
**UNE APPROCHE EXPERIMENTALE POUR UNE VISUALISATION FINE
EN TEMPS REEL DE LA COUCHE LIMITE THERMIQUE AU DESSUS D'UN
DISQUE RAINURE**

T. Boussoukaia¹, M. Hammouda², B. Draoui³

¹Laboratoire LDDI, Université d'Adrar, Algérie

²Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER /MS), Adrar, Algérie

³Laboratoire d'Energétique en Zones Arides (LEZA), Université de Bechar, Algérie

Tboussoukaia@gmail.com

Reçu 20/05/2013,, en ligne 06/06/2013

RESUME

Cette étude vise la mise en place d'un banc d'essai, mettant en œuvre une technique de visualisation et de quantification des caractéristiques physiques de la couche limite thermique induite par un disque rainuré et chauffé par le bas utilisé pour la cuisson. La méthode de visualisation choisie est l'ombroscopie comme méthode non intrusive afin de ne pas perturber la convection. D'une part une caméra HD télécommandable à distance, montée soigneusement sur un rail qui maintient l'appareil à une position minutieuse par rapport à l'écran, nous a permis d'effectuer des prises de vue à proximité immédiate de l'interface. D'autre part nous avons quantifié les gradients verticaux de la température dans la sous-couche visqueuse, à moins de quelques pixels de la surface supérieure du disque grâce à un système de traitement d'images. Les résultats présentent une description fine de l'évolution de la structure locale de l'écoulement le long de la convection depuis la sous-couche visqueuse jusqu'aux limites de la couche limite turbulente.

Mots clés : Convection naturelle, Couche limite thermique, Disque rainuré, Ombroscopie, Traitement d'image, thermographie.

ABSTRACT

This study is based on the design and use of an experimental set-up dedicated to make visible and treat the thermal boundary layer above a heated horizontal grooved disk in ambient air. The shadowgraph technique is used in order to visualize the flow and get quantitative data. On the one hand a remotely controllable camera, installed carefully on a rail which maintains the camera with a meticulous position compared to the screen, enabled us to carry out sockets of sight in the vicinity immediate of the interface. In addition we quantified the vertical gradients of the temperature in the viscous sub-layer, with less few pixels of the upper surface of the disc thanks to a system of image processing. The results present a fine description of the evolution local structure of the flow along the convection since the viscous sub-layer until the limits of the turbulent boundary layer.

Key words: Natural convection, Thermal boundary layer, grooved Disc, shadowgraph, Image processing, thermal imaging,

1. INTRODUCTION

La convection est déterminée par le mouvement des particules élémentaires de fluide entre les zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides qui échangent de l'énergie sous forme de chaleur et de quantité de mouvement entre elles [1].

La température T varie de façon significative [2, 3] dans la couche limite thermique qui n'est suffisamment précisée.

Ce travail envisage une approche pour visualiser et dévoiler toutes les structures qui manifestent le champ de température au voisinage de la paroi et par suite le flux de chaleur φ_p à la surface. La structure de la couche limite conditionne donc le transfert thermique en proche paroi et sa compréhension est la clef de la maîtrise des échanges thermiques par convection. Pour cette raison, une description basée essentiellement sur une approche expérimentale de la couche limite sera l'objet de cet article.

2. METHODE DE VISUALISATION PAR OMBROSCOPIE

2.1. Principe Général

Le principe [1] de l'ombroscopie consiste à utiliser les variations spatiales de l'indice optique $n(T)$ comme traceur de la dépendance spatiale du champ de température T . Des variations locales de masse volumique et, par suite, d'indice de réfraction, se produisent dans tout l'écoulement non uniforme de l'air. La mise en évidence des variations locales d'indice de réfraction est possible par l'ombroscopie, laquelle constitue, de ce fait, un procédé d'étude de la convection.

2.2. Description du Dispositif

Le système (Figure 1) se compose d'une source lumineuse⁵, punctiforme mais très brillante, placée au foyer d'une lentille L . Le faisceau de rayons parallèles ainsi obtenu traverse la zone d'intérêts (plan au voisinage immédiat du disque chauffé : couche limite thermique) et vient rencontrer un écran. Il l'éclaire uniformément si la zone d'intérêt est homogène, par exemple si l'écoulement de l'air est uniforme. Si, dans le cas d'un écoulement plan, un gradient de masse volumique existe dans un tel plan mais s'il est constant sur toute la section, par ce plan, du faisceau parallèle, les rayons subiront tous la même déviation, et continueront à éclairer l'écran d'une manière uniforme [4].



Figure 1: prise de vue du banc d'essai

Imaginons maintenant que $\partial\rho/\partial x$ ne soit plus constant, c'est-à-dire que $\partial^2\rho/\partial x^2$ ne soit plus nul ; la déviation des rayons lumineux dans le plan d'écoulement ne sera plus la même pour tous les rayons. Si, par exemple, $\partial\rho/\partial x$ augmente ($\partial^2\rho/\partial x^2 > 0$), la déviation va en augmentant et les rayons divergent: l'éclairement va diminuer sur l'écran ; on aura au contraire une plage plus claire si $\partial^2\rho/\partial x^2$ est négatif. Ainsi le montage permet, par l'observation de l'éclairement de l'écran, de localiser les régions où varie le gradient de masse volumique et de connaître dans quel sens s'effectue la variation.

La méthode n'est utilisable que si la variation du gradient de masse volumique est rapide, ce qui est le cas pour notre étude.

2.2.1. Positionnement et mise au point de la caméra

Une bonne visualisation ainsi que des mesures précises nécessitent un positionnement soigneux et minutieux de la caméra et la possibilité d'ajuster les coordonnées à tout moment. Pour répondre à ce besoin, la caméra et la source lumineuse sont portées sur le même rail afin de les préserver toujours orthogonal à l'écran. Le rail permet de translater de manière linéaire la caméra vers la zone d'intérêt. Le positionnement vertical est réalisé au moyen de deux ascenseurs métriques de précision, sur lesquels est fixé le rail. Un déphasage en hauteur entre la caméra et la source de lumière est exigent pour éviter l'ombre de la caméra.

Le réglage du diaphragme de la caméra est réalisé de manière à obtenir un bon contraste entre la prise de vue de la zone d'intérêt et le bruit de fond, nécessaire pour optimiser le produit de corrélation [5].

2.2.2. Télévision

On ne peut se satisfaire d'un examen visuel dont nous avons souligné les limites liées en particulier à la fatigue de l'expérimentateur. Pour cela, la télévision, munie d'une palette riche en option, apporte une aide précieuse au contrôle visuel. La TV raccordée à la caméra via son port TV permettant une observation à distance en temps réel de ce qui se passe au dessus du disque chauffé par le biais de l'image induite sur l'écran ayant pour but d'améliorer suffisamment les contrastes de l'image d'un phénomène détecté, de façon que sa présence puisse être automatiquement signalée et enregistrée [6].

2.2.3. Traitement d'image

Le traitement d'image associé aux : (caméra numérique HD, logiciel de traitement) est indispensable. En effet, le signal vidéo sortant de toute caméra de prise de vue est pratiquement toujours bruité pour qu'un traitement analogique simple suffise à délivrer un signal défaut fiable [7, 8]. Ainsi, dans pratiquement tous les cas de visualisation optique, il faut, pour obtenir des images reconstituées de bonne qualité et envisager une détection automatique des anomalies sur celles-ci, mettre en œuvre un système élaboré de traitement d'images. Ce système a pour premier but d'améliorer la qualité de l'image sur le plan de contraste et du niveau de bruit ; il doit en second lieu très souvent prendre en compte la morphologie de l'hétérogénéité recherchée en vue de rendre l'image reconstituée parfaitement exploitable.

Ces traitements, qui peuvent être relativement complexes, ne peuvent être mis en œuvre que par voie numérique, ce qui entraîne la nécessité de disposer derrière la caméra d'un système de numérisation rapide, d'une ou plusieurs mémoires d'image (vidéo-RAM, carte CSD) et d'un mini-ordinateur adapté au traitement d'images en temps réel. Les outils mathématiques majeurs utilisés ici sont les opérateurs matriciels linéaires (filtre cardinal, filtre de Laplace), et non linéaire (filtre de Sobel, de Kirsh, de Prewitt) et statistiques (Markovien), la convolution bidimensionnelle, l'analyse fréquentielle de Fourier [9,10].

2.3. Résultats et Discussions

Avant d'aborder la phase de convection; nous avons voulu nous assurer que le régime de conduction soit établi en tout point de la surface supérieure du disque. Pour répondre à ce besoin, nous avons fait appel à la thermographie (Figure 2) pour justifier et prouver toutes les hypothèses qui peuvent être citées dans la littérature:

- * le disque intérieurement chauffé est placé dans une salle d'expérimentation dans laquelle la vitesse de l'air ambiant est faible.

- * la conduction thermique sur le disque est assez grande pour que tous les points de la surface du disque soient à la même température T_s .

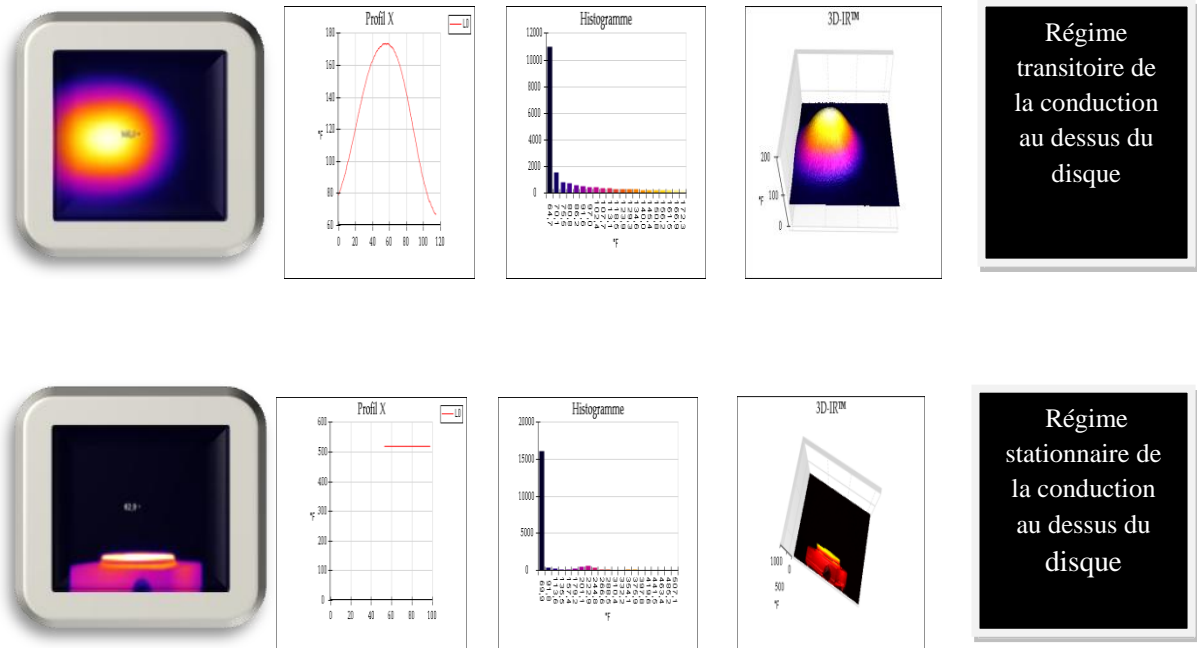


Figure 2: Suivis thermographique du disque.

3. ANALYSE DE LA CONVECTION

3.1. Structure de la couche limite thermique

Les observations dont nous avons d'abord fait état concernaient l'aspect global de la convection. Examinons maintenant ce qui se passe au dessus du disque. Une première observation fait apparaître une différence qualitative entre couches. Contrairement à la couche limite laminaire, qui ne se distingue de l'écoulement extérieur par aucun élément tangible, la couche limite turbulente apparaît séparée de l'écoulement extérieur par une interface irrégulière et fluctuante dans le temps (Figure 3). La convection est fortement tourbillonnaire dans la couche limite turbulente.

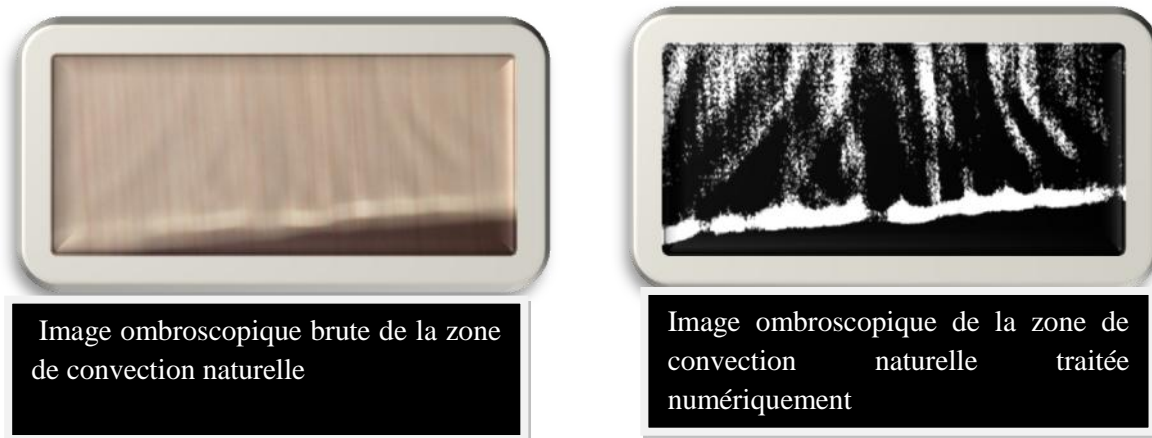


Figure 3: Observation de couches limites laminaire puis turbulente (à droite).

Mais une analyse par traitement d'images très fine permet de mettre en évidence des zones assez distinctes dans la couche limite turbulente (Figure 4).

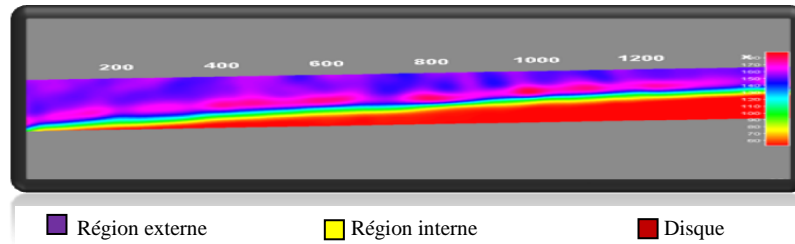


Figure 4: Structure globale de la convection

Une zone externe représente environ 90% de l'épaisseur total δ , illustrée par des jets où le gradient de température $\partial T / \partial y$ commence à faiblir, et où la distribution de la température $T(y)$ n'est guère influencée par les conditions à la paroi (elle dépend essentiellement du fluide et de l'écoulement extérieur).

L'image de la Figure 5 illustre, dans le cas d'un nombre de Prandtl inférieur à l'unité, (air dans notre cas), la distribution des températures dans une couche limite avec paroi intérieurement chauffée. la température diminue constamment lorsqu'on va de la paroi, où elle est égale à la température pariétale T_p , vers l'extérieur, elle tend asymptotiquement vers la valeur T_e de l'écoulement extérieur. La pente $(\partial T / \partial y)_p$ est négative.

Cette région est caractérisée par des jets convectifs qui apparaissent sous l'effet de la poussée d'Archimède différentielle. La morphologie de ces courants varie d'une région à l'autre, ce qui est bien illustré dans la Figure(5) représentée par une redistribution qui se traduit par l'apparition d'une circulation sous forme d'une alternance de région où l'air monte et descend. Ce rebondissement est bien illustré. Cela se traduit par la compétition entre le mécanisme d'amplification de la perturbation et le mécanisme d'amortissement combinant les effets de viscosité et de diffusion de chaleur.

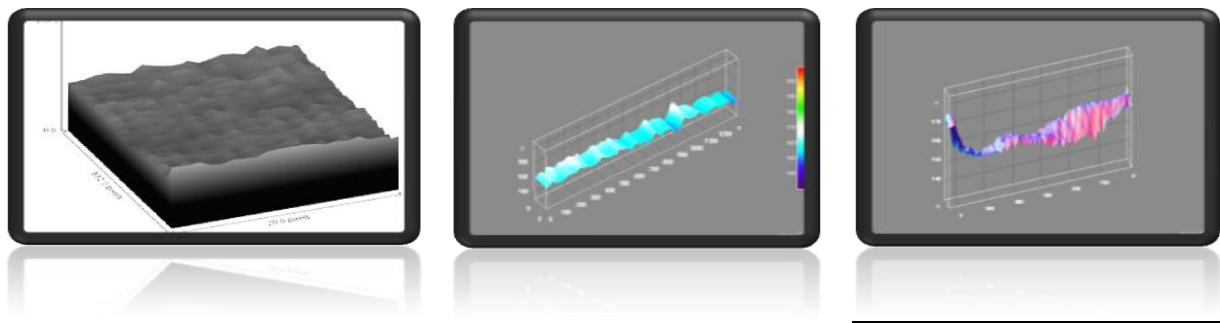


Figure 5 : Répartition bidimensionnelle de la température dans la zone externe

Une zone interne très proche de la paroi, a une épaisseur de l'ordre de quelques millimètres. A l'inverse de la couche externe, la convection dépend ici principalement des conditions à la paroi (rugosité de la surface en particulier) ainsi bien évidemment que de la nature du fluide. Dans cette zone, la loi de température $T(y)$ est dénommée loi de paroi.

Un examen attentif conduit encore à visualiser trois sous-couches dans cette couche interne. On distingue nettement deux lois de températures, l'une applicable très près de la surface, l'autre dans la partie externe de la couche interne (Figure 6).

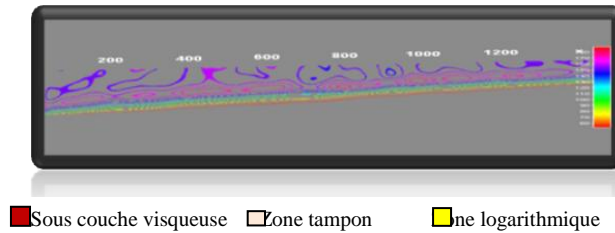


Figure 6 : Structure interne de la couche limite thermique

Les régions correspondantes sont appelées respectivement :

- La sous couche visqueuse est une zone où la viscosité moléculaire ν devient prépondérante par rapport à la viscosité turbulente ν_t qui tend vers zéro au voisinage de la paroi : en effet, la macro-échelle des structures turbulente se trouve de plus en plus limitée par la proximité de la surface matérielle. Dans cette région l'écoulement est donc laminaire. dans ce type d'écoulement les particules ne se mélangent pas et la trajectoire de chaque particule de fluide est parallèle aux autres. L'épaisseur de ce film laminaire dépend des propriétés physiques et de la nature de l'écoulement mais dans ce film le transfert fait par conduction. L'essentiel de la chute de température s'effectue dans cette couche limite qui oppose une résistance importante au passage de la chaleur,
- La zone tampon,
- La zone logarithmique constitue la partie extérieure de la couche interne. Comme son nom l'indique, la température T varie ici comme $\text{Log}(y)$. Dans cette zone, la viscosité turbulente a pris le pas sur la viscosité moléculaire.

3.2. Evolution de la région interne et externe de la couche limite

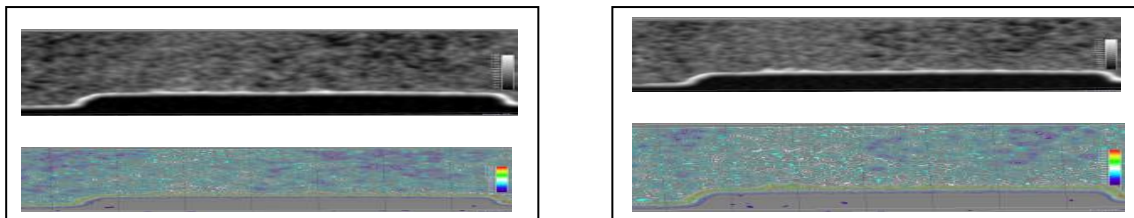


Figure 7: suivis en temps réel de la convection naturelle (les prises de vue suivantes sont capturées chaque 1/10 s).

A partir des images de la figure 7, nous pouvons déduire l'apparition des structures turbulentes (streaks) qui sont responsables du transport de la quantité de mouvement et de la température (Figure 8). L'importance des streaks est fondamentale pour le développement de la turbulence en proche paroi. Ainsi, des études numériques ont montré que la suppression des streaks provoque une réduction significative de l'intensité turbulente [11].

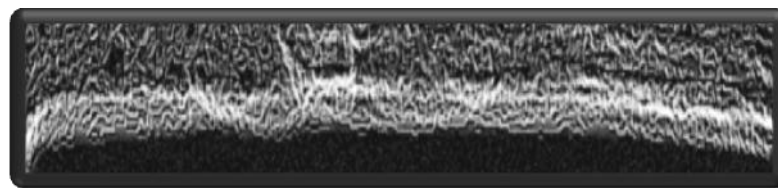


Figure 8: Génération des streaks

3.2.1. Evolution des streaks

La figure 9 montre la rapidité du phénomène puisque les prises de vues se sont faites toutes les 0.1 s .

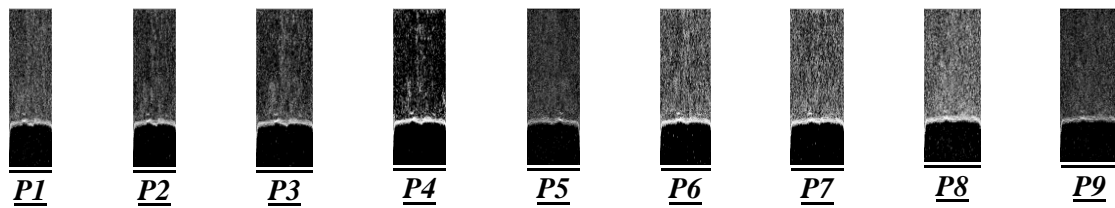


Figure 9 : Variation des streaks au cours d'une seconde

le profil de vitesse normal à la paroi dans une couche limite est convexe, tandis que les profils de vitesse pour les streaks parallèles à la paroi ont des points d'inflexion (Figure 10). Les perturbations grandissent beaucoup plus vite en présence d'un tel profil. Il est donc généralement accepté que les streaks contribuent à la génération de l'énergie turbulente. Cependant, les mécanismes de génération des streaks est toujours un sujet de discussion.

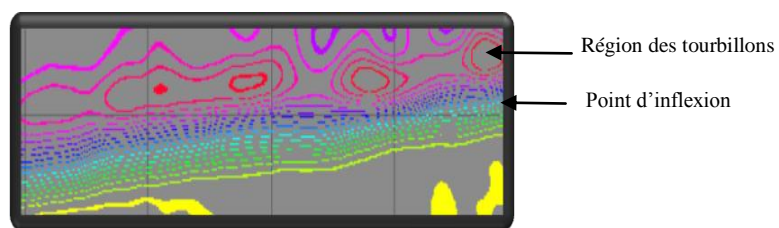


Figure 10 : Visualisation du Profil des streaks

3.2.2. Evolution du profil des streaks

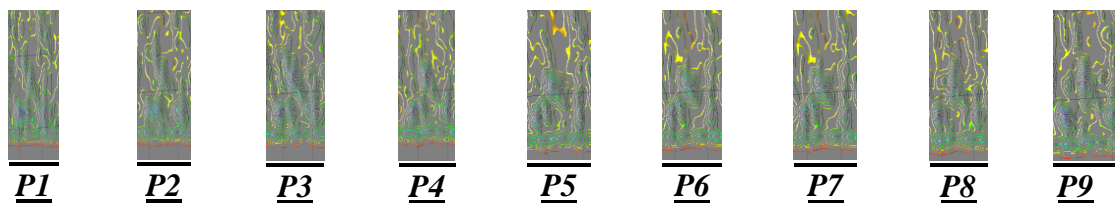


Figure 11 : Variation du profil des streaks au cours d'une seconde

L'écoulement commence à perdre son homogénéité à partir de la région tampon. Le phénomène des streaks est responsable de la génération de la plus grande partie de l'énergie turbulente dans la région logarithmique.

3.3. Passage de la zone interne vers la zone externe

Le passage de la zone interne vers la zone externe (couche de mélange) où la température varie de manière aléatoire dans le temps s'effectue par une série d'instabilités: apparition de tourbillons qui rendent la convection de plus en plus complexe. Au de la d'une température critique, de nouvelles structures apparaissent dans l'interface au cours du temps. Les trajectoires des éléments de fluides commencent à s'enrouler selon des géométries complexes mais très belles à les suivre (Figure 12).



Figure 12: Génération d'une instabilité dans la zone de passage

4. CONCLUSIONS

Le présent travail a pour objectif de fournir des informations empiriques fines sur la façon par laquelle est développée la convection naturelle sur un disque rainuré, utilisé pour des besoins domestiques (la cuisson) et le milieu extérieur (air ambiant) sans utiliser aucun moyen d'ensemencement. Afin d'atteindre ce but, nous avons mis au point un système de visualisation et de quantification des champs de température. Les premiers millimètres de la couche limite ont pu être ainsi observés via deux moyens : un moyen classique (ombroscopie) et un moyen numérique récent (traitement d'images en temps réel). Il est montré qu'il est possible de visualiser et poursuivre les masses d'air développées durant la convection (avec une échelle de temps arrivant jusqu'à 1/10 secondes et une échelle en espace en pixels) ainsi que d'explorer la structure de la couche limite thermique par le biais du traitement d'images.

References

- [1] J. Cousteix , "Turbulence et couche limite", Edition Cepadues , (1989).
- [2] T.Cebeci & J.Cousteix,"Modeling and computation of boundary layer flows" Horizons Publishing Inc, Long Beach, California-Springer, Berlin, Heidelberg New York,[188,234], (1998) .
- [3] J. Piquet, "La turbulence et sa modélisation",Edition: Ecole nationale supérieure de techniques avancées Paris, ENSTA, (1983).
- [4] L.Dettwiler, "Les instruments d'Optique : Etude théorique, Expérimentale et Pratique", Ellipses, (1991).
- [5] J.C.Miquel , "Caméra DCP", EDISCOM, (1989).
- [6] J.P.Cocquerez & S.Philipp, "Analyse d'images: filtrage et segmentation», Masson, (1995) .
- [7] M.Wetzel, "Cinématographie ultra-rapide. Caméras mécano-optique à haute résolution", R6730, traité Mesures et Contrôle, Techniques de l'Ingénieur, Edition Techniques de l'ingénieur, Paris, Avril (1993) .
- [8] N.Fleurot, " Cinématographie ultra-rapide. Caméras électroniques " R6732, traité Mesures et Contrôle, Techniques de l'Ingénieur, Edition Techniques de l'ingénieur, Paris, Avril (1993).
- [9] A.E.Gaiarsa & D.W.Capson, "Real time measurement of corner position in binary images" ,IEEE Trans, on Inst. And Meas, **43**, 567-577 (1994) .
- [10] H.Furnee, "Real-time image-based motion measurement system, image-based movement analysis" , Proceeding of the SPIE, International Society for Optics and photonics, 1356, (1990) .
- [11] B.I. Charnyshenko and M.F.Baig. "the mechanism of streak formation in near-wall turbulence", J. Fluid Mech., **544**, 99-131 (2005).