



HAL
open science

Caméra proche IR et/ou IR Mesure de température et de déformation à hautes températures: le problème de l'effet mirage

Anthony Delmas, Jean-Marie Buchlin, Yannick Le Maoult, Thierry Sentenac,
Jean-José Orteu

► To cite this version:

Anthony Delmas, Jean-Marie Buchlin, Yannick Le Maoult, Thierry Sentenac, Jean-José Orteu. Caméra proche IR et/ou IR Mesure de température et de déformation à hautes températures: le problème de l'effet mirage. Contrôles essais mesures, 2012, 38, p.103-107. hal-01832905

HAL Id: hal-01832905

<https://hal.science/hal-01832905>

Submitted on 6 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caméras proche IR et/ou IR

MESURE DE TEMPÉRATURE ET DE DÉFORMATION À HAUTE TEMPÉRATURE : LE PROBLÈME DE L'EFFET MIRAGE

L'étude que nous présentons ici s'intéresse à un problème particulier rencontré lorsqu'on souhaite mesurer la température et/ou la déformation d'un objet à haute température (500-1000°C) par caméra proche IR et/ou IR, soit entre 0,4 et 1,7 μm pour nos applications, et de façon plus large pour les caméras infrarouges classiques fonctionnant entre 3-5 μm et 8-12 μm . En effet, différents paramètres d'influence peuvent entrer en jeu dans ce type de mesure (émissivité, convection...). Nous nous focalisons dans ce travail sur les perturbations amenées par la convection naturelle présente autour de l'objet chaud.

Introduction

L'Institut Clément Ader (ICA) est structuré en quatre groupes de recherche. Le groupe « Métrologie, Identification, Contrôle et Surveillance (MICS) » s'intéresse particulièrement au développement et à l'exploitation de méthodes optiques de mesures dimensionnelles et thermiques sans contact pour l'étude du comportement des matériaux et des structures (photomécanique), la surveillance de procédés et le contrôle non destructif.

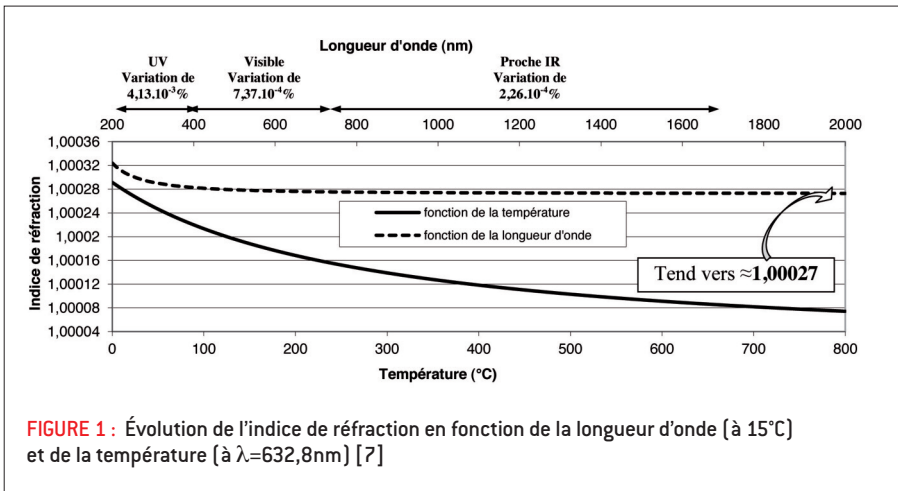
Des précédents travaux [1] ont mis en évidence la nécessité d'utiliser dans certains cas les méthodes optiques pour la mesure de déformations à chaud. Ces travaux ont montré que pour de hautes températures de surface (>800°C), la mesure est fortement perturbée par "l'effet mirage" et ne conduit pas à des résultats fiables. D'autres études présentent

"l'effet mirage" lui-même comme un moyen de mesure (diffusivité, température, concentration...)[2,3].

De son côté, l'Institut von Karman (IVK) développe depuis plusieurs années des techniques de visualisation et de mesure telles que la strioscopie, la LDV, la PIV et la thermographie infrarouge qui jouent un rôle important dans l'analyse des phénomènes aérothermiques.

(1) Université de Toulouse ; Mines Albi ; ICA (Institut Clément Ader), France.

(2) von Karman Institut for Fluid Dynamics, Belgique



**Approche numérique :
étude du chemin optique
par lancer de 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 ($0,38 \mu\text{m}$ à $0,78 \mu\text{m}$) et le proche infrarouge ($0,78 \mu\text{m}$ à $1,7 \mu\text{m}$) seront, a priori, plus sensibles aux variations d'indices de réfraction de l'air que les caméras travaillant dans l'infrarouge lointain (cf. Figure 1). 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 lors d'une étude du chauffage IR de préforme en injection soufflage [4]. Des modifications ont été apportées au code de lancer de rayons 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 rayons, il est nécessaire de connaître le champ de température autour de l'objet étudié. À titre de référence, nous avons choisi d'étudier le panache convectif qui se développe au-dessus d'un disque chaud [5] de 9,2 cm de rayon et 1 cm d'épaisseur. Cette configuration permet de générer un panache convectif permettant d'obtenir le maximum de perturbation

optique du fait de l'axisymétrie du panache et du fort gradient de température dans ce dernier. 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 disque fournira le champ de température entier. La Figure 2 montre la carte de température 2D autour du disque à 1000 K (représentative des températures de mise en forme ou d'études des matériaux utilisés au laboratoire : entre $\approx 400 \text{ K}$ et 1400 K , des polymères aux barrières thermiques). À cette température et avec ce diamètre de disque, le régime d'écoulement restera laminaire ($Ra=2.10^6 < 10^9 = Ra_{seuil}$). La connaissance du champ de température et l'application de la loi de Gladstone-Dale [6] nous conduisent à la distribution

de l'indice de réfraction.

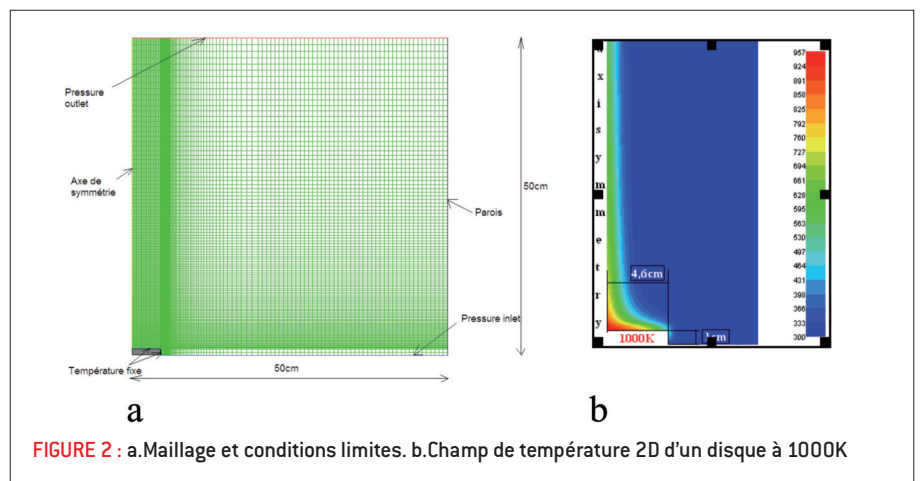
$$n_\lambda - 1 = K_\lambda \cdot \rho(T) \quad (1)$$

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

Le paramètre de Gladstone-Dale K est fonction de la longueur d'onde λ (car α_0 , polarisabilité d'une molécule, 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 (cf. Figure 1). Nous choisissons dans un premier temps de travailler dans le visible, avec la longueur d'ondes 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 :

$$n - 1 = 0,079 \cdot T^{-1} \quad (3)$$

La relation (3) permet d'obtenir directement le champ d'indice de réfraction que nous introduisons ensuite dans notre code de lancer de rayons comme le montre la Figure 3. Le plan d'origine est composé d'éléments émetteurs repérés par leurs coordonnées y et z. Chaque élément lance un rayon normal au plan d'origine. En traversant la zone perturbée, il subit de nombreuses réfractions. Le champ d'indice autour du cylindre est discrétisé selon la coordonnée radiale r, la hauteur z et la coordonnée de circonférence φ , 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.



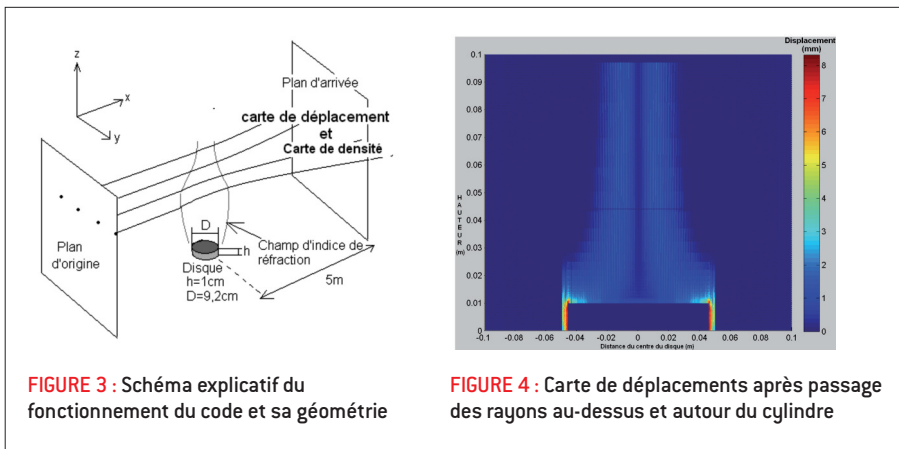


FIGURE 3 : Schéma explicatif du fonctionnement du code et sa géométrie

FIGURE 4 : Carte de déplacements après passage des rayons au-dessus et autour du cylindre

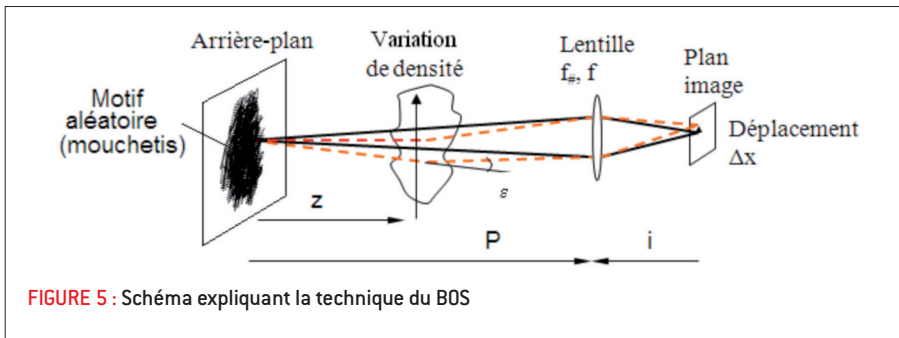


FIGURE 5 : Schéma expliquant la technique du BOS

Si on discrétise suffisamment le plan d'origine, et qu'on lance donc un grand nombre de rayons (500000 pour obtenir la Figure 4), on peut alors obtenir comme résultat la carte de déplacements correspondant à la différence de position entre les coordonnées de départ des rayons et celles d'arrivées. Nous voyons ainsi les zones subissant de fortes perturbations et les zones où les rayons ne sont pas déviés. On observe que les déviations les plus grandes se produisent là où le gradient de température est le plus fort, c'est-à-dire là où la couche limite thermique est la plus mince. On note alors un déplacement pouvant aller jusqu'à 8 mm sur les bords verticaux du disque, et autour de 3mm juste au-dessus de celui-ci. Dans le panache lui-même, la déviation est de 1mm. On peut également remarquer, en accord avec la loi de Snell-Descartes, que les rayons passant très près du centre du panache (et donc rentrant perpendiculairement dans la perturbation) ne subissent pas ou très peu de déviations.

Validation expérimentale : la méthode du Background Oriented Schlieren (BOS)

La méthode du *Background Oriented Schlieren* [8] est une nouvelle technique de visualisation de gradient d'intensité dans les fluides utilisant la relation de Gladstone-Dale reliant la masse volumique du fluide à son indice de réfraction. La BOS simplifie le procédé de visualisation en éliminant l'utilisation de miroirs coûteux, de lasers... Dans son utilisation la plus basique, la BOS n'a besoin que d'un simple arrière-plan comportant un motif fait de points générés de façon aléatoire. Initialement, cette méthode était utilisée à titre qualitatif, mais, grâce à un logiciel de corrélation d'images, nous sommes capables d'obtenir des valeurs quantitatives de déplacements. La Figure 5 illustre le fonctionnement de la BOS. La variation de masse volumique est créée par l'air chaud venant du disque. Cette perturbation est positionnée à l'intérieur d'une enceinte en plexiglas (40 cm x 30 cm sur 1 m de haut) afin d'éviter les

interactions avec l'extérieur (personnes, ventilations...). Le disque est en Inconel 600 et chauffé par une résistance bobinée. Une alimentation de 11A et 115V est nécessaire à son fonctionnement. Pour obtenir les résultats de déplacement, deux images de l'arrière-plan sont enregistrées, une avec perturbation et une sans. Ensuite, un traitement d'images est réalisé afin de déduire le déplacement de chaque élément (chaque point de l'arrière-plan). L'image de l'arrière-plan est prise de façon à ce que le disque chaud soit situé juste au-dessous du champ de l'image. Cette analyse est réalisée à l'aide du logiciel WIDIM (Window Displacement Iterative Multigrad) [9], logiciel développé par l'Institut von Karman et habituellement utilisé en PIV. WIDIM fait une corrélation croisée entre les deux images et donne comme résultat le déplacement de chaque élément, en pixel, selon la direction x et y. À titre de comparaison, les cartes de déplacements sont aussi calculées à l'aide des logiciels de corrélation d'images développés ou utilisés à l'ICA (Vic-2D [10]).

On a mis en œuvre cette méthode pour deux types de caméras, une caméra visible et une caméra proche infrarouge. Dans le cas de la caméra visible, la distance Z est de 1m et P de 1,6m (cf. Figure 5), la distance focale de l'objectif est de 50 mm, la caméra est une Pixelfly QE avec un capteur CCD de résolution 1392x1036. Pour la caméra proche infrarouge, Z est de 1m, P 1,25 m et la distance focale de 75 mm. La résolution du capteur est 320x256, la caméra utilisée est une Xenics avec un capteur CCD VisGaAs fonctionnant de 0,75 μm à 1,7 μm . Une lampe spéciale est utilisée dans ce cas, en effet elle est équipée d'un filtre centré autour de 830 nm. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 6 et 7.

Comme on peut le voir sur la Figure 6, on obtient un déplacement de 9 pixels près du disque et autour de 5 pixels dans le panache, ce qui correspond respectivement à un déplacement de 2,2 mm et 1,2 mm sur l'écran. On remarque qu'au centre du panache (le centre du panache

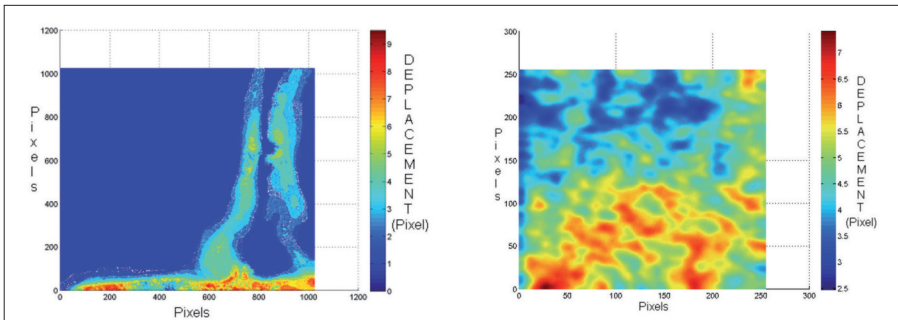


FIGURE 6 : Carte de déplacements instantanée au-dessus du disque pour la caméra visible

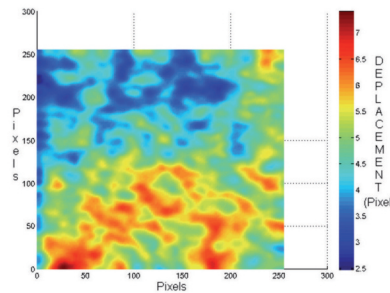


FIGURE 7 : Carte de déplacements instantanée au-dessus du disque pour la caméra proche infrarouge

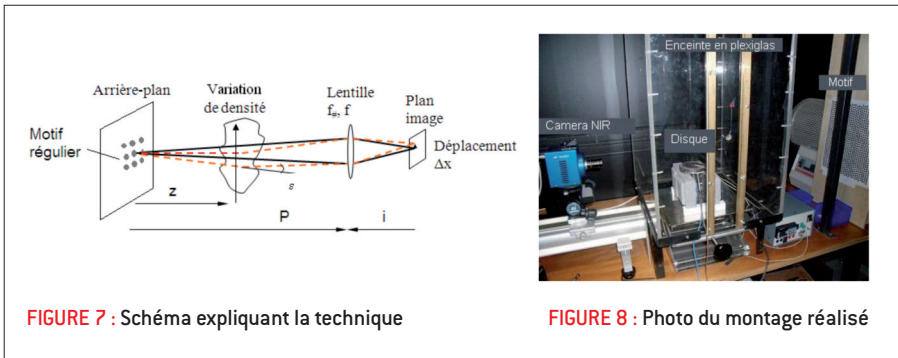


FIGURE 7 : Schéma expliquant la technique

FIGURE 8 : Photo du montage réalisé

est positionné vers le pixel 800 horizontalement) nous n'avons pas de déplacement. Ces résultats sont en accord avec ceux qu'on a obtenus avec l'approche numérique basée sur la méthode de lancer de rayons. Pour la Figure 7, la résolution de la caméra étant beaucoup moins bonne, les détails du panache sont peu visibles. Il a d'ailleurs fallu utiliser un objectif avec une focale plus grande afin de mesurer un déplacement. On obtient alors un déplacement d'environ 7 pixels juste au-dessus du disque, soit environ 3,5 mm au niveau de l'arrière-plan.

La méthode a été testée pour une caméra infrarouge, mais la résolution de la caméra était trop faible (320x240) pour permettre une détection des points constituant le motif aléatoire de l'arrière-plan. La caméra est une Thermacam SC3000 avec un détecteur GaAs fonctionnant de 8 μm à 9 μm . Afin de mesurer le déplacement, on utilisera alors la méthode décrite ci-après, qui consiste à remplacer sur l'arrière-plan le motif aléatoire par un motif régulier.

Validation expérimentale 2 : analyse de la déformation d'un motif régulier

La mesure du champ de déformations est très utilisée lorsqu'on veut contrôler la mise en forme des matériaux, c'est-à-dire lorsqu'on veut conférer à une pièce (en général métallique) des dimensions situées dans une fourchette de tolérances données ainsi que des caractéristiques précises. Il faut donc trouver un système de mesure de déformations qui permettrait de comparer la réussite d'un formage suivant le matériau, les paramètres opératoires et les paramètres mécaniques. Dans cette optique, il est commun de s'aider de formes prédéfinies tracées sur la plaque métallique avant application de contraintes. De nombreux modèles ont été imaginés, comme l'utilisation d'une grille (méthode la plus utilisée), de réseaux de cercles tangents, disjoints ou enchevêtrés. Nous avons choisi dans notre étude l'utilisation de cercles disjoints, qui deviennent alors des ellipses lors d'une déformation [11]. Comme pour la méthode BOS, la technique

ici va être d'observer avec une caméra un motif contenant les cercles au travers de la perturbation. De la direction et de la mesure des axes d'une ellipse, on peut déterminer les allongements et les deux déformations rationnelles principales par :

$$\varepsilon_x = \ln\left(\frac{a}{r}\right) \text{ et } \varepsilon_y = \ln\left(\frac{b}{r}\right) \quad (4)$$

Avec r le rayon initial du cercle, a et b les rayons des ellipses respectivement selon x et y .

Après traitement des images par un code de calcul développé sous Matlab, les résultats peuvent être représentés en carte de déformations de chaque élément se trouvant sur l'arrière-plan. Les images de l'arrière-plan ont été prises au travers du panache, juste au-dessus du disque chauffant.

La déformation selon x va de -0,02 (au centre du panache) à 0,05 (sur les bords du panache). On peut ainsi voir que la déformation la plus importante se situe où le gradient selon x est le plus fort, c'est à dire sur les bords du panache. La déformation étant positive, cela veut dire que la déformation aura tendance à grossir les pastilles dans le sens horizontal. Au contraire, au centre du panache les pastilles verront leurs rayons s'amincir (selon x). Pour ce qui concerne la Figure 10, la déformation selon y est présente uniquement où un gradient selon y est présent, c'est-à-dire juste au-dessus du disque chauffant. Les valeurs de déformations dépendent de la taille des pastilles utilisées, et la résolution des caméras changeant d'un type à un autre, la taille des pastilles devait alors s'adapter. Il n'est donc pas possible pour le moment de comparer les déformations pour différentes longueurs d'onde entre elles. Les résultats concernant la caméra proche infrarouge sont semblables à ceux réalisés avec la caméra visible. On distingue une déformation plus importante sur les bords du panache, et une déformation négative au centre du panache. Cependant, à cause de la faible résolution de la caméra, des pastilles légèrement plus grosses ont dû être utilisées. De ce fait, la déformation selon y ne met pas en évidence le gradient

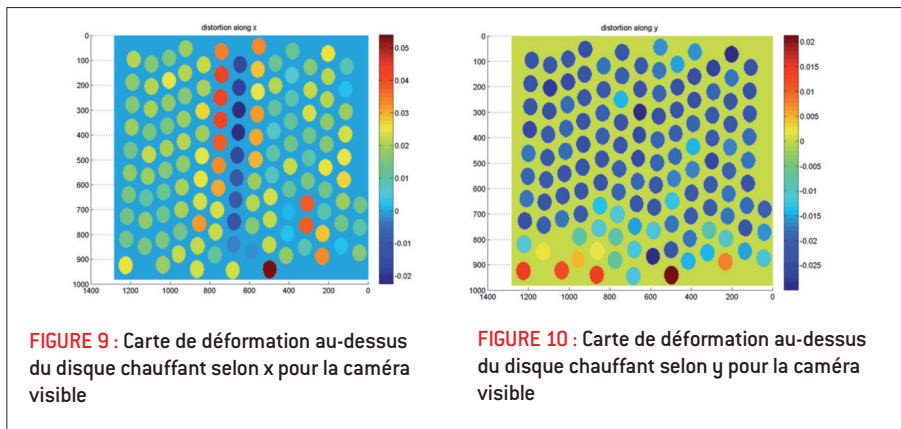


FIGURE 9 : Carte de déformation au-dessus du disque chauffant selon x pour la caméra visible

FIGURE 10 : Carte de déformation au-dessus du disque chauffant selon y pour la caméra visible

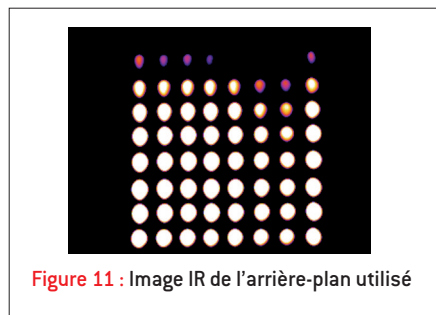


Figure 11 : Image IR de l'arrière-plan utilisé

de température au-dessus du disque chauffant. En effet les pastilles doivent être inférieures à l'épaisseur de couche limite thermique afin de pouvoir bien la résoudre. Pour le cas de la caméra infrarouge, les pastilles noires et blanches ne pouvant pas être détectés directement, il a fallu utiliser une autre méthode afin de pouvoir créer des "motifs infrarouges" reconnaissables par la caméra. Pour cela, on a utilisé quatre lampes halogènes éclairant une feuille de papier comportant des disques noirs sur fond blanc. Les lampes halogènes ayant une puissance assez importante dans le proche infrarouge, et l'absorptivité du noir étant bien plus grande que le blanc dans cette bande, il est donc possible de chauffer suffisamment les pastilles et de permettre une détection par la caméra infrarouge. À l'aide de cette méthode, encore en cours de développement pour la caméra infrarouge, il nous a été possible de mesurer le déplacement des pastilles afin d'avoir une idée de l'ampleur de la perturbation dans cette bande spectrale. On obtient un résultat préliminaire sur le déplacement du

même ordre de grandeur que pour les longueurs d'ondes du visible ou du proche IR compte tenu du fait de la distance du panache puisque la distance caméra/perturbation est de seulement 30cm (faible focale sur la caméra infrarouge). Le déplacement calculé est de 0,5 pixel, soit 0,4 mm lorsqu'on se situe à 1 m de la perturbation.

Conclusions et perspectives

L'étude faite ici a mis en évidence l'effet mirage dans différentes bandes spectrales (visible, proche IR et IR) et a commencé à donner quelques informations quantitatives sur le déplacement et la déformation induits par la perturbation. Nous avons montré que le déplacement est d'environ 3 mm pour le visible et le proche infrarouge, est apparemment plus faible pour l'infrarouge plus lointain avec environ 0,4 mm. Ces résultats demeurent cependant préliminaires et de nouveaux essais dans une toute nouvelle enceinte devraient donner davantage de précision sur ces résultats. Les mesures de déformations montrent également que l'effet mirage peut entraîner plus qu'un déplacement et peut élargir ou rétrécir un motif. Une nouvelle mire infrarouge a également été élaborée afin d'améliorer les résultats dans cette bande spectrale. Enfin, l'étape finale sera de corriger une image perturbée et d'obtenir une image sans déformation induite par le gradient d'indice de réfraction. Dans le cas d'une convection laminaire établie, le code de lancer de rayons pourrait être utilisé pour prédire la déviation de chaque point. Une

méthode en cours d'étude [12] permettra, in fine, d'obtenir expérimentalement le champ d'indice de réfraction 3D d'une perturbation inconnue (à condition qu'elle soit axisymétrique) et ainsi de l'implémenter dans le code de lancer de rayons. Mais pour le cas d'un écoulement turbulent, les notions de phénomènes statistiques [13] et/ou le traitement des images par un algorithme [14,15] semblent plus appropriés pour corriger les images.

Bibliographie

- [1] S. CLAUDINON, « Contribution à l'étude des distorsions au traitement thermique », Thèse École des Mines de Paris, 2000
- [2] J. BADOZ, D. FOURIER & A. C. BOCCARA, « Photoacoustics : a hundred years old technique revisited », Journal Optics, n° 11, pp. 399-408, 1980
- [3] A. EL MOTASSADEQ, H. CHECHOUANI, M. WAGIF & 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, F. SCHMIDT, Y. LE MAOULT & M. BORDIVAL, « Infrared heating stage simulation of semi-transparent media (PET) using ray-tracing method », International Journal of Material Forming, vol. 4, n°1, p1-10, 2011.
- [5] J.H. MERKIN, « Free convection above a heated horizontal circular disk », Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol. 34, pp 596-608, 1983
- [6] F. MAYINGER & O. FELDMANN, « Optical measurements 2nd Edition », Springer, 2001
- [7] D. R. LIDE, « Handbook of Chemistry and Physics 88th », 10-253, 2007-2008
- [8] F. KLINGE, « Investigation of background oriented schlieren towards a quantitative density measurement system », project report 19, Von Karman Institute, 2001
- [9] F. SCARANO & M. L. RIETHMULLER, « Iterative Multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset », Experiment in Fluid, n° 109, Novembre 1987.
- [10] VIC-2D, Correlated Solutions Inc., <http://correlatedsolutions.com>.
- [11] F. MORESTIN, P. BOGAERT & M. BOIVIN, « Mesure de déformation par imagerie », Colloque Photomécanique 95, ENS Cachan (France), 14-16 mars, p 195-202, Ed. Eyrolles, 1995
- [12] J. SNITZMAN, T. ROESGEN, « Whole field density visualization and Abel reconstruction of axisymmetric vortex rings », Journal of Flow Visualization & Image Processing, vol 13, 2006.
- [13] X. RONDEAU, « Imagerie à travers la turbulence : mesure inverse du front d'onde et centrage optimal », Thèse de doctorat en physique et astrophysique, Université de Lyon, 2007
- [14] G. THORPE & D. FRASER, « Correction and restoration of images obtained through turbulent media », Digital signal processing applications, pp 415-420, 1996
- [15] M. LEMAITRE, O. LALIGANT, J. BLANG-TALON & F. MERIAUDEAU, « Local isoplanatism effects removal on infrared sequences », Proceedings of SPIE, Quality Control by Artificial Vision (QCAV) Conference, France, Vol. 6356, 2007