera importante.

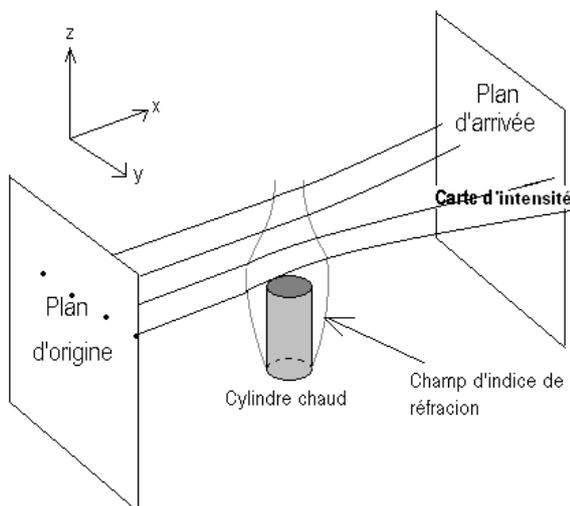


Figure 2 : Schéma explicatif du fonctionnement du code et sa géométrie

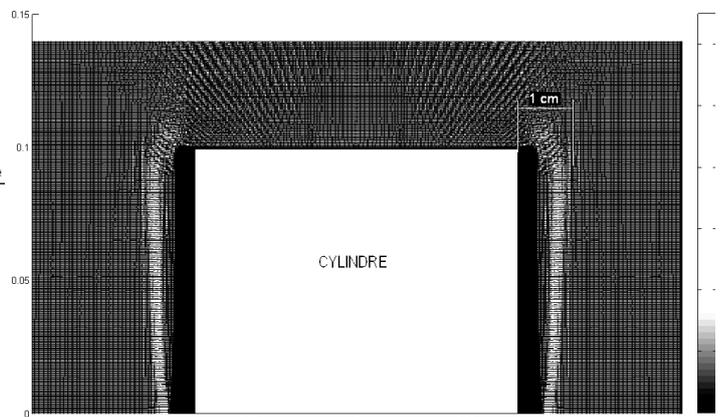


Figure 3 : Carte d'intensité après passage des rayons autour du cylindre

Si on discrétise suffisamment le plan d'origine, et qu'on lance donc un grand nombre de rayons (160000 pour obtenir la figure 3), on obtient sur la cible une carte d'intensité montrant les zones de convergence des rayons ou au contraire les zones plus sombres, recevant peu voire pas de rayons. La figure 4 fournit un exemple de résultats obtenus pour le cas du cylindre à 700K avec le plan d'arrivée situé à 5m. Elle montre l'effet de la distorsion, tous les rayons passant sur les bords du cylindre (dans le sens de la hauteur) s'en éloignent ce qui se traduit par la zone noire sur la cible. En effet, les rayons lumineux sont déviés vers les milieux de plus grande masse volumique, donc vers les zones plus froides. On obtient dès lors une zone de convergence (plus claire) correspondant à tous ces rayons absents de la zone noire. On note cependant que cette méthode qui permet de déduire l'épaisseur de la couche limite, conduit à une valeur de 1cm au faite du cylindre, alors que dans la simulation numérique elle n'est que de 8mm (voir figure 1). Une observation optique de la couche limite sans correction de l'image est inévitablement faussée par la distorsion des rayons. On observe une couche limite plus épaisse.

Rappelons que le calcul précédent a été réalisé pour la longueur d'onde du laser He-Ne soit 632,8nm, cependant le phénomène peut-être plus ou moins visible selon la bande spectrale et la gamme de température dans laquelle on travaille. La déformation liée à la présence de la

convection sera d'autant plus visible que l'indice de réfraction sera grand et connaîtra un fort gradient. La figure 4 permet de voir, à l'aide de deux courbes, la dépendance de n en fonction de la longueur d'onde (abscisse du haut) et en fonction de la température (abscisse du bas) :

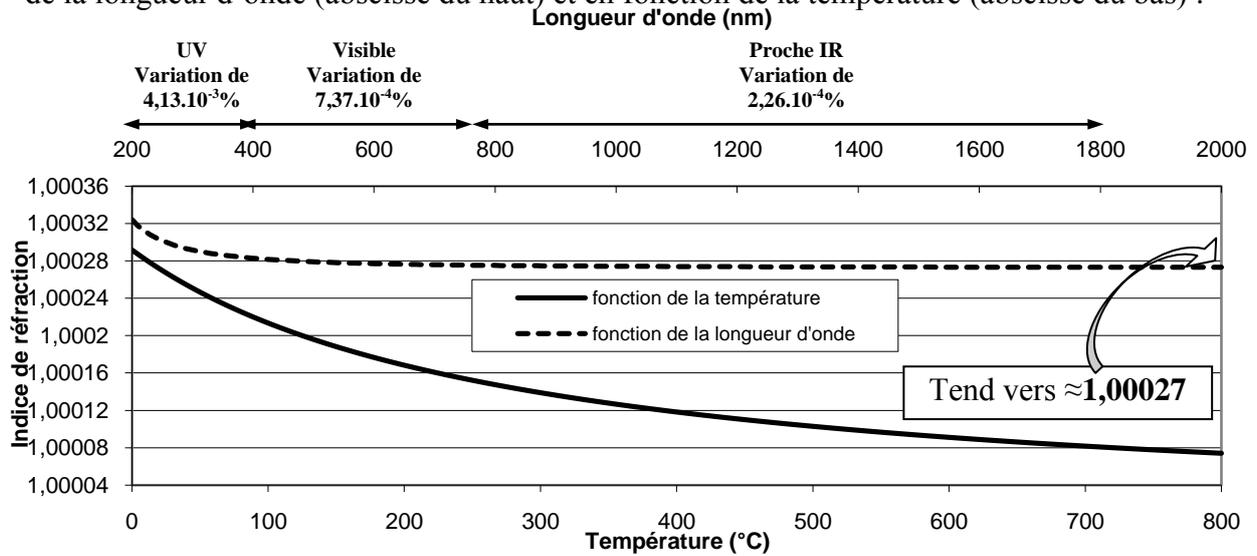


Figure 4: Evolution de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde (à 15°C) et de la température (pour $\lambda=632,8\text{nm}$)[6]

3. Visualisation du phénomène

3.1. Stéréo-corrélation

Le but de cette étape expérimentale est la mise en évidence du phénomène de convection. Nous avons testé à l'ICA Mines Albi une méthode dédiée à l'observation de déplacements ou de déformations en absence de perturbation. Pour ce faire nous utilisons une méthode de stéréo-vision par corrélation [7,8]. La figure 5 en explique brièvement le principe qui se base sur la vision binoculaire d'une même scène à savoir la mesure d'un objet suivant 2 angles différents. Cette technique permet de mesurer l'évolution de la géométrie 3D d'un objet ou le champ de déplacements des points de la surface en enregistrant une paire d'images stéréoscopiques relatives à chaque état de déformation.

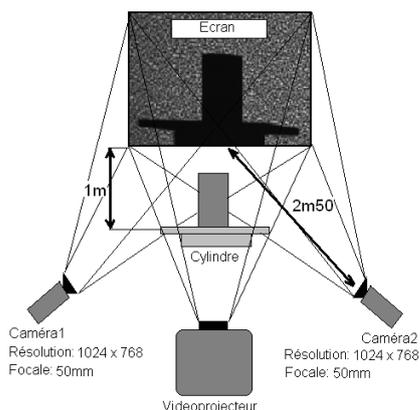


Figure 5 : Schéma de la méthode adoptée pour la visualisation du phénomène

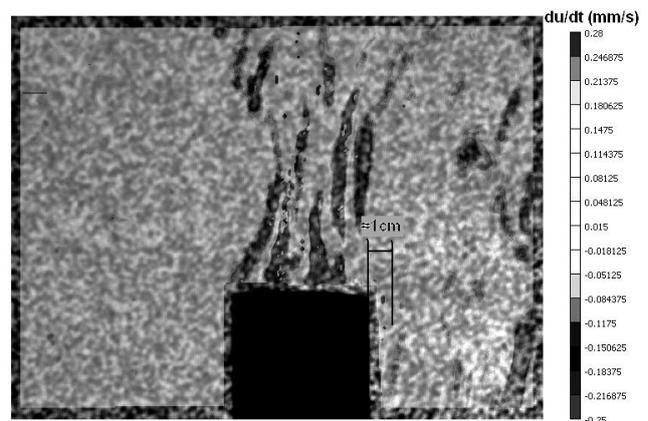


Figure 6 : Champ de déplacement obtenu après post-traitement d'une image déformée

L'application de cette méthode pour observer les courants de convection est entièrement originale. Comme cela est expliqué précédemment, la méthode permet d'observer le déplacement de points de surface au cours du temps. Nous comparons toutes les images des

champs déformés à une image de référence de champ non déformé. Afin de créer un nombre de points important nous utilisons un vidéoprojecteur qui crée sur un écran l'image d'un mouchetis de type « bruit de Perlin » (image synthétique produite sur ordinateur) équivalent à une génération de points pseudo-aléatoire. L'ombre du cylindre doit apparaître sur l'écran, ce sera la zone d'intérêt filmée par les caméras. Une fois le cylindre chauffé à la température de 700K et l'image de référence prise, nous enregistrons des séries d'images en présence des perturbations thermiques. L'image de référence et les images déformées sont traitées par le logiciel de stéréo-corrélation VIC3D [9] qui calcule le déplacement et/ou la vitesse de déplacement de chaque point dans les 3 dimensions. La figure 6 met bien en évidence la présence des perturbations thermiques autour et au-dessus du cylindre. On observe très bien le panache au dessus du cylindre ainsi que la couche limite se développant le long de la hauteur du cylindre (clairement visible en fausses couleurs). Avec cette technique expérimentale nous observons une couche limite légèrement supérieure à 1cm, résultat en accord avec ceux obtenus numériquement avec le code de lancer de rayons. La couche limite observée est effectivement supérieure à celle calculée par simulation (figure 2). La méthode, certes principalement qualitative pour l'instant, permet cependant de mettre en évidence la présence du phénomène dans la bande 400nm-750nm.

3.2. Strioscopie

D'une manière imagée l'idée fondamentale de cette méthode est de retirer la lumière qui n'a pas été déviée par l'objet ou la perturbation (ici l'air chaud). Pour réaliser cela, il faut d'abord réaliser une image de la source de lumière à l'aide d'une lentille convergente. À l'endroit précis de l'image géométrique passent les rayons qui n'ont pas subi de déviation (fréquences spatiales nulles). On les élimine avec un filtre (écran opaque au point de convergence). Les autres rayons (qui ont été déviés) ne sont pas focalisés au même endroit et peuvent donc passer afin de former une image filtrée. En résumé, on élimine le fond continu de l'image et, par voie de conséquence, les détails ou turbulences de l'objet, qui étaient « noyés » dans ce fond continu, ont un contraste grandement amélioré.

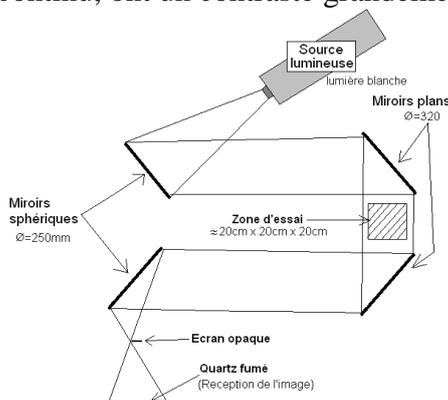


Figure 7 : Schéma de montage du banc de strioscopie.

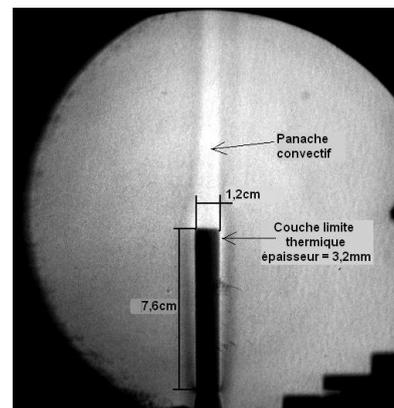


Figure 8 : Image strioscopique d'un cylindre chaud ($\approx 300^{\circ}\text{C}$) vertical

4. Conclusions

Les travaux rapportés dans cet article portent sur la mise en évidence de l'effet mirage et aussi sur l'applicabilité de quelques méthodes qui pourraient permettre une quantification du phénomène, que ce soit de façon numérique ou expérimentale. Un des prochains travaux à réaliser sera d'utiliser ces outils pour prédire numériquement la déformation et corriger les images des champs perturbés enregistrées par la caméra CCD. La technique expérimentale de stéréo-corrélation permet d'obtenir des résultats préliminaires intéressants, corroborés par la

méthode de lancer de rayons. La strioscopie nous donne en revanche des observations plus précises sur l'aspect de la perturbation convective.

5. Perspectives

La prochaine étape va être de quantifier avec précision l'amplitude des déformations liée aux perturbations thermiques et ceci pour différentes bandes spectrales. Une expérimentation spécifique est en cours de développement, elle devrait permettre une exploration du problème du visible à l'infrarouge. Les techniques de mesures utilisées iront de la stéréo-corrélation [7,8] à la technique de la grille [10] en passant par des méthodes d'analyse de mires périodiques par transformée de Fourier.

Ensuite, une restauration des images perturbées pourra être entreprise. La connaissance a priori de la déviation des rayons grâce au code de lancer de rayons est une des pistes envisagées. D'autres méthodes sont possibles pour le traitement des distorsions comme par exemple le calibrage géométrique ou bien des traitements statistiques de l'image.

Références

- [1] S. Claudinon, Contribution à l'étude des distorsions au traitement thermique, Thèse Ecole des Mines de Paris, 2000
- [2] J. Badoz, D. Fournier, A. C. Boccara, Photoacoustics : a hundred years old technique revisited, J. Opt. 11, p 399-408, 1980
- [3] A. El Motassadeq, H. Chehouani, M. Waqif, S. Benet, Simulation des effets de la réfraction dans la couche limite thermique au-dessus d'un disque horizontal, Congrès français de thermique, 2000
- [4] B. Cosson, Schmidt F., Le Maout Y., Bordival M., Infrared heating stage simulation of semi-transparent media (PET) using ray tracing method, submitted to International Journal of Material Forming, November 2009
- [5] F. Mayinger, O. Feldmann, Optical measurements 2nd edition, Springer, 2001
- [6] David R. Lide, Handbook of Chemistry and Physics 88th, 10-253, 2007-2008
- [7] J.-J. Orteu, Mesure 3D de formes et de déformations par stéréovision, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique - Travail des matériaux, N°BM 7015, avril 2002
- [8] M.A. Sutton, J.-J. Orteu, H.W. Schreier, Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements - Basic Concepts, Theory and Applications, 364 p. 100 illus. Hardcover, Springer, 2009
- [9] VIC3D software, Correlated Solutions, Inc. <http://www.correlatedsolutions.com>
- [10] Y. Surrel, La technique de la grille pour la mesure de champs de déplacements et ses applications, Photomécanique 4/2004, p 193-216

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement Maxime Bordival pour son aide dans l'utilisation et la remise à niveau du code de lancer de rayon ainsi que Benoit Cosson pour la création de ce-dernier. Nous remercions également Vincent Van Der Haegen pour sa contribution à l'obtention d'images strioscopiques.