

Etude phénoménologique sur la convection naturelle au dessus d'un disque rainure par voie optique

Tahar Boussoukaia^{1*}, Messaoud Hamouda² et Belkacem Draoui³

¹ Laboratoire du Développement Durable et de l'Informatique, LDDI
Université d'Adrar, Algeria

² Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
01000, Adrar, Algeria

³ Laboratoire d'Energétique en Zones Arides, LEZA
Université de Béchar, Algeria

(reçu le 12 Septembre 2013 - accepté le 29 Décembre 2013)

Résumé - Parmi toutes les méthodes expérimentales, l'optique a toujours occupé une place de choix grâce à son caractère non intrusif: la traversée d'un écoulement par un faisceau lumineux n'entraîne pas de perturbation dans les conditions requises par la visualisation ou la mesure. C'est ce qui explique l'importance de la technique que nous allons décrire. Cette étude vise la mise en place d'un banc d'essai en vue de visualiser et traiter numériquement la convection naturelle induite par un disque rainuré et chauffé par le bas dans un système ouvert. La méthode de visualisation choisie est l'ombroscopie comme méthode non intrusive afin de ne pas perturber la convection. Il est utile aussi de rappeler que cette dernière technique délivre en fait des images qu'il faudra lire et éventuellement traiter. Ainsi, dans pratiquement tous les cas de contrôle optique, il faut, pour obtenir des images reconstituées de bonne qualité et envisager une vision nette, 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 du contraste et du niveau de bruit; il doit en seconde lieu très souvent prendre en compte la morphologie des objectifs recherchés afin de rendre l'image reconstituée parfaitement exploitable.

Abstract - Among all the experimental methods, optics always occupied a choice place thanks to its nonintrusive character: the line of a flow by a beam of light does not involve a disturbance under the requirements by visualization or measurement. It is what explains the importance of the technique that we will describe. This study is based on the design and use of an experimental set-up dedicated to make visible and treat the natural convection above a heated horizontal grooved disk in ambient air. The shadowgraph technique is used in order to visualize the flow and get quantitative data. It's also useful to recall that's the last technique delivers images witch will have to be read and possibly treat. Therefore, it's necessary in sight check, to implement an elaborate system of image processing in order to obtain reconstituted images of good quality and clear vision. The first purpose of this system is to improve quality of the image within contrast and noise level, it must in the second place very often, take into account the morphology of the required objectives in order to make the image reconstituted perfectly exploitable.

Mots clés: Convection naturelle - Disque rainuré – Ombroscopie - Traitement d'image.

1. INTRODUCTION

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un

* Tboussoukaia@gmail.com

fluide. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas, l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement. [1]

Parmi toutes les méthodes expérimentales, l'ombroscopie a toujours occupé une place de choix grâce à son caractère non intrusif: la traversée d'un écoulement par un faisceau lumineux nous permet de percevoir la présence et le comportement des courants convectifs par des manifestations indirectes naturelles. Toutes les techniques optiques sont fondées sur la mise en évidence ou sur l'amplification de ces manifestations. La mesure optique est une méthode de mesure utilisant la lumière pour quantifier des distances, des déformations et des déplacements. On distingue les mesures utilisant des cibles optiques placées sur le sujet, des mesures utilisant du traitement d'images à partir d'images ou de vidéos du sujet. Alors que les cibles optiques sont largement utilisées depuis le milieu des années 1990, la deuxième méthode restait expérimentale au milieu des années 2000. [2]

L'objectif de l'étude est de caractériser expérimentalement la convection naturelle générée par un disque rainuré, chauffé par le bas, et à axe vertical dans un système ouvert (air ambiant). Pour cela, un moyen de visualisation et de traitements en temps réel est mis en place.

2. METHODE DE VISUALISATION PAR OMBROSCOPIE

2.1 Principe général [1]

Le principe 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 . par exemple, un indice optique périodique dans le domaine où se développe la convection conduit à une déviation périodique d'un faisceau de lumière initialement parallèle. Sous certaines conditions, l'on peut récupérer en aval sur un écran un signal dont l'intensité reproduira la dépendance spatiale de la température. Les courants convectifs ascendants ont une dépendance spatiale selon les grandes directions verticales et il est naturel d'éclairer le domaine de convection par un faisceau de lumière parallèle vertical.

L'indice de réfraction d'un milieu transparent pour une radiation de longueur d'onde λ est lié à la masse volumique ρ de ce milieu par la relation de Lorentz:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = b \times \rho \quad (1)$$

Où la grandeur b ne dépend que de la longueur d'onde λ et du milieu considéré.

Dans le cas de l'air, l'indice n est très voisin de l'unité et la relation précédente (1) devient la loi d'Aragot-Biot:

$$\frac{n - 1}{\rho} = \frac{3}{2} \times b \quad (2)$$

Introduisons la masse volumique normale ρ_n (température, zéro degré Celsius, pression, 76 cm de mercure), la loi (2) s'écrit:

$$n - 1 = k \times \rho / \rho_n \quad (3)$$

Où k est un nombre sans dimension qui ne dépend que du milieu transparent et de la longueur d'onde.

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.

3 ETUDE EXPERIMENTALE

3.1 Description du dispositif (Fig. 1)



Fig. 1: Prise de vue du banc d'essai

Le système se compose d'une source lumineuse S , punctiforme mais très brillante, est placé au foyer d'une lentille L . le faisceau de rayons parallèles ainsi obtenu traverse les zones d'intérêts 'plan au voisinage immédiat du disque chauffé: couche limite thermique, la région correspond au régime laminaire et l'amorçage du régime turbulent) et vient rencontrer un écran.

Un examen visuel direct de l'image qui vient d'apparaître sur l'écran (belle à voir) peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des hétérogénéités locales et superficielles développée sur le plan vertical du disque. Toutefois, l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont, parmi les principaux la visualisation automatique par traitement d'images. D'où la nécessité d'une caméra télécommandable à distance et un TV.

3.1.1 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 ces

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.

3.1.2 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 control 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 ou enregistrée.

3.1.3 Traitement d'image

Le traitement d'image associé à la 'caméra numérique HD, ainsi qu'au 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. Un simple seuillage en amplitude par exemple est souvent inefficace, conduisant à un taux de fausses alarmes prohibitives.

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 prendre très souvent 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,...) d'un mini-ordinateur adapté au traitement d'images en temps réel.

Les outils mathématiques utilisables sont nombreux et variés, nous nous contenterons de mentionner ici 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,...etc.

Après seuillage, les traitements s'effectuent sur une image binaire et mettent en œuvre les outils de la morphologie mathématique, tels que, par exemple, les opérations de rétraction-dilatation, squelettisation ou pontage-fermeture. Des corrélations entre images peuvent aussi être utilisées afin d'aboutir à la reconnaissance et éventuellement à la classification des anomalies recherchées.

3.2 Résultats expérimentaux

Les figures 2 et 3 représentent l'ombre du disque, ainsi que les masses d'air déplacées par convection sur l'écran placé à une distance bien calculée. Cette image illustre la concentration de la lumière au dessus du disque sous la forme d'une mince bande lumineuse. Ce phénomène optique est dû aux effets de la réfraction sur les rayons lumineux et permet de matérialiser la frontière de la couche limite thermique. Ainsi le montage permet, par l'observation de l'éclaircissement de l'écran, de localiser les régions où varie le gradient de masse volumique et de connaître dans quel sens s'effectue la variation.



Fig. 2: Image ombroscopique temporelle brute

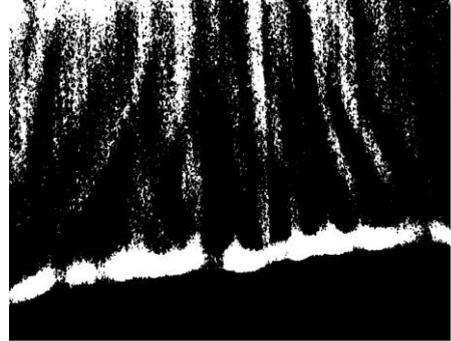


Fig. 3: Image ombroscopique traitée

Essayons de décrire de façon purement phénoménologique le comportement temporel de la perturbation de température qui conduit à l'établissement de l'image de la figure 2.

L'image illustre un mécanisme très intuitif. L'air au repos subit une fluctuation de température, la densité varie et s'accroît quand on s'élève dans le fluide: cette situation est potentiellement instable, car dans le champ de pesanteur, la tendance naturelle est de mettre le lourd en bas et le léger en haut. Cette redistribution 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 dans la figure 4.

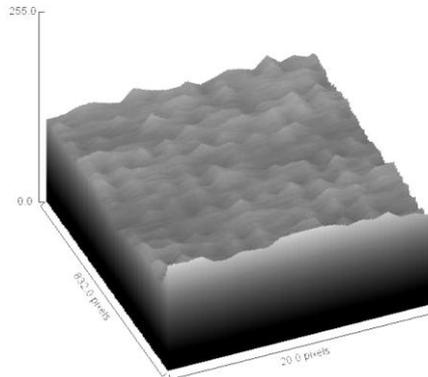


Fig. 4: Plot 2D de la zone de convection

Ces régions sont caractérisées par des courants convectifs qui apparaissent sous l'effet de la poussée d'Archimède différentielle. la morphologie de ces courants varie d'une région à l'autre, selon la verticale (Fig. 7 et 8) et l'horizontale (Fig. 5 et 6). 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.

Si l'écart de température appliqué entre le disque et le milieu ambiant est trop petit, l'accélération vers le haut est faible et les processus dissipatifs l'emportent. La couche d'air retourne à son état de base. Quand l'écart de température augmente, le mécanisme déstabilisant augmente d'intensité. Il finit par l'emporter au-delà d'un écart critique ΔT_c , appelé seuil de convection. L'expérience montre que, suffisamment près de seuil, cette circulation s'organise en courants de longueur h qui représente la hauteur de la couche d'air, sur laquelle les trajectoires de ces courants deviennent tous parallèles à la verticale et asymptotique.

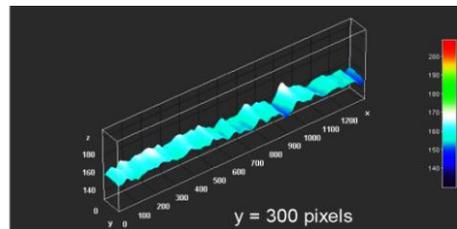
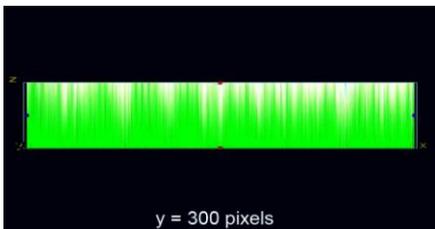
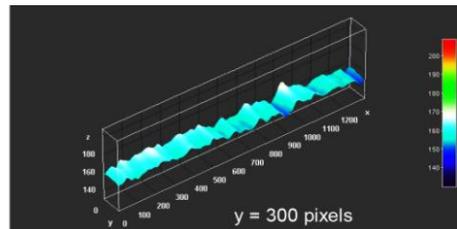
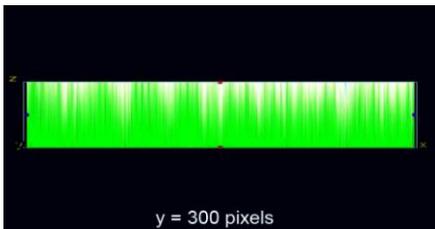
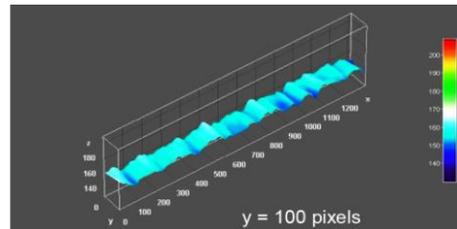
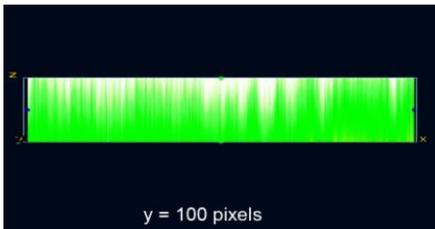
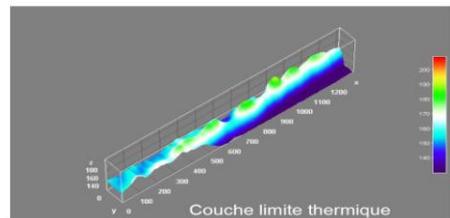
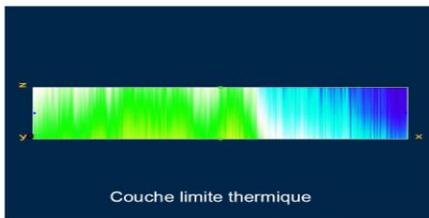
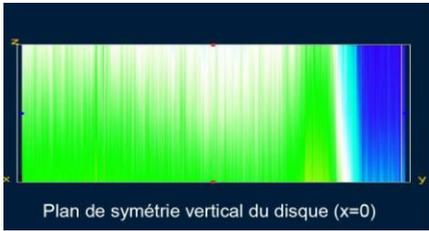


Fig. 5: Echantillons temporels pour la répartition horizontale de l'intensité lumineuse le long de la zone de convection

Fig. 6: Echantillons temporels pour les profils horizontaux de l'intensité lumineuse le long de la zone de convection



Gauche/Plan de symétrie

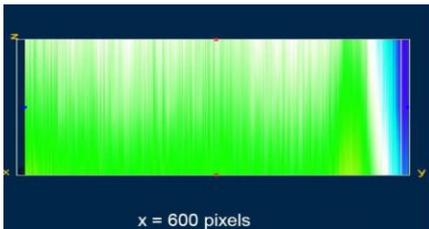
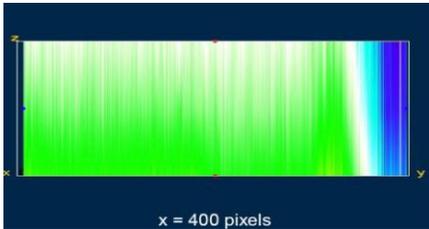
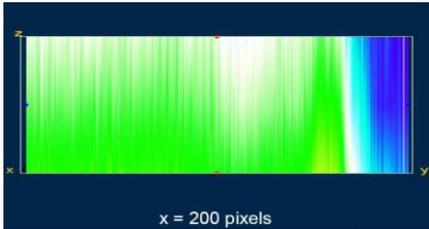
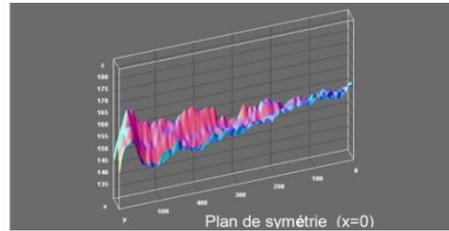
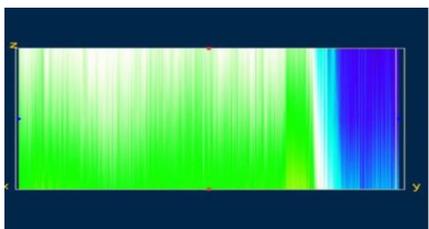


Fig. 7: Echantillons temporels pour la répartition verticale de l'intensité lumineuse le long de la zone de convection à gauche du plan de symétrie du disque

Droite/Plan de symétrie



Gauche/Plan de symétrie

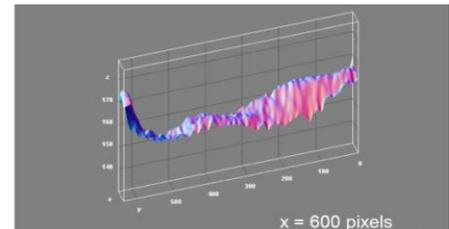
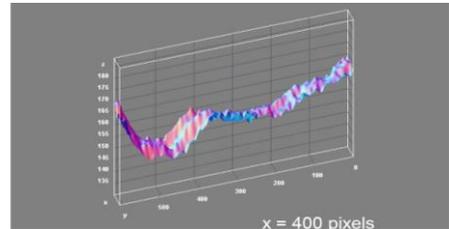
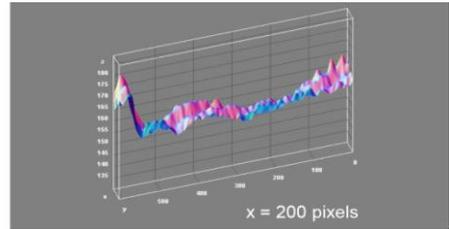
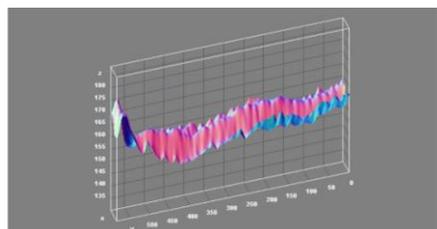


Fig. 8: Echantillons temporels pour les profils verticaux de l'intensité lumineuse le long de la zone de convection à gauche du plan de symétrie du disque

Droite/Plan de symétrie



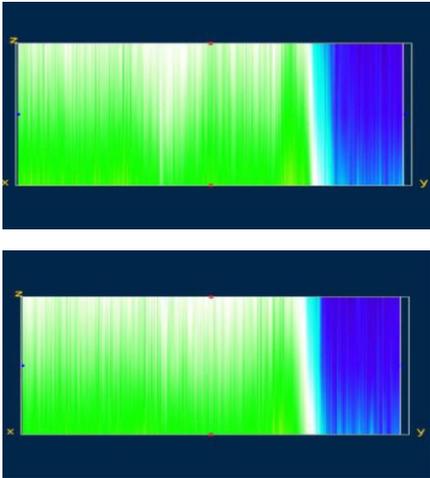


Fig. 9: Echantillons temporels pour la répartition verticale de l'intensité lumineuse le long de la zone de convection à droite du plan de symétrie du disque

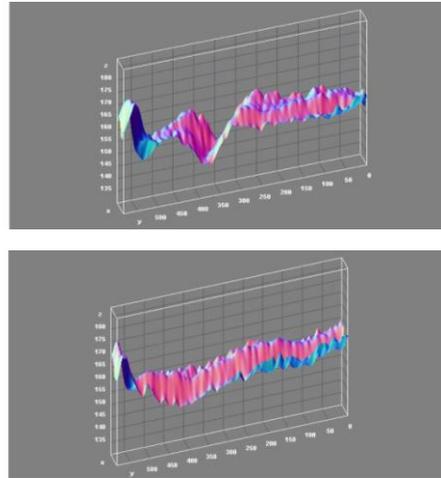


Fig. 10: Echantillons temporels pour les profils verticaux de l'intensité lumineuse le long de la zone de convection à droite du plan de symétrie du disque

Autrement dit, appelant x la direction perpendiculaire au plan des courants convectifs, il semble légitime, selon la figure 11, de représenter le champ de vitesse verticale associé aux courants sous la forme [2]:

$$V_z = X(t) \times f_v(z) \times \sin(k \times x) \quad , \quad k = 2\pi/h \tag{4}$$

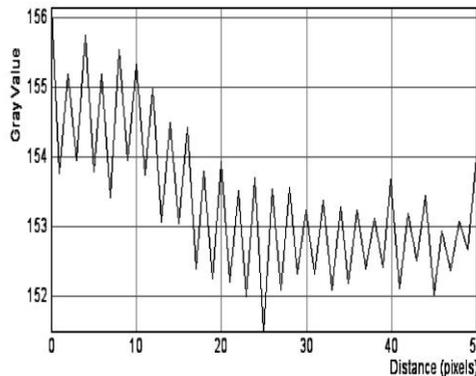


Fig. 11: Profil temporel vertical de la vitesse

Dans cette expression, la périodicité en x a été explicitée et la dépendance spatiale séparée de la dépendance temporelle. La forme analytique de $f_v(z)$ est sans importance bien que calculable. La variable $X(t)$ mesurant l'intensité de la convection est donc supposée rendre compte de la dépendance temporelle.

Pour ce qui est de la fluctuation de vitesse associée, le mécanisme illustré dans la figure 11 suggère fortement d'admettre une dépendance horizontale en phase avec celle de $v(z)$, i.e. $\sim \sin(kx)$. Naturellement, les deux perturbations (température et vitesse)

sont couplées, mais cette fois-ci, essayons de décrire de façon purement phénoménologique le comportement temporel de la perturbation de vitesse qui conduit à l'établissement des courants convectifs décrits par la relation (4).

En dessous du seuil, celle-ci est amortie, tandis qu'au-dessus elle est amplifiée. Son taux de croissance σ passe donc de valeurs négatives ne optique des valeurs positives lorsque l'écart de température ΔT , le paramètre de contrôle de notre problème, atteint puis dépasse la valeur critique ΔT_c .

Définissons un paramètre de contrôle réduit:

$$r = \frac{\Delta T - \Delta T_c}{\Delta T_c} \tag{5}$$

L'évolution de X , amplitude de la perturbation, est alors décrite par:

$$\frac{d}{dt} X = \sigma \times X \tag{6}$$

Où σ est à priori fonction de r .

En $r = 0$, c'est-à-dire au seuil $\Delta T = \Delta T_c$ les perturbations ne sont ni amorties ni amplifiées et $\sigma = 0$.

Pour r suffisamment petit, on peut se contenter du premier terme d'un développement de σ en puissance de r soit:

$$\sigma = r / \tau_0 \tag{7}$$

Où τ_0 , homogène à un temps, caractérise l'évolution naturelle des fluctuations.

L'équation (7) assortie de (6) décrit, selon le signe de r , l'amortissement ou l'amplification de petites perturbations initiales. Lorsque r est négatif, celles-ci régressent et l'état de base correspond à la solution triviale $X = 0$ est stable, sinon il est instable. Cette évolution des perturbations est exponentielle, ce qui est justifié par la figure 12.

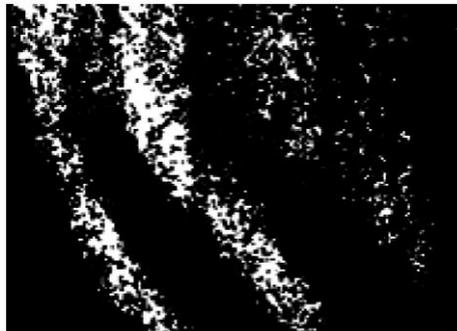


Fig. 12: Région exponentielle

Autant dire que, si elles sont amplifiées, elles ne restent pas longtemps petites et qu'il va falloir tenir compte des effets non linéaires.

Réduisant la fonction X au premier terme significatif de son développement en puissance de X , on obtient:

$$\tau_0 \times \sigma_{\text{eff}} = r - g \times X^2 \quad (8)$$

où la constante g est homogène à $1/X^2$, ce que l'on peut formaliser en écrivant:

$$g = 1 / \bar{X}^2$$

avec \bar{X} représente une certaine amplitude caractéristique, mesurant l'intensité des couplages non-linéaires. Lorsque la convection se développe, la chaleur transportée par les courants convectifs augmente au détriment de celle transportée par le flux conductif. Or le mécanisme d'instabilité résulte de la poussée d'Archimède différentielle dans le gradient admettra sans difficulté que le taux de croissance effectif se trouve diminué par le développement du mode d'instabilité, ce qui correspond à $g > 0$ avec les notations introduites par la formule 5.

Le modèle non linéaire décrivant la convection au voisinage du seuil va donc s'écrire:

$$\begin{aligned} \tau_0 \frac{d}{dt} X &= F_r(X) \\ &= r \times X - g \times X^3 \end{aligned} \quad (9)$$

L'expression F_r définit sur l'espace des phases, un champ de vecteurs qui rend compte de la dynamique du système dans cet espace. Son étude, élémentaire, est en voie de finalisation.

4. CONCLUSION

Cette contribution expérimentale présente une grande concordance avec les résultats publiés dans les références [1, 5] et la description théorique de la convection naturelle éditée par Manneville [3]. L'expérience a montrée et la théorie a justifiée l'allure de la distribution de la température, dans les plans parallèles et verticaux au disque, sous forme des régions alternées. Cette initiative apporte un complémentaire aux résultats obtenus par des méthodes numériques qui illustrent le champ de température sous formes des droites parallèles au disque.

REFERENCES

- [1] E.A. Brun, A.M. Lagarde et J. Mathieu, '*Mécanique des Fluides*', Tome I et III, Deuxième Edition, Dunod, Paris, 1968 et 1970.
- [2] V. Baecker, '*Image Processing and Analysis with Image J and MRI Cell Image Analyzer*', Montpellier RIO Imaging, 2010.
- [3] P. Manneville, '*Dynamique Non-Linéaire et Chaos*', Paris VI - Ecole Polytechnique.
- [4] W. Merzkirch, '*Flow Visualization*', Academic Press, New York, 1974.
- [5] W. Hauf and U. Grigull, '*Optical Methods in Heat Transfer*', in Advances in Heat Transfer, Vol. 6, pp. 134 – 360, J.P. Hartnett and T.F. Irvine, Jr., Eds., Academic Press, N.Y, 1970.
- [6] M. Cagnet, '*Optique Instrumentale, Aberration*', Cours, Ecole Supérieure d'Optique, 1995.

- [7] L. Dettwiller, 'Les instruments d'Optique: Etude Théorique, Expérimentale et Pratique', Edition Ellipses, 256 p., 1997.
- [8] J.L. Meyzonnette, '*Radiométrie et Sources non Cohérentes*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Electronique, E 4010, 24 p., 1995.
- [9] M. Henry, '*Optique Géométrique*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Sciences Fondamentales, A 190, 17 p., 1981.
- [10] C. Véret, '*Enregistrement Rapide des Images. Introduction*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, R 6728, 1993.
- [11] J.C. Miquel, '*Caméras DCP*', EDISCOM, 1989.
- [12] M. Wetzel, '*Cinématographie Ultra-Rapide. Caméras Mécano-Optiques à Haute Résolution*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, R6730, 1993.
- [12] N. Fleurot, '*Cinématographie Ultra-rapide. Caméras Electroniques*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, R6732, 1993.
- [13] J.C.Miquel, 'L'Observation en Vidéo Rapide (de 50 à 25000 Trames par Seconde)', Technologie & Documentation, Lavoisier, 1985.