

CARACTERISATION DES ECOULEMENTS CONVECTIFS D'AIR DANS DES CAVITES A GRAND FACTEUR D'ASPECT

M. Betrouni & D. Kalache
Laboratoire de Mécanique des fluides,
Faculté de Physique, USTHB, BP 32, El Alia, Alger
Email : m_betrouni@yahoo.fr

RESUME :

Nous présentons une méthode originale de caractérisation des écoulements convectifs d'air dans des cavités parallélépipédiques de grandes dimensions.

Cette caractérisation est obtenue par interférométrie différentielle donnant accès aux isogradients de température en direction verticale ou horizontale et par thermographie infrarouge de la face supérieure froide de la cavité constituée par une plaque de verre très mince. Cette thermographie permet de dresser une carte des températures de la couche de fluide qui est en contact avec la face froide, libre de ses échanges avec le milieu extérieur. Cette méthode permet, en particulier, d'accéder à la caractérisation tridimensionnelle de l'écoulement.

Nos résultats concernent la transition vers la turbulence en cavité isotherme horizontale (face chaude et face froide) à grand facteur d'aspect vertical.

Nous donnons l'évolution dans le temps des isogradients verticaux de température pour une gamme du nombre de Rayleigh s'étendant de $Ra / Ra_c = 9$ à $Ra / Ra_c = 20$, ainsi que les spectres correspondants.

Mots-clés : convection, naturelle, Rayleigh-Bénard, expérimental, air

1. INTRODUCTION

L'amélioration du rendement des capteurs solaires plans passe notamment par la réduction des pertes de chaleur par convection naturelle. La visualisation des écoulements représente un outil expérimental complémentaire aux études théoriques.

Cette communication présente une méthode originale d'investigation des écoulements convectifs de l'air dans des boîtes horizontales chauffées par le bas à grands facteurs d'aspect. Cette méthode expérimentale utilise deux techniques :

- une technique d'interférométrie différentielle qui permet l'analyse de la convection de l'air dans le volume de la boîte,
- une technique de thermographie infrarouge qui permet une analyse superficielle de la convection de l'air en contact avec la face interne de la vitre horizontale.

2. TECHNIQUE D'INTERFEROMETRIE DIFFERENTIELLE

Un faisceau de lumière issu d'une lampe à vapeur de mercure est polarisé par un prisme de Wollaston qui sépare tout rayon incident en deux rayons émergents qui deviennent parallèles grâce à une lentille convergente. Les deux rayons parallèles traversent la veine expérimentale et sont recombinés grâce à une deuxième lentille convergente et un prisme de Wollaston croisé avec le premier.

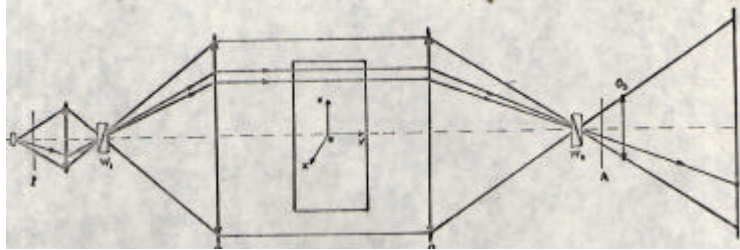


Schéma de principe de l'interférométrie différentielle

Dans la boîte, l'écoulement convectif crée un champ d'indice de réfraction $n(x,y,z)$ et les rayons subissent des différences de marche provoquant un phénomène d'interférence.

$$\Delta(x,z) = \int (n(x_1,y,z_1) dy - n(x_2,y,z_2)) dy$$

en sachant que, la masse volumique $\rho(x,y,z)$ est liée à la réfraction par la relation $n - 1 = k \rho_0 [1 - \alpha(T - T_0)]$; les franges constructives d'interférence obéiront à :

$$k \lambda / (\alpha(n-1)) = \int (T(x_1,y,z_1) dy - T(x_2,y,z_2)) dy$$

où k est un nombre entier positif..

3. TECHNIQUE D'ANALYSE DU COMPORTEMENT TEMPOREL DE L'AIR

L'étude de la convection naturelle de l'air est étendue par l'analyse du comportement temporel du champ de température : en effet, la convection naturelle stationnaire n'est que la première bifurcation qui démarre au nombre de Rayleigh critique Ra_c . Pour des $Ra > Ra_c$, il est intéressant de déterminer expérimentalement le comportement temporel du champ de température.

On remplace l'écran d'observation du montage interférométrique par un photomultiplicateur (PM) alimenté sous haute tension (1500V) en visant le centre d'un rouleau de convection. La lumière qui pénètre dans le PM représente le signal d'entrée qui est converti en signal électrique et transmis à une acquisition de données. Le résultat des mesures est un spectre physique en temps réel qui une fois traité par transformée de Fourier permet l'obtention du spectre de fréquence de la température.

L'interférométrie différentielle est donc un moyen simple pour l'analyse temporelle du champ de température de l'air en convection naturelle.

4. CARTOGRAPHIE DU CHAMP DE TEMPERATURE PAR CAMERA INFRAROUGE

Nous complétons l'étude expérimentale de la convection de l'air par l'obtention de la cartographie du champ de température de l'air en contact avec la surface intérieure de la vitre horizontale.

La chaîne de mesure se compose de :

- l'objet, source du rayonnement à étudier, et son environnement,
- milieu dans lequel se propage le rayonnement,
- système d'acquisition de l'information contenue dans le rayonnement.

La boîte expérimentale est placée dans un milieu ambiant, de température T_a considéré comme un corps noir. A l'aide de la caméra infrarouge munie d'un objectif Long Wave (sensible aux longueurs d'onde $8\mu-14\mu$), nous visons le dessus de la boîte (c'est-à-dire la couverture de verre).

L'émittance monochromatique de la vitre est la somme de trois contributions :

- la propre émission de la vitre,
- la transmission du rayonnement émis par le fond,
- la réflexion sur la vitre du rayonnement émis par le milieu ambiant

L'analyse des ordres de grandeurs des différentes contributions permet d'affirmer que le rayonnement collecté par la caméra provient de la vitre considérée comme un corps noir (l'erreur relative étant de l'ordre de 2%).

Une analyse théorique de la conduction de la chaleur dans l'épaisseur de la vitre horizontale permet d'estimer l'écart maximal de température entre la face externe de la vitre et sa face interne à 0.03°C.

Nous pouvons donc raisonnablement, dans la limite de résolution thermique de la caméra (0.1°C), affirmer que la cartographie de température obtenue en LW est tout à fait représentative de la cartographie de température de l'air en contact avec la face interne de la vitre.

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1 Configuration des écoulements (Ra=11700)

La figure 1 est l'interférogramme des isogradients de température ; il révèle les échanges thermiques entre la plaque chaude et la plaque froide. Les couches limites thermiques froide (près de la vitre) et chaude (près de la plaque de cuivre chaude) sont matérialisées par une accumulation des franges d'isogradients près des parois horizontales.

La zone du milieu de l'écoulement est une zone à faible gradient de température c'est-à-dire qu'il y a peu d'échange de chaleur à ce niveau de l'écoulement.

La figure 2 est le relief thermique correspondant à la cartographie de température de l'air au contact de la face interne de la vitre horizontale où la température est prise comme la 3^{ème} coordonnée (axe perpendiculaire à la surface de la vitre). Ce relief nous révèle une périodicité des zones d'air ascendant chaud (représentés par les crêtes de la modulation thermique) et des zones d'air descendant froid (représentés par les creux de la modulation thermique).

Nous pouvons ainsi dénombrer 8 rouleaux de convection parallèles au petit coté de la boîte. Cette périodicité de l'écoulement se voit aussi sur l'interférogramme des isogradients de température.

Les photos 3 et 4 qui sont des interférogrammes agrandis des isogradients d'une même zone de l'écoulement pour Ra=11700 et Ra=16330 resp. montrent que le nombre de franges des couches limites thermiques chaude et froide augmente avec le nombre de Rayleigh ; ce qui exprime l'augmentation des échanges thermiques de l'air avec les parois horizontales.

5.2 Caractère tridimensionnel de la convection

La thermographie infrarouge nous permet d'évaluer ce caractère tridimensionnel ; en effet, en balayant la ligne du profil de température, dans le plan horizontal xoy, parallèlement à ox, on peut connaître pour chacune de ses positions le profil de température associé et nous pouvons alors tracer le profil de température $T=f(x_0,y)$.

5.3 Analyse temporelle des interférogrammes

La figure 5 représente resp. l'enregistrement spectral du signal de sortie du PM visant le centre d'un rouleau de convection pour $Ra=9,2 Ra_c$. (la scrutation a duré 10minutes environ).

Nous notons la présence d'un oscillateur de fréquence $f_1=330mHz$ et de ses harmoniques, qui se traduit dans l'observation en temps réel des interférogrammes par une pulsation des rouleaux de convection.

La figure 6 représente le même enregistrement pour $Ra=14,7Ra_c$; il y a présence, cette fois-ci, de deux oscillateurs de fréquences $f_1=428mHz$ et $f_2=168mHz$.



Fig. 1

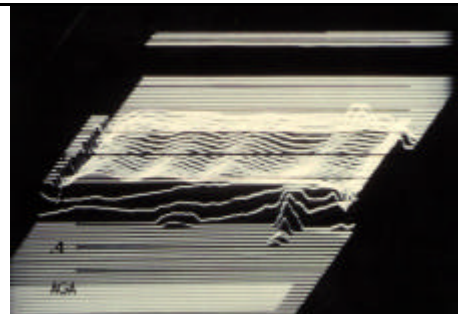


Fig. 2

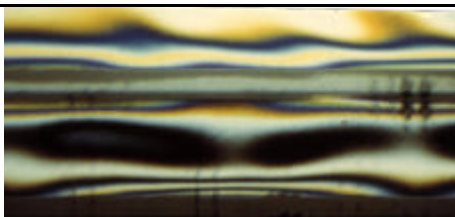


Fig. 3

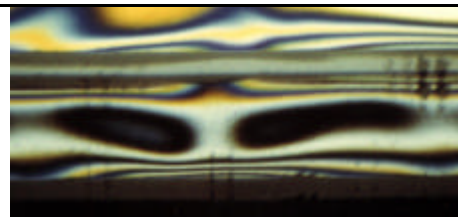


Fig. 4

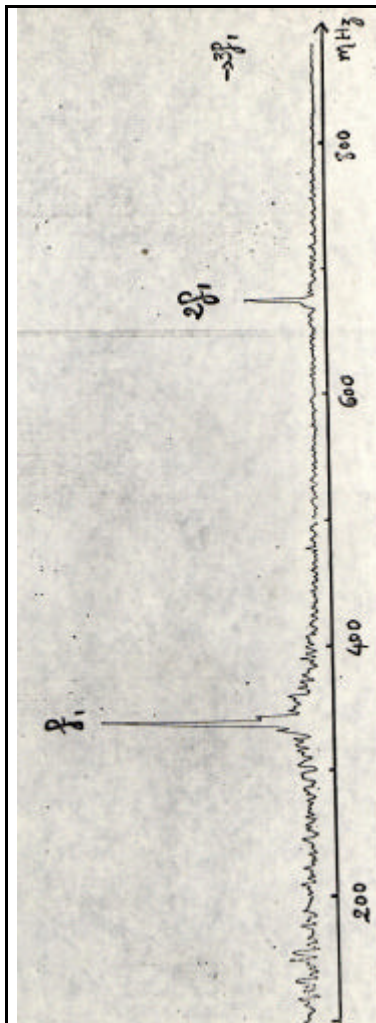


Fig. 5

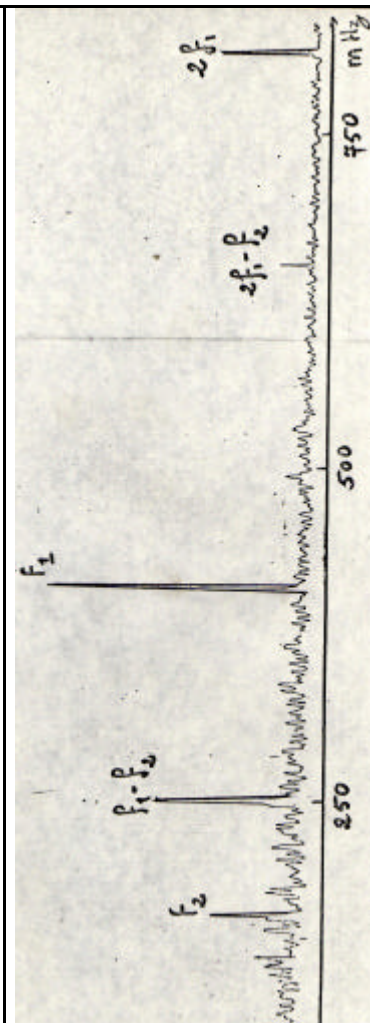


Fig. 6

REFERENCES

- [1] P. Bergé, « Study on unsteady convection through simultaneous velocity and interferometry measurements », Phy. Abstracts tome40, 19, (1979)
- [2] G. Gaussorgues, « La thermographie infrarouge », Technique et documentation, 1980
- [3] H. Oertel jr, « Three-dimensional convection within rectangular boxes », Natural convection in enclosures (ASME), HTD, vol. 8 (1980).