

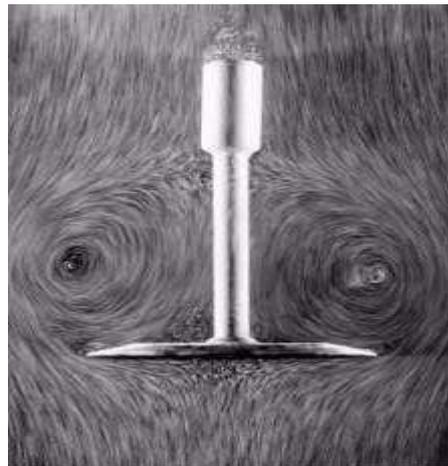
Centre des Sciences et Technique, Ait Melloul

Filière : SMP

PARCOURS : PHYSIQUE FONDAMENTALE

RAPPORT DU PROJET DE FIN D'ÉTUDES

*Revue bibliographique sur la métrologie thermique
Application à la simulation et visualisation de la couche
limite thermique au-dessous d'un cylindre verticale*



Présenté par :

*BERRANE OUMAIMA
EL BHAOUI HANANE
ZAKAR KHALID*

Soutenu le **28 \ 05 \ 2018** devant la commission d'examen :

Pr. **ES-SALHI ES-SAID** EST, LÂAYOUNE

Examineur

Pr. **EL OUARDI EL MOKHTAR** FPT, CST, AIT MELLOUL

Encadrant

A. U. 2017-2018

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Avant d'entamer ce rapport, nous profitons de l'occasion pour remercier tout d'abord notre encadrant Monsieur El Mokhtar El OUARDI qui n'a pas cessé de nous encourager pendant la durée du projet, ainsi pour sa générosité en matière de formation et d'encadrement. Nous le remercions également pour l'aide et les conseils concernant les missions évoquées dans ce rapport, qu'il nous a apporté lors des différents suivis, et la confiance qu'il nous a témoigné.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons aussi à remercier monsieur le coordinateur de la filière de physique à campus universitaire AIT MELLOUL : Dr Ahmed TIRBIYINE ainsi que tout le personnel et les enseignants de la filière pour leur soutien inestimable.

A tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous

DÉDICACE

Nous dédions ce travail à :

Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens
tout le long de notre vie scolaire.

Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout
possible pour nous aider.

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

Nos cher ami(e)s, et enseignants.

Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

Résumé

Ce travail de mémoire, a pour but de comprendre le comportement aérodynamique de l'écoulement du fluide autour des obstacles cylindrique vu leurs larges applications industrielles dans plusieurs domaines. Pour avoir plus d'information sur le phénomène de l'écoulement bidimensionnel et tridimensionnel en régime laminaire et turbulent pour un fluide incompressible avec ou sans transfert de chaleur, la simulation numérique est une voie assez importante de la maîtrisé.

De ce fait, les techniques optiques constituent les outils les plus utilisés en mécanique des fluides anisotropes. Leur avantage majeur réside dans le fait qu'elles rendent certaines propriétés du champ d'écoulement directement accessibles à la perception visuelle sans aucune perturbation du milieu. Le principe de cette métrologie consiste à quantifier les modifications que subit une onde électromagnétique lors de sa traversée de l'écoulement soumis à l'observation.

L'objectif de ce travail est de comprendre le principe de fonctionnement de quelques techniques de visualisation, de faire un aperçu sur les méthodes de simulation et de simuler la trajectoire d'un faisceau laser au-dessus d'un cylindre chauffé en utilisant l'équation d'iconale couplé avec l'équation de Gladstone -Dale.

Il en résulte que la confrontation des lois de la conservation avec l'observation expérimentale montre un très bon accord et explique l'existence d'une caustique induite par la couche limite thermique qui joue le rôle d'une lentille.

Mots Clés : Transfert de chaleur, couche limite thermique, lentille thermique, simulation numérique laser, indice de réfraction, équation eikonale (iconale) de l'optique géométrique

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	2
I. Méthodes de visualisation optiques :	3
1. Présentation des différentes méthodes :	3
2. Etude bibliographique :	4
II. Description et principe de fonctionnement de quelques techniques optiques de visualisation :	6
1. Holographie	7
2. Interférométrie	7
3. Thermographie	7
4. Vélocimétrie à Laser Doppler (LDV Laser Doppler Velocimetry)	7
5. Radiométrie	8
6. Tomographie	8
7. Convection thermique et l'Ombroscopie	8
8. Strioscopie	9
9. Vélocimétrie par Images de Particules	9
10. Granulométrie par diffraction	9
CHAPITRE II : LA MÉTROLOGIE THERMIQUE	10
1. Grandeurs mesurées	11
2. Classification des méthodes de mesure	11
3. Différents types de mesure	12
CHAPITRE III : ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT ET DE TRANSFERT DE CHALEUR AU-VOISINAGE D'UN CYLINDRE CHAUFFÉ	13
I. Aperçu sur la mécanique des fluides	14
II. Aperçu sur la thermique	14
III. Mesure de la température au voisinage d'un cylindre	15
1. Etude expérimentale	15
2. Visualisation de la couche limite thermique par ombroscopie	17
IV. Aperçu sur la simulation numérique	19
1. Equations du modèle	19
2. Résultats de la simulation	20
CHAPITRE IV : SOLUTION ANALYTIQUE AXISYMETRIQUE (2D) DE L'ÉQUATION D'ICONALE	26
SYNTHESE & DISCUSSIONS	28
CONCLUSION GÉNÉRALE	29
PERSPECTIVES	Erreur ! Signet non défini.
Bibliographie	30

PRINCIPALES ABREVIATIONS ET NOTATIONS

Symbole	Nomenclature	unité
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
K	Constante de Gladstone-Dale	m^3 / kg
l	Position de l'écran d'observation	m
M	Masse molaire	$kg.mole^{-1}$
n	Indice de réfraction du milieu	-
P	Pression	Pa
r, z	Coordonnées cylindriques	m
δ	Epaisseur de la couche limite	
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits = 8.314	$J/mole.K$
R_D	Rayon du cylindre = 19.75	mm
s	Abscisse curviligne	m
\vec{s}	Vecteur position	-
T	Température du gaz	K
T_D	Température du disque = 420	$^{\circ}C$
V_r	Vitesse radiale	$m.s^{-1}$
V_z	Vitesse radiale	$m.s^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	$kg.m^{-1}.s^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
G	Accélération	$m.s^{-2}$
Re	Nombre de Reynolds	-

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Dispositif expérimental d'ombroscopie a faisceau parallèle (Tropea et al. (2006)) ...</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2: Chaîne de mesure.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 3: Illustration de l'expérience de Reynolds. (a) régime laminaire, (b) régime transitoire, (c) régime turbulent (Reynolds, 1883)</i>	<i>14</i>
<i>Figure 4: Schéma de la méthode de stéréovision adoptée pour la visualisation du phénomène</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5: Image d'un résultat obtenu après post-traitement d'une image déformée</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6: Mise en place pour l'analyse de l'ombre de la couche limite thermique.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 7: Photographie de l'objet porté a la température de 420°C, l = 1.71 m</i>	<i>18</i>
<i>Figure 8: Photographie de l'objet porte a la température de 420°C, l = 2.48 m</i>	<i>19</i>
<i>Figure 9: Les lignes de courant de l'écoulement autour de cylindre à 420°C.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 10: Les isothermes autour de cylindre à 420°C de 40 à 400°C avec un pas de 80°C.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 11: Schématisation de la couche limite thermique établie sous le cylindre</i>	<i>21</i>
<i>Figure 12: Profil radial de la température sous le cylindre pour plusieurs cotes (z=cst).....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 13: Profil axial de la température sous le cylindre pour (r=0)</i>	<i>22</i>
<i>Figure 14: Distribution radiale de l'indice de réfraction sous le cylindre pour plusieurs cotes (z = cst).....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 15: Interprétation qualitative du comportement optique de la couche limite thermique</i>	<i>23</i>
<i>Figure 16: Schéma de la déviation des rayons lumineux réfractés dans un milieu a gradient d'indice.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 17: Schéma de la trajectoire des rayons lumineux réfractés sous le cylindre a \ - gradient d'indice axial- b \ -gradient d'indice radial.....</i>	<i>24</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Différentes méthodes optiques de visualisation.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau 2: Variation des propriétés thermophysiques de l'air en fonction de la température.....</i>	<i>20</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les phénomènes thermo-convectifs s'appuient sur les outils de la mécanique des fluides et des transferts thermiques, qui adoptent une démarche phénoménologique pour établir et résoudre les équations de Navier-Stokes couplées à l'équation de l'énergie. Cette voie de simulation assez compliquée et associée à de nombreuses corrélations. Pour cela, dans l'industrie comme dans les laboratoires de recherche, les mesures sans contacts (mesures non destructives) deviennent de plus en plus sophistiquées. On parle de la métrologie qui est une science de la mesure, elle se base essentiellement sur l'optique géométrique, ces techniques nous permettent de visualiser les champs d'écoulement et thermique au voisinage d'un corps chauffé. Cette science de la métrologie est la science de la mesure associée à l'évaluation de son incertitude. Le métrologue s'intéresse à la qualité des mesures et en particulier à deux facteurs. Le premier de ces facteurs est de s'assurer du raccordement de la mesure à des étalons de référence. Le deuxième facteur de la qualité de la mesure est celui du calcul de l'incertitude. Pour évaluer les sources d'incertitude de mesure on utilise communément la méthode dite des 5M; soit que le résultat de mesure peut être altéré par: le moyen, instrument de mesure; le milieu, l'environnement dans lequel la mesure est faite; la matière ou ses propriétés mécaniques; la main d'œuvre, c'est à dire la personne qui mesure et la méthode utilisée.

Les écoulements autour des objets est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique. Ils sont indispensables dans la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composants électroniques, les aubes de turbines et les formes géométriques à section carrée et circulaire. L'identification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt d'actualité dans divers domaines.

Dans le domaine de la modélisation des transferts thermiques entre une paroi et un fluide, la connaissance des caractéristiques de la couche limite thermique et de la répartition de température est une étape fondamentale afin de tester la validation des modèles numériques. Cependant, une telle expérimentation n'est pas simple en général. En effet, il s'agit de mesurer des grandeurs locales dans un écoulement convectif sensible aux perturbations extérieures.

Le travail, présenté dans ce mémoire, est composé de quatre chapitres:

Le premier présente une revue bibliographique en faisant un aperçu sur les méthodes de visualisation optiques et/ou ainsi que la description et principe de fonctionnement de ces techniques.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la métrologie thermique comme science de mesure, en focalisons notre vue aux méthodes de mesure non destructives.

Le troisième chapitre de ce manuscrit rapporte l'étude de l'écoulement et de transfert de chaleur au voisinage d'un cylindre chauffé.

Dans le quatrième chapitre on propose une solution analytique axisymétrique (2D) de l'équation d'onde dans l'objectif d'étudier la variation de l'indice de réfraction et la température au-dessus d'un cylindre chauffé.

Enfin nous terminerons par une analyse, discussion, conclusion générale et perspectives.

Tout ceci dans une optique d'amener une stratégie de correction efficace des erreurs.

Chapitre I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I- Méthodes de visualisation optiques

La recherche est liée directement à l'évolution de la technologie; et c'est ce qui pousse les chercheurs à avancer dans des cas très compliqués et d'actualité susceptibles d'être traités à l'aide d'un outil informatique très puissant et avec des moyens expérimentaux les plus sophistiqués et les plus performants. L'augmentation des possibilités techniques des ordinateurs en tant que « data processing » a engendré un renouveau dans les techniques optiques dans de nombreux domaines tels que la mécanique, ou l'ingénierie chimique. Les méthodes optiques ont une grande tradition dans les transferts de chaleur et de masse et dans la dynamique des fluides.

Nous allons donc présenter différentes méthodes optiques, permettant de visualiser et de quantifier les gradients d'indice de réfraction. En effet, la mesure doit impérativement être faite sans contact car toute intrusion engendrerait une perturbation de l'écoulement du fluide.

1. Présentation des différentes méthodes :

On peut retrouver les différentes méthodes optiques de visualisation dans de très nombreuses applications (Tab.1) Une recherche bibliographique a permis de recenser les techniques suivantes, d'autres références étant données dans le corps de la section.

Technique	Effet physique	Application	Dimension	Temps-réel
Strioscopie et ombroscopie	Déviaton de la lumière	Transfert de chaleur et de masse	2D (intégré)	oui
Strioscopie orienté vers l'arrière-plan (BOS)	Déviaton de la lumière	Température, densité, concentration	2D (intégré)	oui
Holographie	Holographie	Taille des particules, vitesse	3D	non
Interférométrie	Changement de la vitesse de la lumière	Transfert de chaleur et de masse	2D (intégré)	Oui
Vélocimétrie à Laser Doppler (LDV)	Diffusion de Mie	Taille des particules, vitesse, débit	Ponctuel	Oui
Phase Doppler Vélocimétrie	Diffusion de Mie	Taille des particules, Vitesse, débit	Ponctuel	Oui
Diffusion de lumière dynamique	Diffusion de Rayleigh	Température, densité	Ponctuel - 2D	oui
Diffusion de Raman	Diffusion de	Concentration	Ponctuel -	non

	Raman	molaire, température	2D	
Fluorescence induite par laser	Fluorescence	Concentration, température	Ponctuel - 2D	non
Absorption	Absorption	Concentration, température	Ponctuel - 2D (intégré)	Oui
Pyrométrie	Radiation thermique	Température	1D (intégré)	Oui
Thermographie	Radiation thermique	Température, flux pariétaux	2D (intégré)	oui
Vélocimétrie par image de particules (PIV)	Entrainement des particules par le fluide	Vitesse	2D	non

Tableau 1: Différentes méthodes optiques de visualisation

Comme le montre le tableau 1, plusieurs des paramètres peuvent être mesurés par plus d'une méthode. Il est donc important de faire un choix judicieux sur la bonne technique à utiliser. C'est dans cet objectif, les utilisateurs font une présentation des méthodes qu'ils s'intéressent afin d'en dégager les avantages et les inconvénients.

2. Etude bibliographique :

Afin d'élargir nos connaissances dans ce domaine, nous avons fait une lecture des autres auteurs qui se résument comme suit :

Guojon-Durand et al (2001) ont étudié l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre animé d'un mouvement de rotation oscillante autour de son axe. Ils ont confirmé que pour certaines valeurs de la fréquence d'oscillation, il ya lieu d'une réduction de l'instabilité hydrodynamique. Et par la suite, ils ont modifié l'écoulement moyen en fonction de certains paramètres mécanique de structure du corps [(G.Durand, 2001)].

D. Calluad et al (2001) ont mené une étude expérimentale et numérique de l'écoulement laminaire d'un fluide autour d'un obstacle de section carrée disposé sur une plaque plane. La mesure de l'écoulement est faite par PIV (Particle Image Velocimetry). La confrontation des deux méthodes ont données les mêmes résultats qui se manifestent par la topologie de l'écoulement, les lignes de séparation, le lâchage tourbillonnaire. A part, une légère formation de tourbillons verticaux lâchés au-dessus du cube s'avère un peu plus grand que celle faite par l'expérience [(D.Calluad, 2001)].

Madani et Abidat (2002) Ont proposé un algorithme pour la résolution des équations de Navier-stokes, qui utilise une combinaison de deux schémas aux différences finies d'ordre $O(h^2)$ et $O(h^4)$, afin d'étudier les écoulements instationnaires autour des corps profilés. Les avantages en temps de calcul et en précision de la méthode proposée ont été mis en évidence [(Y.H. Madani, 2002)].

N. Roquet et al (2003) ont travaillé sur l'écoulement d'un fluide stationnaire autour d'un cylindre en utilisant la modélisation numérique pour étudier et expliquer la variation de

l'effort de fléchissement sur le sillage d'un cylindre. Les résultats portent sur la détermination du comportement asymptotique du fluide [(N. Roquet, 2003)].

QIE- Rong et al (2006) ont mené une étude expérimentale de l'écoulement de l'eau peu profonde transitoire autour d'un cylindre circulaire horizontal avec un rapport d'espace $G=h/d$. a l'aide d'une méthode PIV (image vélocimétrie de particule), Ils ont présenté la distribution de champ de vitesse, champ de pression et le développement du vortex pour divers rapports - espace G [(Q.Rong, 2006)].

N. Takafumi et al (2006) ont effectué une étude numérique bidimensionnelle de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire, en utilisant la modèle DES (Detached Eddy Simulation). Les résultats obtenus par La DES a prévu la cessation du décollement de tourbillon derrière le cylindre ; et même résultat a été obtenu en utilisant la méthode simulation RANS (Reynolds Average Numerical Simulation), mais avec un rapport d'espace $G=h/d$ plus petit que la DES.

P.F. Zhang et al (2006) ont effectué une étude numérique de l'écoulement laminaire bidimensionnel autour d'une tige ascendante et d'un cylindre circulaire. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel de simulation Fluent démontrent que le coefficient de traînée moyenne et le coefficient de fluctuation de portance du cylindre peuvent être réduits par une tige ascendante [(P.F. Zhang, 2006)].

M.Cheng et al (2007) ont simulé un écoulement de cisaillement linéaire incompressible bidimensionnel au-dessus d'un tube carré. Ils ont montré l'effet du taux de cisaillement τ sur la fréquence du décollement de tourbillon du cylindre. Les résultats obtenus montrent que le vortex derrière le cylindre dépend fortement du taux de cisaillement et du nombre de Reynolds [(M. Cheng, 2007)].

R. Belakroum et al (2007) Ont étudié par la méthode des éléments finies, le modèle LES (Large Eddy Simulation) pour simuler l'écoulement instationnaire et turbulent d'un fluide incompressible autour d'un cylindre. Ils ont trouvé que Le phénomène d'éclatement tourbillonnaire est nettement mis en évidence [(M. Khadja R. Belakroum, 2007)].

F. Meddane et al (2007) ont étudié l'écoulement de fluide autour d'un obstacle, telle une aile de profil NACA 0021. Ils ont montré que l'utilisation du volet a une influence directe sur la distribution de pression et donc sur les forces aérodynamiques du profil [(F.Meddane, 2007)].

S. Pascal-Ribot et Y. Blanchet (2007) ont réalisé une étude expérimentale et numérique de l'écoulement de fluide autour d'un cylindre rigide en deux phases l'air et eau. La résolution numérique du problème a été faite à l'aide d'une méthode d'analyse dimensionnelle standard.

Ils ont présenté une exploration de base pour évaluer les forces de portance de vibration exercées sur le cylindre [(S. Pascal-Ribot, 2007)].

C. Shu et al (2008) ont mené une étude numérique d'un écoulement transitoire bidimensionnel au-dessus d'un cylindre circulaire. La résolution numérique du problème a été faite à l'aide d'une méthode IBM (Méthode Immersée de Boltzmann) de correction-treillis. Ils ont constaté que cette méthode est simple dans le concept et facile pour l'exécution et la convergence du calcul numérique est plus rapide et plus stable [(C. Shu, 2008)].

I. Khabbouchi et M.S. Guellouz (2008) ont effectué des mesures par PIV dans la zone du sillage proche derrière un cylindre placé près d'une paroi au niveau de son bord d'attaque. La

configuration géométrique a permis d'isoler l'effet de l'écoulement type jet qui s'installe dans l'espacement entre la paroi et le cylindre. Le nombre de Reynolds, basé sur le diamètre du cylindre et la vitesse de l'écoulement libre est $Re = 8667$ Ils ont montré l'existence de trois régions différentes d'écoulement lorsque le cylindre se rapproche de la paroi. L'effet de l'écoulement type jet se manifeste dans les faibles rapport- espace ($G/D < 0.3$) en détruisant la couche de cisaillement inférieure et empêchant, par la suite l'allée de Von Karman de s'installer dans le sillage [(I. Khabbouchi, 2008)].

Shuyang Cao –Yukio Tamura (2008) Ont étudié numériquement et expérimentalement l'écoulement autour d'un cylindre circulaire pour un nombre de Reynolds sous-critique. On constate que le nombre de Strouhal ne montre aucune variation par rapport au paramètre de cisaillement, et que le point d'arrêt à haute vitesse a une grande influence sur la force aérodynamique [(S. Cao, 2008)].

E. Faghani et al (2009) ont étudié l'écoulement et le transfert de chaleur d'un cylindre circulaire à partir d'un gicleur à air isotherme. L'étude s'est établie sur le nombre de Reynolds bas. Ils ont trouvé que le nombre de Nusselt moyen croît avec le nombre de Reynolds. Ainsi la distance entre le bec et le cylindre a un effet fort sur le transfert de chaleur [(E.Faghani, 2009)].

N. Mahir (2009) Ont étudié l'écoulement bidimensionnel et tridimensionnel autour d'un cylindre carré placé près d'un mur plat avec un rapport d'espace G/D varié et pour de nombreux nombres de Reynolds aussi variables, en utilisant une méthode entièrement implicite, de différence finie des équations Navier – Stokes. Ils ont constaté que la simulation numérique de l'écoulement tridimensionnel prévoit les coefficients de traînée et la racine carrée des coefficients de portance inférieurs que ceux de l'écoulement bidimensionnel. Ils ont conclu que le coefficient de traînée et la racine carrée des coefficients de portance diminuent légèrement aux grands rapports d'espace G/D [(N.Mahir., 2009)].

L. Bruno et al (2009) ont contribué par l'étude à l'analyse tridimensionnelle, de l'écoulement de fluide turbulent, pour un nombre de Reynolds élevé autour d'un cylindre rectangulaire avec un rapport de corde-à-profondeur G . Ils ont réalisé que les paramètres aérodynamiques principaux obtenus par la modélisation numérique sont semblables aux résultats proposés dans la littérature [(L. Bruno, 2009)].

M.M. Ouestati et al (2010) sont intéressés à la simulation par les différentes formulations de la fonction -vorticité pour résoudre l'équation de Navier-stokes. Ils ont étudié l'écoulement de fluides réguliers et transitoires autour d'un obstacle carré. Ils ont conclu que cette formulation a plusieurs avantages, puisque la limite de pression est éliminée des équations de mouvement et satisfait automatiquement l'équation de continuité [(M.M.Ouestati, 2010)].

II. Description et principe de fonctionnement de quelques techniques optiques de visualisation

On peut retrouver les différentes méthodes optiques de visualisation dans de très nombreuses applications. Une recherche bibliographique a permis de recenser quelques techniques, d'autres techniques étant indiquées dans les références. Nous citons ici :

1. Holographie

L'holographie est un procédé d'enregistrement de la phase et de l'amplitude de l'onde diffractée par un objet. Ce procédé d'enregistrement permet de restituer ultérieurement une image en trois dimensions de l'objet.

Principe

Lorsqu'on photographie un objet de façon classique, on enregistre sur une surface sensible la luminosité des différents points de cet objet. Autrement dit, seule la puissance par unité de surface des ondes lumineuses émises par cet objet est prise en compte.

Enregistrement

Pour enregistrer un hologramme, il faut parvenir à coder sur un support l'amplitude et la phase de la lumière issue de l'objet considéré. Pour cela, on fait interférer deux faisceaux cohérents sur une plaque photographique. Le premier faisceau, appelé « onde de référence » est envoyé directement sur la plaque. Le second, appelé « onde objet », est envoyé sur l'objet à photographier [(wiki)].

Restitution

L'étape de restitution optique consiste à illuminer l'hologramme enregistré avec le faisceau laser de référence. Cette opération peut être réalisée numériquement grâce au modèle mathématique de la diffraction [(A)].

Il existe plusieurs architectures d'holographie : Holographie numérique et holographie acoustique.

2. Interférométrie

L'interférométrie est une technique d'observation permettant aux astronomes d'atteindre une résolution angulaire au-delà de celle accessible avec des télescopes monolithiques (de l'ordre de la milliseconde d'arc dans le visible, voir dimension angulaire) et donc de discerner des détails très fins sur les objets observés. Au sol la turbulence atmosphérique dégrade fortement la résolution angulaire des grands télescopes qui, sans aucune correction (voir optique adaptative), ont un pouvoir de résolution équivalent à celui d'un télescope d'une vingtaine de centimètres de diamètre [(I)].

Il existe plusieurs grandes architectures d'interféromètres: Interféromètres à division du front d'onde et Interférométrie de Michelson et L'interférométrie holographique et Interférométrie de Young.

3. Thermographie

La thermographie est la technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de "L'infrarouge" [(T)].

4. Vélocimétrie à Laser Doppler (LDV Laser Doppler Velocimetry)

La Vélocimétrie Laser Doppler (LDV) est une technique permettant la détermination de la vitesse en un point d'un écoulement avec une résolution spatiale élevée. Quand une particule solide ou liquide, à l'échelle du micron et entraînée par un fluide, passe à l'intersection de deux faisceaux laser, la lumière émise par ces particules varie en intensité. La LDV utilise le fait que la fréquence de cette fluctuation est équivalente au décalage Doppler entre la lumière incidente et la lumière diffusée, et est ainsi proportionnelle à la composante

de la vitesse de la particule qui se trouve dans le plan des deux faisceaux laser [(A.DELMAS, 2012)].

5. Radiométrie

La radiométrie est le domaine qui étudie la mesure de l'énergie transportée par les rayonnements, dont les rayonnements électromagnétiques comme la lumière visible.

Certains domaines de la radiométrie forment une discipline particulière. Dans le domaine de l'éclairage et de la captation d'images, la photométrie étudie les rayonnements du point de vue de la vision humaine. [(R)]

La photométrie et la radiométrie étudient le rayonnement comme un transfert de puissance dans l'espace, se propageant par ondes dans toutes les directions. La notion de transfert implique que la puissance totale reste identique, à moins qu'une partie n'en soit absorbée ou diffusée. Comme, sauf dans le cas du transfert dans une fibre optique ou un guide d'onde, le cheminement de l'onde n'est pas contenu, la puissance se répartit dans un cône, dont la base a une aire proportionnelle au carré de la distance à la source. Ce phénomène appelé atténuation géométrique est à la base de la constitution des unités radiométriques et photométriques [(P)].

6. Tomographie

La tomographie optique de cohérence (OCT) est une technique relativement récente, en pleine expansion dans le domaine de l'imagerie microscopique des tissus biologiques. Le premier système OCT est apparu en 1991, réalisé par les chercheurs du Massachusetts Institute of Technology. L'OCT est basée sur une technique d'interférométrie qui implique l'utilisation de sources de faible cohérence temporelle. Elle est en fait l'extension d'une autre technique d'imagerie du tissu biologique : LCI (low time-coherenceinterferometry) [(M.OUADOUR-ABBAR, 2010)]

7. Convection thermique et l'Ombroscopie

Convection

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 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 [(Boussoukaia)].

Ombroscopie

L'Ombroscopie dans sa forme la plus simple ne nécessite aucun composant optique. Elle est donc observée régulièrement en dehors des laboratoires de recherche. On peut, par exemple, facilement visualiser l'ombre d'une bougie sur une surface plane et noter la présence d'ombres mouvantes au-dessus de celle-ci marquant la présence du panache de convection. Les premiers travaux ayant permis de créer un dispositif expérimental à but scientifique sur cette technique sont crédités à Hooke et ont eu lieu au 17^{ème} siècle. Néanmoins, ces Ombroscopies n'ayant pas été conservées, nous citons Marat pour les premières Ombroscopies publiées au 18^{ème} siècle.

Cette méthode nécessite essentiellement une source de lumière et un écran raisonnablement plat pour observer l'ombre créée. En pratique, dans les laboratoires, un dispositif légèrement plus complexe est mis en place (figure 1). Dans ce dispositif, le faisceau

lumineux est rendu parallèle avec une lentille, le faisceau traverse ensuite la zone de test et est rendu convergent à la sortie afin de pouvoir être enregistré à l'aide d'une caméra [(DELMAS, 2012), (TODOROFF, 2013)].

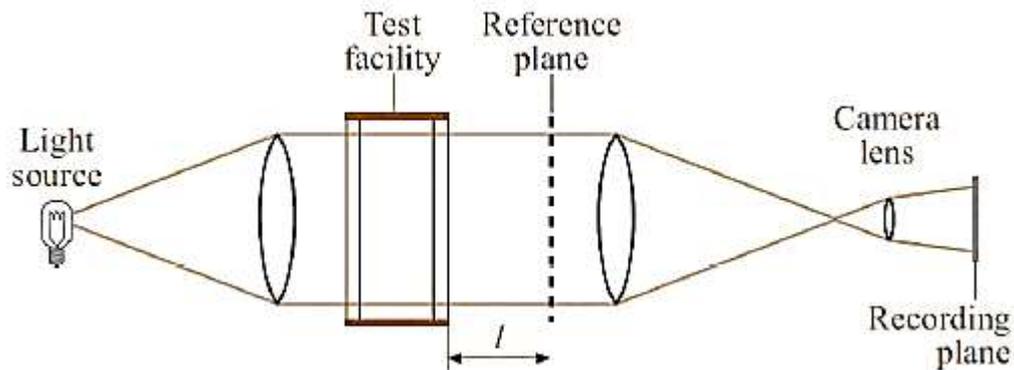


Figure 1: Dispositif expérimental d'ombroscopie à faisceau parallèle (Tropea et al. (2006))

8. Strioscopie

La strioscopie est une méthode qui a permis la compréhension et l'étude de nombreux phénomènes en mettant en évidence les gradients de masse volumique au sein d'un écoulement. C'est une méthode majoritairement qualitative bien que des travaux ont fait état de résultats quantitatifs. Son principal défaut reste la limitation de la taille du champ visualisé par la taille des optiques [(TODOROFF, 2013)].

9. Vélocimétrie par Images de Particules

La PIV, ou vélocimétrie par images de particules, est une technique optique dédiée à la mesure de champs de vecteurs vitesse. De manière générale, le principe repose sur la prise de deux images successives (A et B) d'un même plan de l'écoulement que l'on souhaite étudier. Ce dernier estensemencé avec des traceurs (particules), et nous cherchons à déterminer le déplacement d'une population donnée de particules, entre les deux prises de vue. Il est obtenu par traitement mathématique (le plus souvent de type corrélation) entre les images A et B. Les déplacements obtenus dans l'image sont alors convertis en vitesses réelles dans l'expérience [(BONNET)].

10. Granulométrie par diffraction

Au cours des dernières décennies, les méthodes basées sur la diffusion de la lumière sont devenues courantes pour la granulométrie. Ces méthodes ont considérablement progressé grâce aux avancées technologiques marquées dans les lasers, la micro-électronique et les composants optiques (lentilles, fibres optiques, . . .). Plusieurs nouveaux instruments plus robustes et faciles à manipuler sont commercialisés par plusieurs fabricants tels que CILAS, LS Instruments, PHOTOCOR, WYATT et Malvern.

Dans un granulomètre laser, un faisceau monochromatique cohérent éclaire les particules en suspension dans une cellule. La lumière diffusée par les particules est détectée par un photo-détecteur qui peut être un photomultiplicateur ou une photodiode. Les mesures de la diffusion de la lumière sont utilisées pour estimer la taille des particules. Avant de détailler les principes des méthodes optiques de la granulométrie, nous allons revoir comment la lumière interagit avec les particules [(BOUALEM, 2016)].

CHAPITRE II

LA MÉTROLOGIE THERMIQUE

La présence des phénomènes de convection dans des nombreux systèmes industriels a fait croître aujourd'hui l'intérêt porté par la communauté scientifique pour cette branche de l'aérothermique.

L'état des connaissances montre un besoin important de compréhension de l'environnement thermique de ces systèmes en vue d'arriver à une prévision correcte des circulations de fluides et des transferts de chaleur à l'intérieur de géométries de plus en plus complexes [(LEPLAT, 2009)].

Les écoulements induits par une différence de température au sein d'un système sont rencontrés à l'échelle des laboratoires scientifiques qu'à l'échelle industrielle et requièrent une compréhension physique fine des phénomènes en jeu pour optimiser de tels environnements thermiques. De plus, ces écoulements se produisent souvent en milieu confiné, en régime fortement instationnaire et proche ou au-delà de la région de transition laminaire-turbulent. La maîtrise de ces transferts thermiques complexes nécessite l'utilisation d'outils expérimentaux mais également numériques adaptés à l'étude et/ou la prévision de tels phénomènes. Dans ce cadre, la métrologie thermique est une science primordiale. Elle s'intéresse entre autres choses à la mesure : des températures, des flux de chaleur, des grandeurs thermophysiques liées à la matière [(Gillian LEPLAT)].

La métrologie des grandeurs thermophysiques, telles la conductivité, diffusivité, effusivité thermiques, la chaleur massique, revêt une importance majeure. Leur connaissance permet la validation et la maîtrise des processus de fabrication et a pour conséquence la diminution du nombre de pièces rebutées ainsi que l'économie d'énergie.

I. Méthodes de mesure des propriétés thermophysiques des matériaux

1. Grandeurs mesurées

Les activités dans le domaine de la métrologie thermique à dominante conductive consistent principalement en la détermination de propriétés thermophysiques de matériaux homogènes classiques (diffusivité thermique, capacité calorifique, conductivité thermique, ...) et d'interfaces mais aussi en la caractérisation de matériaux plus complexes (matériaux semi-transparents, matériaux composites, bicouches ou multicouches, ...), dédiés à des applications spécifiques dans des conditions de fonctionnement particulières (basse et haute températures).

Les grandeurs thermophysiques à mesurer sont très nombreuses parmi lesquelles se trouvent celles :

- i- liées à la convection ou au transfert de masse : viscosité, coefficients de diffusion. . .
- ii- liées au rayonnement : réflectivités monochromatiques, émissivités. . .
- iii- liées au changement de phase : enthalpies. . .
- iv- liées à la conduction : la conductivité " $\lambda [W/m.K]$ ", la diffusivité " $a [m^2/s]$ " . . .

2. Classification des méthodes de mesure

Degiovanni propose une démarche de la mesure et de l'identification des grandeurs thermophysiques. La détermination d'une grandeur thermophysique selon lui nécessite de manière générale :

- i- le développement d'un modèle thermocinétique décrivant l'expérience (prenant en compte l'échantillon et son environnement) ;
- ii- la mesure des grandeurs fondamentales : températures et/ou flux ;
- iii- la mise en place d'une méthode d'identification de paramètres (comparaison modèle expérience) Cette démarche est illustrée sur la Figure 2.

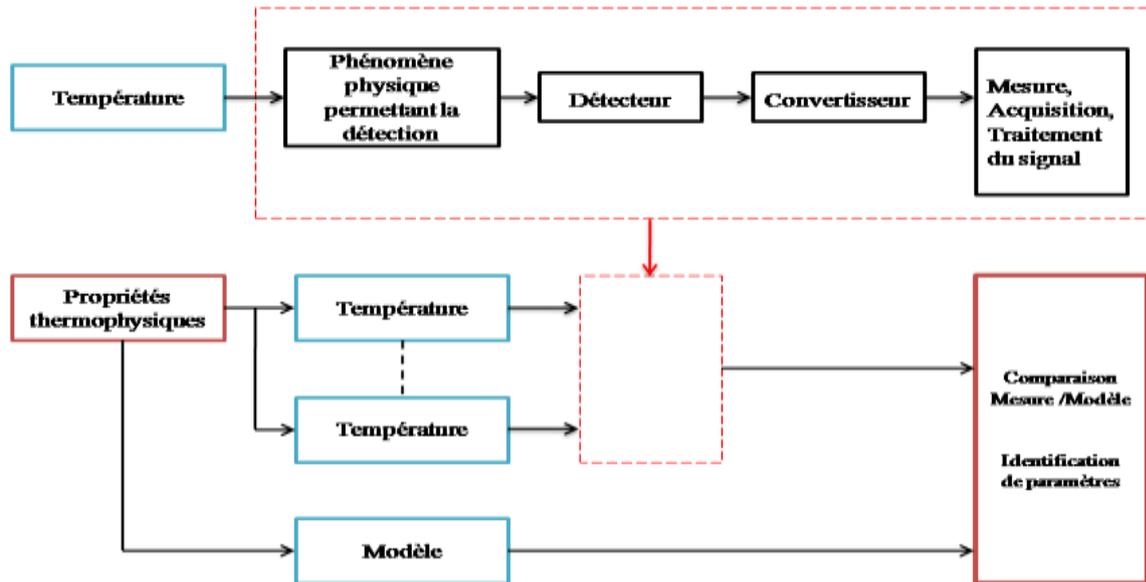


Figure 2: Chaîne de mesure

3. Différents types de mesure

De manière générale dans la littérature on retrouve deux types de mesure : les mesures par contact mécanique et les mesures sans contact.

Les méthodes de mesure par contact (thermocouples, sondes thermiques. . .), sont des méthodes classiques qui requièrent une instrumentation facile d'utilisation et relativement bon marché. Les performances de ces dispositifs étant remarquables, ils sont souvent utilisés dans les appareils de caractérisation standardisés (Hot disk®. . .). Cependant, la mise en contact du capteur avec l'échantillon à caractériser entraîne plusieurs problèmes, consultez l'étude réalisée par Krapez ainsi que les références proposées dans ce dossier. Les contacts n'étant jamais parfaits, ils engendrent des résistances thermiques liées aux interfaces. Par ailleurs, les éléments du capteur amenés en contact avec le matériau, possèdent une capacité thermique propre à chacun, qui vient perturber l'évolution de la température locale et ainsi interférer avec la mesure.

Bien que les capacités thermiques pour un capteur donné puissent être déterminées, il n'en est pas de même en ce qui concerne les résistances d'interface. Celles-ci sont dépendantes des contacts entre le capteur et le matériau, qui ne sont pas reproductibles.

Les techniques de mesure sans contact lèvent ces difficultés (techniques photo-acoustiques et par photo-réflexion, détecteurs thermiques, caméras infrarouges. . .) en offrant en outre des gammes de température de caractérisation plus élevées, inaccessibles avec les méthodes par contact, car destructrices pour celles-ci. Elles restent néanmoins plus onéreuses.

Les performances des techniques de mesure par contact et sans contact sont également étudiées dans les dossiers.

CHAPITRE III

ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT ET DE TRANSFERT DE CHALEUR AU- VOISINAGE D'UN CYLINDRE CHAUFFÉ

Ce chapitre s'attachera tout d'abord à rappeler les notions physiques nécessaires à la compréhension du phénomène d'intensification des transferts thermiques. On note ici que la mécanique des fluides et la thermique sont deux branches de la physique nécessaires pour comprendre les phénomènes physiques misent en jeux.

I. Aperçu sur la mécanique des fluides

La dynamique des fluides est un sujet qui s'applique largement : en biologie, en géophysique et en astrophysique, en océanographie et en météorologie, ainsi qu'en génies chimique, nucléaire, aéronautique, hydraulique et en écologie. Dans tous ces contextes, le fluide, qui est soit en phase liquide, soit gazeux, soit sous forme de plasma (gaz ionisé), est traité comme un milieu continu représenté par les champs de densité, de pression et de vitesse satisfaisant la fameuse équation de Navier-Stokes. Cette équation décrit des phénomènes se produisant sur une très grande gamme d'échelles de longueur, allant de l'échelle 'sub-micron' des phénomènes biologiques à un extrême, jusqu'à l'échelle 'super-parsec' des phénomènes cosmologiques et astrophysiques à l'autre.

La maîtrise de régime d'écoulement est importante, actuellement demande des appareillages de mesure et de visualisation très sophistiqués, la notion de régime d'écoulement a été introduite par Reynolds en 1883. La Figure 3 représente les trois régimes d'écoulement qui sont identifiés par Reynolds tel que: le régime laminaire, le régime transitoire et le régime turbulent.

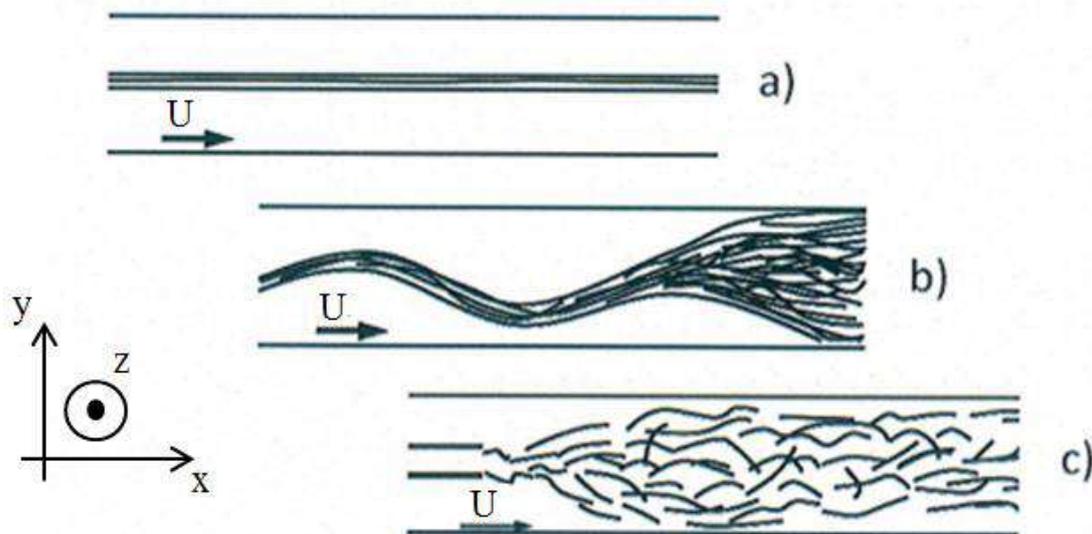


Figure 3: Illustration de l'expérience de Reynolds. (a) régime laminaire, (b) régime transitoire, (c) régime turbulent (Reynolds, 1883)

II. Aperçu sur la thermique

Tous les mécanismes de transfert nécessitent l'existence d'un potentiel pour avoir lieu. En transfert thermique, ce potentiel est fourni par la différence de température qui existe entre une « source chaude » et une « source froide ». Trois modes de transferts thermiques distincts sont généralement identifiés : la conduction, mise en œuvre dans les solides, la convection nécessitant un écoulement et le rayonnement pour lequel l'énergie thermique est échangée par rayonnement électromagnétique. Ces modes de transferts sont rarement

présents seuls au sein d'un même système. Cependant, l'un d'entre eux est très souvent prédominant. L'échange thermique peut être réalisé sans changement de phase (régime monophasique), ce qui signifie que la matière reste dans son état physique initial (solide, liquide ou gaz). Il peut également avoir lieu avec changement de phase (régime généralement diphasique dans un échangeur de chaleur). Dans ce cas, la chaleur permet un changement d'état physique de la matière.

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 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 [(C. Shakher, 1999)].

La transmission de chaleur par convection se subdivise en trois types distincts : Convection naturelle, Convection forcée et Convection mixte.

Le paramètre permettant de distinguer ces différents modes de convection selon sa valeur est un nombre adimensionnel nommé nombre de Richardson. Il est défini par :

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

• $Ri \gg 1$, L'énergie potentielle des forces de poussée domine l'énergie cinétique du fluide, c'est un régime de convection naturelle.

• $Ri \ll 1$, L'énergie cinétique du fluide domine l'énergie potentielle des forces de flottabilité, c'est un régime de convection forcée.

• $Ri \approx 1$, L'énergie potentielle des forces poussée et l'énergie cinétique du fluide sont de même ordre, c'est un régime de convection mixte.

III. Mesure de la température au voisinage d'un cylindre

Pour comprendre quelques techniques de visualisation de la couche limite thermique et de mesure de la température sous un cylindre chauffé à une température donnée, nous proposons deux expériences : la stéréovision par corrélation et l'ombroscopie.

1. Etude expérimentale

Le but de cette étape expérimentale est l'observation et la mise en évidence du phénomène de convection autour d'un objet chaud, et de comprendre bien les déformations qu'ils engendrent lors de mesures optiques.

Dispositif expérimental utilisé par M^r Anthony DELMAS

M^r Anthony DELMAS testé, à l'Institut Clément Ader Albi (ICAA), une méthode originellement dédiée à l'observation de déplacement et/ou de déformation sur des pièces soumises à certaines charges. Cette méthode est appelée stéréovision par corrélation. Cette méthode est schématisée par la figure 4.

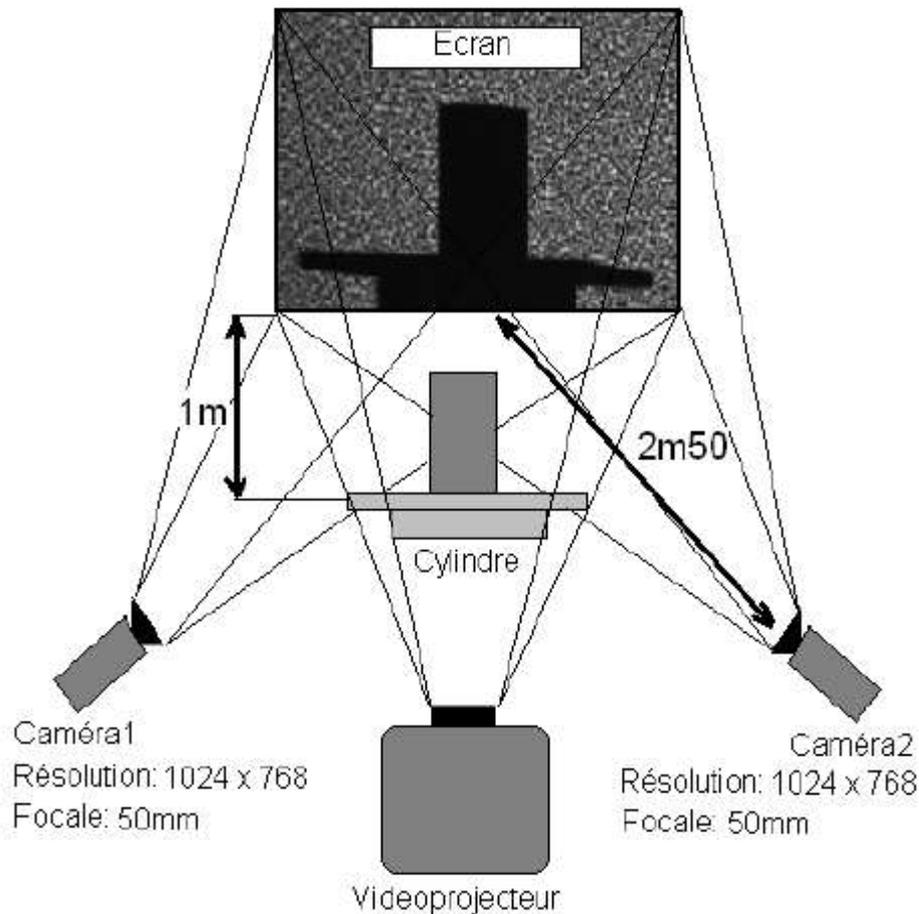


Figure 4: Schéma de la méthode de stéréovision adoptée pour la visualisation du phénomène

La technique de stéréo-corrélation utilise le principe de la vision binoculaire d'une même scène à savoir la mesure d'un objet suivant deux angles différents [Ort12, Ort09, SOS09]. Sur ce principe, la 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.

Résultats expérimentaux

Cette méthode, selon Anthony DELMAS est originale pour ce qui concerne l'observation de phénomène convectif. Elle permet d'observer le déplacement de points d'accroches situés sur la surface d'intérêt au court du temps. Pour cela il est nécessaire d'avoir une image de départ non déformée puis nous comparons toutes les images déformées à celle de la référence. Afin de créer un nombre de points important et le plus dense possible, en utilisant un vidéoprojecteur qui va projeter sur un écran l'image d'un mouchetis généré par un bruit de Perlin (soit une génération de points pseudo-aléatoire) [OGRB06]. L'ombre du cylindre doit apparaître sur l'écran, cette zone est la zone d'intérêt filmée par les caméras. Une fois le cylindre chauffé dans un four aux alentours de 700K et l'image de référence prise, plaçant le cylindre sur son support et des séries d'images sont alors prises en présence des perturbations. L'image de référence et les images déformées sont alors traitées par un outil de post-traitement appelé VIC3D [VV] qui va permettre de calculer le déplacement et/ou la vitesse de déplacement de chaque point dans les 3 dimensions. On effet, de telles données

sont difficiles à exploiter en terme quantitatif. La figure 5 représente le type d'image obtenu après corrélation par VIC3D.

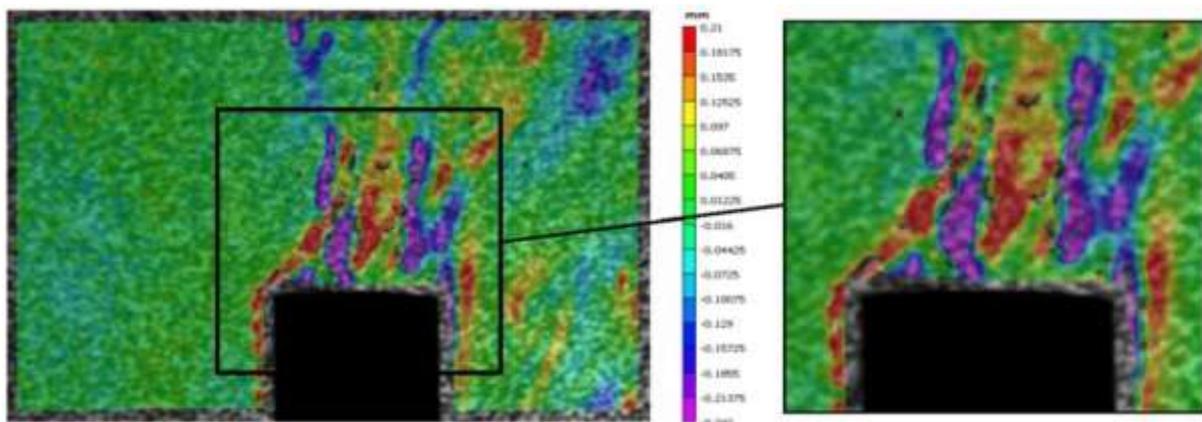


Figure 5: Image d'un résultat obtenu après post-traitement d'une image déformée

La figure 5 met bien en évidence la présence de perturbations autour et au-dessus du cylindre (couche limite et panache thermique). De plus, en sachant que le cylindre fait 6 cm de diamètre, une couche limite est d'environ 1cm sur la partie verticale du cylindre, en son sommet. En revanche, on notera également (surtout visible sur les vidéos) de fortes perturbations du panache et de la couche limite thermique au cours du temps. Ces perturbations sont tout simplement dues aux mouvements d'air parasites présents dans la pièce où a été faite l'expérimentation (déplacements de personnes, ventilations...). Il sera donc nécessaire, pour les futures configurations expérimentales, de mettre en place une enceinte tout autour de l'objet chaud afin d'avoir une situation expérimentale reproductible.

Néanmoins, le résultat obtenu reste tout à fait satisfaisant : la méthode, certes purement qualitative pour le moment, permet cependant de mettre clairement en évidence la présence du phénomène dans la bande spectrale des caméras utilisées (visible).

2. Visualisation de la couche limite thermique par ombroscopie

En comparaison avec l'interférométrie, la technique d'ombroscopie, qui s'intéresse à la déviation de la trajectoire des rayons lumineux par un gradient d'indice de réfraction, constitue le moyen le plus simple à mettre en œuvre pour visualiser la couche limite thermique. Cette méthode, considérée jusqu'à maintenant comme étant qualitative, peut être avantageusement améliorée en exploitant quantitativement l'ensemble des informations contenues dans l'image du milieu étudié.

Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée sur un cylindre à axe vertical chauffé dans l'air ambiant (figure 6).

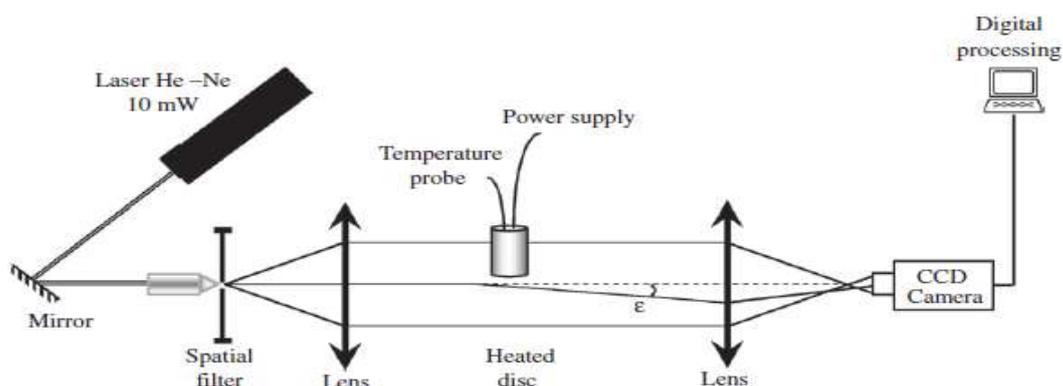


Figure 6: Mise en place pour l'analyse de l'ombre de la couche limite thermique

C'est un cylindre en aluminium de rayon ($R_c = 19.75$ mm), dans lequel est noyée une résistance électrique de telle manière à le porter à une température uniforme de 420 °C. Les courants de convection libre induisent l'établissement d'une couche d'air chaud au voisinage du cylindre. Les gradients de température dans cette couche entraînent des variations de la masse volumique et par conséquent de l'indice de réfraction de l'air. Un faisceau parallèle issu d'une source laser He-Ne de puissance 10 mW traverse le milieu et subit alors des modifications de son chemin optique par l'effet de la réfraction. Un écran placé en aval des rayons émergents permet de visualiser et de déterminer les caractéristiques de la couche limite qui joue le rôle d'une lentille thermique.

Résultats expérimentaux

Les figures 7 et 8 représentent l'ombre portée du cylindre sur l'écran placé respectivement à deux distances différentes ($l = 1.71$ m et $l = 2.48$ m). Ces photographies illustrent la concentration de la lumière sous la forme d'une mince bande lumineuse entourant le cylindre.

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. Il faut signaler que cette bande n'apparaît d'une façon nette que pour une position de l'écran dans un intervalle déterminé. L'analogie de ce système avec une lentille astigmatique dont l'indice de réfraction est plus faible que le fluide environnant. L'enveloppe des rayons traversant cette couche limite forme la caustique de la lentille thermique.

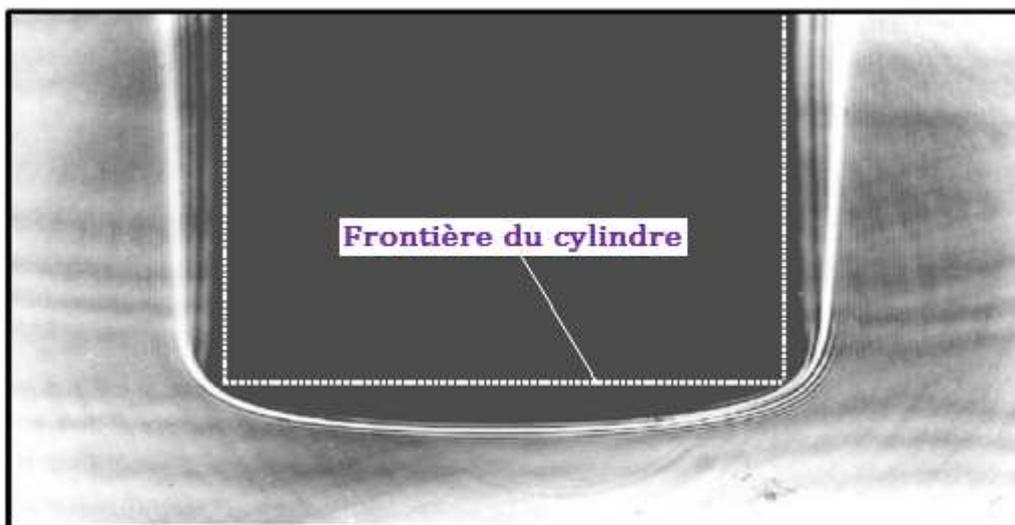


Figure 7: Photographie de l'objet porté à la température de 420 °C, $l = 1.71$ m

En outre, les photos des figures 7 et 8 révèlent la présence des franges d'interférence qui sont très serrées et localisées. Elles sont le résultat des intersections des rayons lumineux émergents du milieu avec des différences de marche. En comparaison avec des travaux publiés dans ce domaine, l'utilisation d'une source cohérente a rendu ce phénomène d'interférence visible avec un bon contraste.

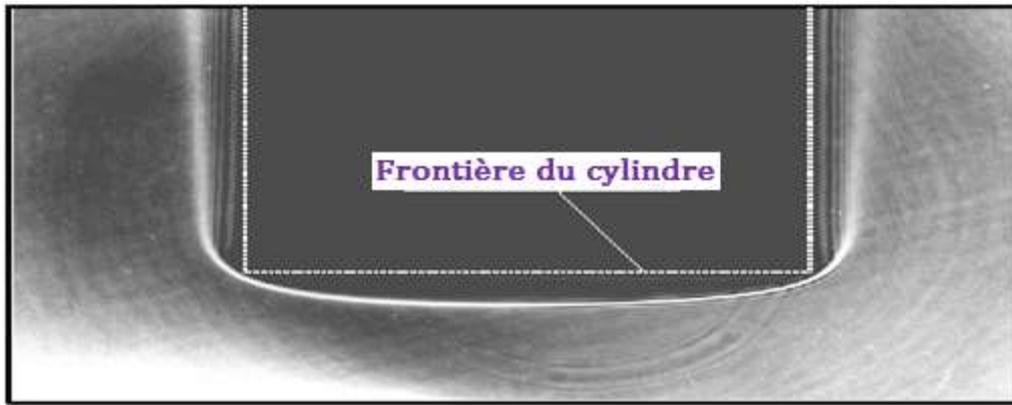


Figure 8: Photographie de l'objet porte a la température de 420°C, l = 2.48 m

IV. Aperçu sur la simulation numérique

1. Equations du modèle

Pour comprendre les phénomènes optiques mis en évidence expérimentalement (figure 8) et justifier l'existence d'une caustique des rayons émergents de la couche limite thermique, il est nécessaire de connaître la distribution de l'indice de réfraction dans le milieu. Cette grandeur est liée à la température de l'air par la relation de Gladstone-Dale.

La première étape de cette approche consiste à simuler les écoulements et le champ de température dans l'air voisinant le cylindre. Nous avons essayé de comprendre comment résoudre les équations de Navier-Stokes et du transfert de chaleur. Dans les hypothèses d'un écoulement axisymétrique, laminaire, incompressible en régime établi, ces équations s'écrivent de la manière suivante :

$$\text{- Equation de continuité} \quad \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{- Equation de mouvement} \quad \rho(\vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{V} = -\overrightarrow{\text{grad}}P - \text{div}(\bar{\tau}) - \rho \vec{g} = 0 \quad (2)$$

$$\text{- Equation de l'énergie} \quad \rho C_p \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}T = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}T) = 0 \quad (3)$$

Les propriétés physiques de l'air sont considérées variables avec la température selon des expressions facilitant le calcul numérique (tableau 2).

Masse volumique (Kg.mol ⁻¹)	$\rho(T) = \frac{PM}{RT}$
Viscosité dynamique (Kg.m ⁻¹ s ⁻¹)	$\mu(T) = 1,875 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{293}\right)^{0,6386}$
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	$\lambda(T) = 0,026 \left(\frac{T}{293}\right)^{0,723}$
Capacité calorifique à pression constante (J.kg ⁻¹ K ⁻¹)	$C_p(T) = 975,3 + 0,0368 T + 2 \times 10^{-4} T^2$

Tableau 2: Variation des propriétés thermophysiques de l'air en fonction de la température

Les conditions aux limites sont fondées sur la condition d'imperméabilité et du non glissement du fluide au niveau de la paroi du cylindre. L'hypothèse d'axisymétrie évoquée précédemment impose la parité des fonctions à calculer et permet de restreindre le domaine de calcul à la moitié du cylindre et son voisinage. Au niveau de la frontière du domaine de calcul, il est difficile de postuler les conditions aérodynamiques en convection libre.

La résolution numérique a été réalisée en utilisant un code de calcul aux volumes finis. Le domaine de calcul est découpé selon un maillage rectangulaire à pas variable (de l'ordre de 0.5 mm) pour s'affranchir des forts gradients de température, en particulier au voisinage du cylindre. Les équations du modèle sont mises selon une seule équation de conservation permettant d'effectuer une résolution commune des équations de transfert par intégration sur chaque volume de contrôle. Les systèmes d'équations algébriques résultant du schéma numérique sont résolus itérativement par la technique de Gauss-Seidel.

2. Résultats de la simulation

Écoulement et champ de température

Le tracé des lignes de courant de la figure 9 montre la topologie de l'écoulement. La simulation a été réalisée dans les mêmes conditions expérimentales des figures 7 et 8 ($T_c = 420\text{ °C}$, $P = 1.013 \cdot 10^5\text{ Pa}$ d'air et $R_c = 19.75\text{ mm}$). On constate que les lignes de courant se resserrent au voisinage de l'échantillon pour former une couche limite hydrodynamique mettant ainsi en évidence l'existence d'un fort gradient de vitesse dû aux effets de la convection libre.

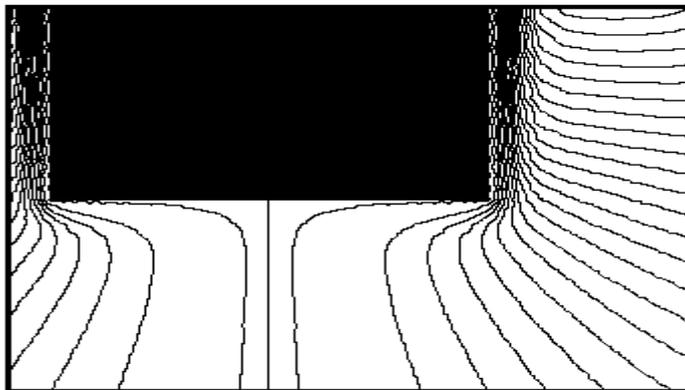


Figure 9: Les lignes de courant de l'écoulement autour de cylindre à 420°C

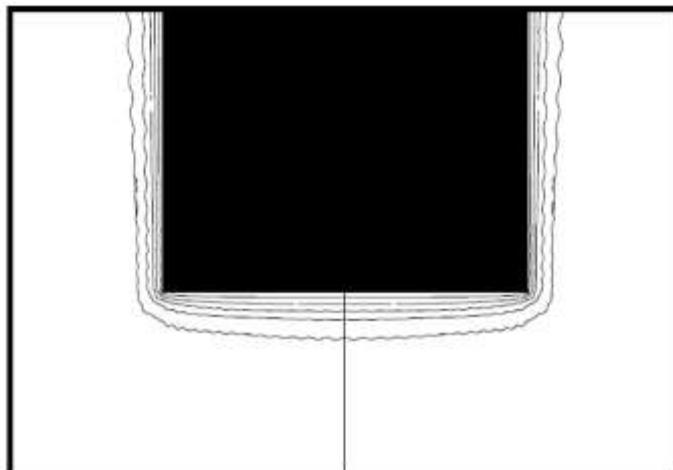


Figure 10: Les isothermes autour de cylindre à 420°C de 40 à 400°C avec un pas de 80°C

La figure 10 représente les isothermes de 40 °C à 400 °C avec un pas de 80°C. Ces valeurs sont localisées très près de l'échantillon illustrant la présence d'un fort gradient de température de l'ordre de 100 °C/mm. On peut considérer en première approximation que l'isotherme 40 °C représente la frontière de la couche limite thermique dont l'épaisseur au centre est de l'ordre de 5 mm (figure 11).

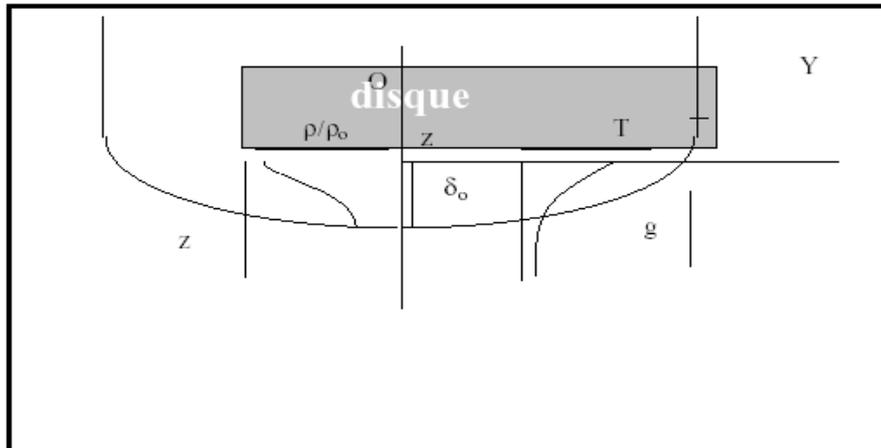


Figure 11: Schématisation de la couche limite thermique établie sous le cylindre

Le tracé des distributions de température respectivement radiale et axiale (figures 12 et 13) permet d'évaluer le gradient thermique. Dans ces graphiques, l'origine de l'axe z est prise au centre de la face inférieure du cylindre. On constate que le profil radial est sensiblement constant sous une grande partie du cylindre ($\approx 80\%$) et décroît rapidement en s'approchant du bord sur une distance de l'ordre de $\delta = 5$ mm. Le profil axial $T(r = 0, z)$ illustre également une forte décroissance de la température de 400 °C à 20 °C sur une distance voisine de 5mm. Ce résultat est en bon accord avec les observations et les mesures réalisées par Chehouani et al. en utilisant l'interférométrie holographique.

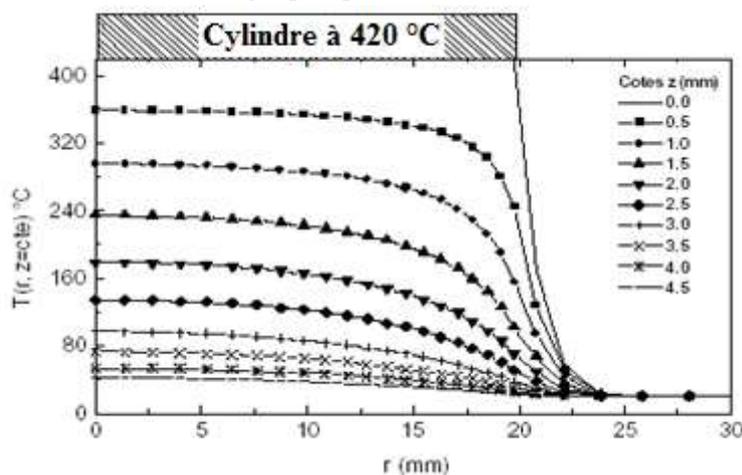


Figure 12: Profil radial de la température sous le cylindre pour plusieurs cotes ($z=cst$)

Etant donné l'importance de ces gradients de température et donc d'indice de réfraction engendrés par les effets de la convection naturelle, on peut s'attendre à une influence non

négligeable de ce phénomène sur la trajectoire des rayons lumineux traversant la couche limite sous le cylindre.

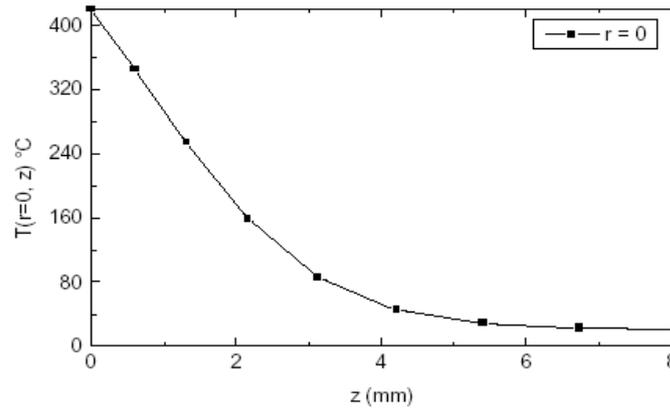


Figure 13: Profil axial de la température sous le cylindre pour (r=0)

Trajectoire des rayons

A partir du champ de température ainsi simulé on peut déduire la distribution de l'indice de réfraction de l'air en appliquant l'équation de Gladstone -Dale (figure 14) :

$$n(r, z) = 1 + \frac{KPM}{RT(r, z)} \quad (4)$$

Avec $K = 0.2256 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{kg}$, constante de Gladstone -Dale
 $M = 28.810 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mole}$, masse molaire de l'air
 $P = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ $R = 8.314 \text{ J/mole/K}$

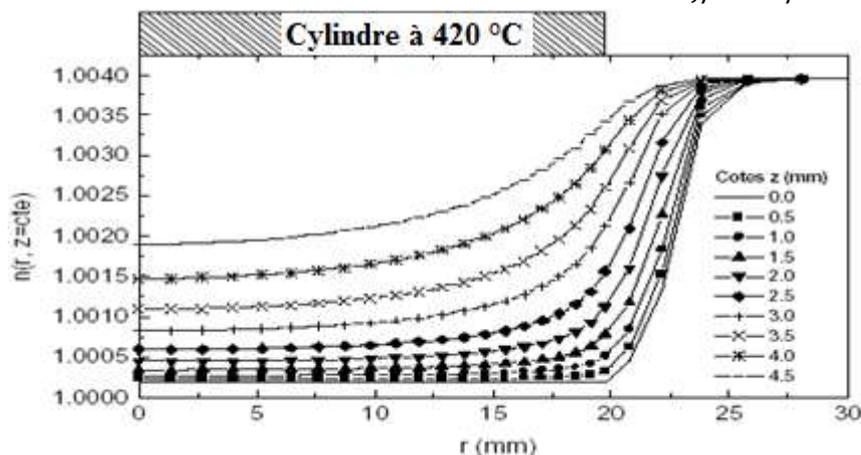


Figure 14: Distribution radiale de l'indice de réfraction sous le cylindre pour plusieurs cotes (z = cst)

Les courbes de la distribution radiale de l'indice de réfraction $n(r, z)$, ont un comportement analogue à celui de la température $T(r, z)$. Les variations d'indice de réfraction sont très accentuées aux extrémités du cylindre. On peut s'attendre à ce que les effets de bord soient les plus significatifs sur la déviation des rayons lumineux par la réfraction.

Ainsi pour expliquer qualitativement les observations expérimentales représentées par les clichés des figures 7 et 8, nous avons tracé le profil simulé de la masse volumique et son influence qualitative sur le trajet des rayons lumineux (figure 15). Il faut noter que contrairement au profil axial de température (figure 13), la masse volumique présente un

point d'inflexion pour $z = 2.5$ mm. L'éclairement sur l'écran présente alors un maximum donnant lieu à une bande lumineuse définissant l'image de la couche limite thermique.

Si l'on reprend le schéma de la figure 6, les rayons lumineux parallèles formés par la lentille L1 traversent le milieu d'indice variable $n(r, z)$, représenté par la figure 14, et subissent une certaine déviation. La trajectoire de chaque rayon peut être déterminée par la résolution de l'équation d'iconale :

$$\frac{d}{ds} \left[n \frac{d\vec{s}}{ds} \right] = \vec{\nabla} n \quad (5)$$

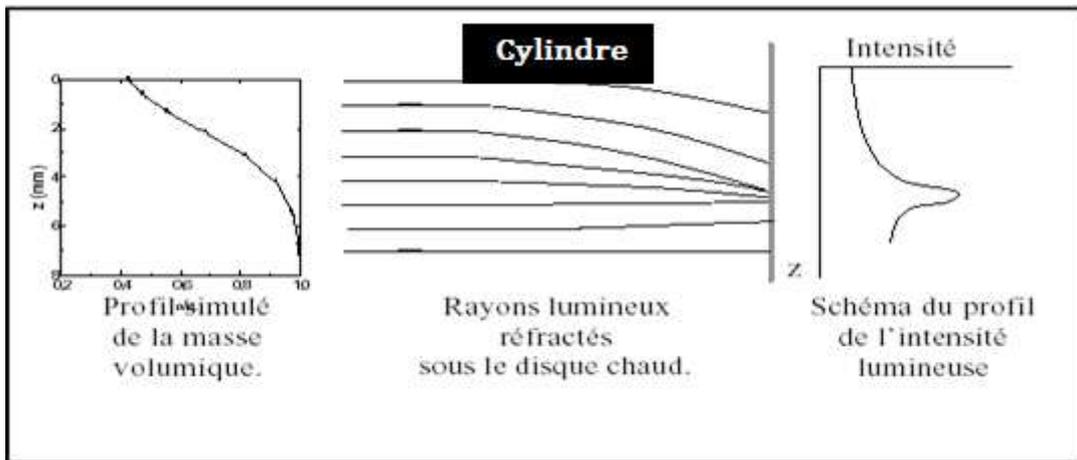


Figure 15: Interprétation qualitative du comportement optique de la couche limite thermique

\vec{s} est le vecteur position d'un point appartenant à un rayon et s désigne son abscisse curviligne (figure 16).

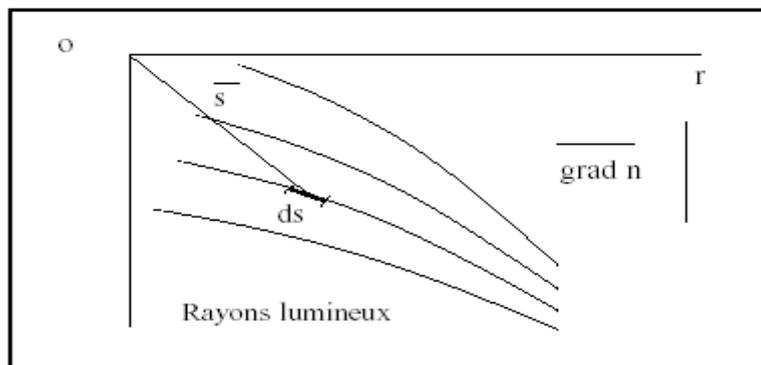


Figure 16: Schéma de la déviation des rayons lumineux réfractés dans un milieu à gradient d'indice

Pour un rayon quelconque traversant le champ d'indice $n(r, z)$, l'équation vectorielle (5) doit être décomposée en deux équations différentielles aux dérivés partielles indépendantes déterminant les coordonnées du rayon ($z(r)$, $\theta(r)$). Par contre, si on considère un rayon qui traverse le plan central (\vec{e}_r, \vec{e}_z), son chemin ne subira aucune variation selon la direction \vec{e}_θ pour des raisons de symétrie comme l'illustre la figure 17a. Ainsi, sa trajectoire peut être calculée uniquement par la résolution d'une seule équation différentielle en fonction de $z(r)$.

Pour éviter toute résolution numérique supplémentaire de l'équation d'iconale (5), une autre méthode peut être envisagée en considérant que le rayon lumineux traversera une multitude de dioptries élémentaires, matérialisés par les isothermes (figure 10). Ces dioptries vont dévier sa trajectoire dans le sens des indices de réfraction croissants, c'est à dire vers les températures les moins élevées. Pour chaque dioptrie la loi de Snell - Descartes :

$$n_i \sin \alpha_i = n_r \sin \alpha_r \quad (6)$$

Où α_i et α_r désignent respectivement les angles d'incidence et de réfraction par rapport à la normale qui est la direction de $\vec{\text{grad}}n$ (figure 17b).

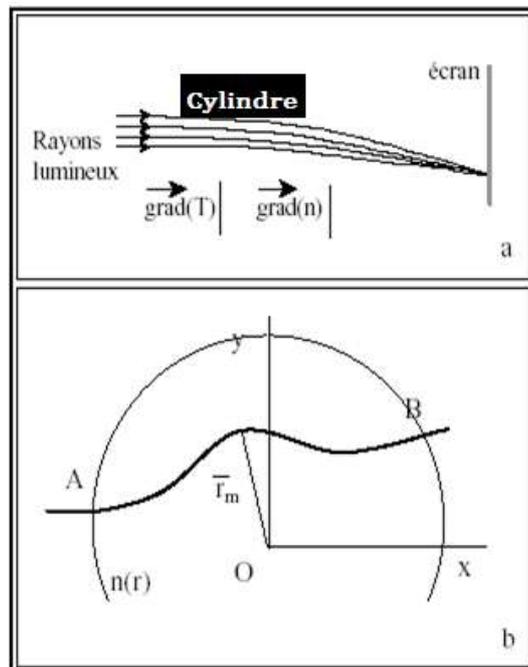


Figure 17: Schéma de la trajectoire des rayons lumineux réfractés sous le cylindre a\ - gradient d'indice axial- b\ -gradient d'indice radial

Comme l'indice de réfraction n est connu que d'une façon discrète sur le maillage ayant servi à la simulation des champs de température, l'équation (6) doit être appliquée numériquement pour déterminer l'angle α_r après chaque réfraction subie par le rayon. Il est clair que l'hypothèse de la subdivision du milieu en dioptries élémentaires sera d'autant valable que le maillage est fin dans toute la couche limite thermique. Pour ne pas alourdir le calcul du champ de température à partir de la résolution des équations de Navier-Stokes, on peut effectuer un maillage secondaire bien adapté à l'application du modèle des dioptries. Les calculs ont mis en évidence que pour aboutir à une stabilité de la solution numérique, il est

nécessaire de travailler avec des pas ($\leq 10^{-3}$ mm) du même ordre de grandeur de la déviation du rayon entre les dioptries.

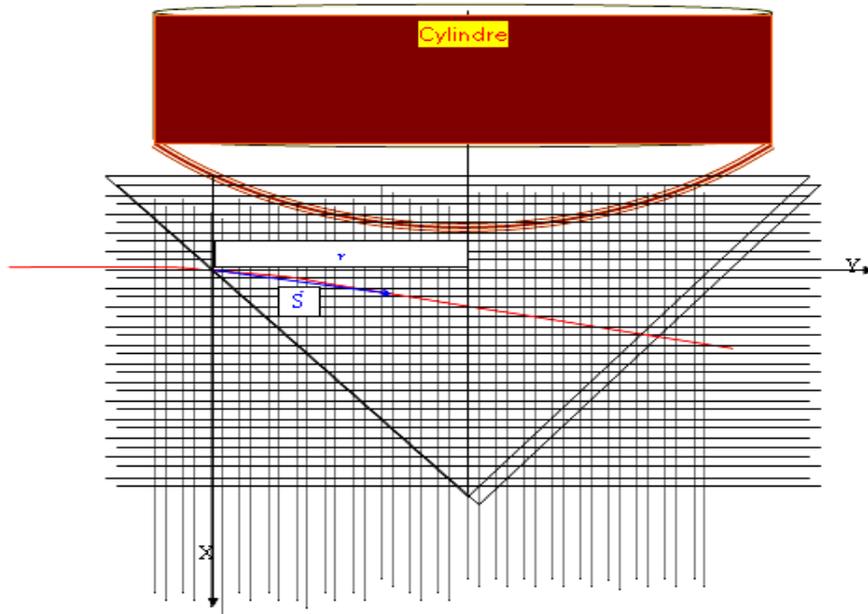
Ce raisonnement est appliqué pour une nappe de rayons parallèles à l'axe \vec{Or} traversant le plan central du cylindre. Le résultat de ce calcul est illustré sur la figure 10. On constate que les rayons, initialement parallèles, subissent une déviation importante au voisinage du bord du cylindre. Ensuite, la déviation se réduit légèrement en s'approchant de l'axe de symétrie en conséquence de la diminution du gradient radial. Finalement, au voisinage de la seconde extrémité du cylindre, où les angles d'incidence et les gradients d'indice deviennent simultanément importants, l'inclinaison des rayons s'accroît. Si maintenant on intercepte les rayons émergent de la zone chaude par un écran placé à la distance $\ell=2.48$ m, on constate qu'il existe une zone d'intersections des rayons (figure 11). Ce phénomène conduit à une focalisation de la lumière sur l'écran sous forme d'une tache d'épaisseur de l'ordre de 1 mm et située à une distance $\delta \approx 6$ mm par rapport à la surface inférieure du cylindre. Cette zone des rayons qui s'intersectent met en évidence l'existence d'une caustique de la couche limite thermique qui se comporte comme une lentille d'indice de réfraction variable. La comparaison de ce résultat avec la photo de la figure 7, permet d'interpréter l'observation expérimentale d'une part, et de valider notre approche à la modélisation des phénomènes à la fois thermiques et optiques d'autre part.

CHAPITRE IV

SOLUTION ANALYTIQUE AXISYMETRIQUE (2D) DE L'ÉQUATION D'ICONALE

Dans ce chapitre nous essayons de déterminer la trajectoire des rayons lumineux au-dessous d'un cylindre horizontal chauffé à une température donnée.

On suppose que le champ de la température au-dessus du cylindre est sous forme conique :



$$0 \leq \rho \leq r$$

$$\frac{r}{z} = \frac{R}{l} \Leftrightarrow r = \frac{R}{l} z$$

$$0 \leq \rho \leq \frac{R}{l} z$$

$$R = 19.75 \text{ mm}$$

$$0 \leq z \leq l$$

$$L = 8 \text{ mm}$$

$$O\vec{M} = O\vec{O}_1 + O_1\vec{O}_2 + O_2\vec{M}$$

$$O\vec{M} = \vec{S} = -r\vec{e}_\rho - (l-z)\vec{e}_z + \rho\vec{e}_\rho$$

$$\vec{S} = -(r-\rho)\vec{e}_\rho - (l-z)\vec{e}_z$$

$$\vec{S} = -(r-\rho)\vec{e}_\rho - (l-z)\vec{e}_z$$

$$\vec{S} = -(r-\rho)\vec{e}_\rho - (l-z)\vec{e}_z$$

$$\frac{d}{ds} \left(\mathbf{n} \frac{d\vec{S}}{ds} \right) = \vec{\nabla} \mathbf{n} \quad : \text{Equation d'Iconale}$$

\vec{S} : Vecteur position d'un point appartenant à un rayon lumineux par rapport à l'origine.

S : abscisse curviligne

Finalement

$$n = c_0 \exp \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} \arctan \frac{1}{3} (2x^2 + y^2) \frac{\sqrt{3}}{y^2} - \frac{4\sqrt{3}}{3} \arctan \frac{1}{3} (2y+x) \frac{\sqrt{3}}{x} + \frac{4\sqrt{3}}{3} \arctan \frac{1}{3} (2y-x) \frac{\sqrt{3}}{x} - \frac{y^2}{2x^2} \right)$$

Pour $x = y = 0$

$$c_0 = e^{\frac{1}{2}}$$

$$n = \exp\left(\frac{2\sqrt{3}}{3} \arctan \frac{1}{3}(2x^2 + y^2) \frac{\sqrt{3}}{y^2} - \frac{4\sqrt{3}}{3} \arctan \frac{1}{3}(2y + x) \frac{\sqrt{3}}{x} + \frac{4\sqrt{3}}{3} \arctan \frac{1}{3}(2y - x) \frac{\sqrt{3}}{x} - \frac{y^2}{2x^2} + \frac{1}{2}\right)$$

SYNTHESE & DISCUSSIONS

Dans ce travail, nous avons intéressé aux méthodes optiques de visualisation en générale, et en particulier à la mesure de l'épaisseur de la couche limite thermique d'un cylindre préalablement chauffée. Nous avons d'une part comprendre la méthode qui s'appuie sur les outils de la mécanique des fluides, qui adoptent une démarche phénoménologique pour établir et résoudre les équations de Navier-Stokes. Nous avons ensuite voir comment les chercheurs appliqués la méthode intégrale à l'équation de la chaleur pour étudier les propriétés des transferts thermiques engendrés par la convection non perturbée au voisinage d'un corps (cylindre) préalablement chauffée. Nous avons retenu d'autre part une approche qui puise ses ressources dans l'optique géométrique. Cette approche s'appuie principalement sur l'outil laser qui est devenu incontournable dans la technologie moderne. Nous notons ici que des travaux ont mis au point une nouvelle approche à l'étude des effets de la réfraction dans un champ d'indice à symétrie de révolution. La confrontation théorie-expérience a permis de valider notre simulation des champs de température autour d'un cylindre à axe vertical. Le modèle des dioptries élémentaires constitue une approche facile à mettre en œuvre et conduit à une bonne représentation des phénomènes de réfraction induits par des gradients de température.

La simulation numérique et la visualisation de la couche limite thermique au voisinage d'un cylindre en convection libre dans l'air. Le modèle qui a été développé est fondé sur la résolution des équations de Navier-Stokes couplées à l'équation de l'énergie pour décrire l'écoulement et le transfert de chaleur.

L'approche en question se base sur l'équation d'iconale de l'optique géométrique lié avec l'équation de Gladstone –Dale et s'appuie principalement sur la déviation d'un faisceau laser dans un champ d'indice de réfraction. Cette méthode se révèle pratique, précise et peu coûteuse. Elle présente cependant quelques inconvénients majeurs à savoir l'exigence de surface relativement étendues (pour éliminer les effets de bord) et sa résolution est relativement médiocre.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude réalisée dans ce travail avait pour objectif d'amener une meilleure compréhension des différentes méthodes optiques de visualisation. De plus, ces différentes méthodes ont pour but d'amener une estimation des erreurs dimensionnelles et énergétiques engendrées par la présence d'une variation d'indices de réfraction de l'air et pourquoi pas une prédiction voire possible correction d'images acquises en présence d'une telle perturbation.

Pour réaliser cette étude, nous avons découpé l'approche en 4 étapes principales en commençant dans un premier temps par une étude bibliographique. Cette première étape nous a également permis de sélectionner différentes méthodes de visualisation et/ou de caractérisation d'écoulement qui ont pu être mis en application.

En effet, le chapitre 2 se concerne à la métrologie thermique comme science de mesure en focalisant sur les différentes méthodes de mesure des propriétés thermophysiques des matériaux à vrai dire leur classification et leurs types de mesures.

Pour bien comprendre les phénomènes physiques, il fallait qu'on sache un aperçu sur deux grandeurs: la mécanique des fluides et la thermique; ils ont une importance dans l'étude de l'écoulement autour d'un objet.

L'étape a été ensuite la mesure de l'écoulement et transfert de chaleur au voisinage d'un cylindre chauffé par deux méthodes de visualisation la stéréovision fait par Mr Delmas et l'ombroscopie soumis par Mr Chehouani, tous cela est le but du troisième chapitre.

Le chapitre 4 s'intéresse à la solution analytique axisymétrique (2D) de l'équation d'iconale dans le but de faire varier l'indice de réfraction et la température au-dessus d'un cylindre chauffé.

Bibliographie

- A. (s.d.). https://dossier.univ-st-etienne.fr/fcorinne/public/holonum/imagerie3d_holonum.html.
- A. Sabri, S. B. (1995). 15ème Congrès Canadien de Mécanique Appliquée, Victoria, pp. 424-425.
- A.DELMAS. (2012). Contribution à l'étude de l'effet mirage : application aux mesures dimensionnelle et thermique par caméra visible proche infrarouge et infrarouge; page 20 .
- BATSALE, J.-C. (2012). THÈSE PRÉSENTÉE À L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1: ÉTUDE DE CHAMPS DE TEMPÉRATURE SÉPARABLES AVEC UNE DOUBLE DÉCOMPOSITION EN VALEURS SINGULIÈRES. QUELQUES APPLICATIONS A LA CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX ET AU CONTRÔLES NON DESTRUCTIF .
- BONNET, D. Thèse doctorat en titre de Vélocimétrie par images de particules (PIV) pour le diagnostic d'écoulements dans la boucle d'air automobile.
- BOUALEM, A. (2016). THÈSE pour obtenir le grade de : Docteur de l'université d'Orléans, Discipline / Spécialité : Traitement du Signal en titre de Estimation de distribution de tailles de particules par techniques d'inférence bayésienne.
- Boussoukaia, T. H. (s.d.). African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 12, No. 2, pp. 70 – 79 ETUDE PHÉNOMÉNOLOGIQUE SUR LA CONVECTION NATURELLE AU DESSUS D'UN DISQUE RAINURÉ PAR VOIE OPTIQUE.
- C. Shakher, A. N. (1999). A review on refractive index and temperature profile measurements using laser-based interferometric techniques, *Opt. Lasers in Engineering*, 31, 455-491.
- C. Shu, N. L. (2008). A novel immersed boundary velocity correction–lattice Boltzmann method and its application to simulate flow past a circular cylinder. *Journal of Computational Physics*. Vol 226 PP 1607–1622. .
- Chehouani, H. (1999). H. Chehouani "Etude Théorique et Expérimentale des Phénomènes de Transport dans les Réacteurs CVD" Thèse de Doctorat d'état, Marrakech, Maroc .
- D.Callaud, L. S. (2001). Ecoulement laminaire autour d'un cylindre de section carrée comparaison calculé expérimental Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (UMR 6609-CNRS) Boulevard Pierre et Marie Curie Téléport 2, B.P. 30179 86960 FUTUROSCOPE Cedex.
- D.J.Park, A. Y. (2007). Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement. *Combustion and flame*, volume 150, Issues 1-2, pages 27-39.
- DELMAS, A. (2012). THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Délivré par : l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), en titre Contribution à l'étude de l'effet mirage: application aux mesures dimensionnelle...
- Documentation., F. 6. (s.d.). User's Guide. Tutorial Guide. Fluent, inc 2001 .
- Documentation., G. 2. (s.d.). User's Guide. Modeling Guide. Tutorial Guide. Fluent, inc 2001.
- E.Faghani, H. N. (2009). Numerical investigation of flow and heat transfer characteristics from an impinging jet on circular cylinder. School of Mechanical Engineering Sharif University of Technology, Tehran, Iran. School of Mechanical Engineering King College London, London England.

- F.Meddane, T. L. (2007). Influence du volet sur les performances du profil NACA 0021. International Conférence on Energetics and pollution constantine .
- G.Durand, J. P. (2001). G.Durand Contrôle d'actif du sillage autour d'un cylindre oscillant. Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de Paris (ESPCI), PMMH. 10 Rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05, France.
- Gillian LEPLAT†, E. L. Simulations Numériques 2D d'un Ecoulement Laminaire Instable de Convection Naturelle en Milieu Confiné . France.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Holographie>. (s.d.).
- I. (s.d.). <https://fr.wikipedia.org/wiki/Interférométrie>.
- I. Khabbouchi, M. G. (2008). I. Khabbouchi, M.S. Guellouz. Ecoulement autour d'un cylindre circulaire proche d'une paroi : Effet de l'écoulement type jet. Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir Rue Ibn El Jazzar 5019 Monas.
- K. Lam, L. Z. (2009). Experimental study and large eddy simulation for the turbulent flow around four cylinders in an in-line square configuration. International Journal of Heat and Fluid Flow. Vol 30 PP 276–285.
- K.D.Kihm. (1997). Laser sepeckle photography technique applied for heat and mass transfer problems, Advances in Heat Transfer, 30, 255-311 .
- Kreis, T. (1986). J. Opt. Soc. Am., Vol 3, N°6 .
- L. Bruno, D. F. (2009). 3D flow around a rectangular cylinder: A computational study. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.
- LEPLAT, G. (2009). THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Délivré par l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace Spécialité : Dynamique des fluides:Stabilité d'un écoulement de convection naturelle en milieu confiné.
- M. Cheng, D. W. (2007). Numerical simulation of flow around a square cylinder in uniform-shear flow. Journal of Fluids and Structures VOL 23 PP 207–226.
- M. Khadja R. Belakroum, H. Z. (2007). Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire. International Conference on Energetics and pollution constantine.
- M.M.Ouestati, M. S. (2010). Numerical simulation of flow around obstacle with stream function-vorticity formulation of Navier-Stokes equations. 2nd International Conference on Energy Conversion and Conservation.
- M.OUADOUR-ABBAR. (2010). PRINCIPE DE TOMOGRAPHIE ET SPECTRO- TOMOGRAPHIE OPTIQUE DE COHERENCE PAR INTERCORRELATION SANS BALAYAGE BASEE SUR UN RESEAU DE DIFFRACTION ; page 1.
- M.S. Dhouaib, F. A. (2008). Etude expérimentale et numérique des écoulements instationnaires derrière un barreau carré placé dans un milieu confiné, 1ère Conférence Internationale sur La Conversion et La maîtrise de L'Energie, CICME'08 11-13, Sousse-Tunisie.
- M.Van.Dkye. (s.d.). An Album of Fluid M.
- Merzkirch, W. (1974). Flow Visualization Academic Press, New-York .
- Murio, D. A. (1992). D. A. Murio, The Mollification Method and the Numerical Solution of Ill-Posed Problems, John Wiley & Sons, New-York.
- N. Roquet, P. S. (2003). An adaptive finite element method for Bingham fluid flows around a cylinder. Comput.Methods Appl. Mech. Engrg.VOL192 PP3317–3341.

N.Mahir. (2009). Three-dimensional flow around a square cylinder near a wall. Ocean Engineering. Vol 36 PP 357–367.

P. (s.d.). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Photom%C3%A9trie_\(optique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Photom%C3%A9trie_(optique)).

P.F. Zhang, J. W. (2006). Numerical simulation of flow around cylinder with an upstream rod in tandem at low Reynolds numbers. Applied Ocean Research Vol 28PP183–192. .

Q.Rong, L. G. (2006). Study of vortex characteristics of the flow around a horizontal circular cylinder at various gap-ratios in the cross-flow. Journal of Hydrodynamics Ser.B, VOL18PP334-340 .

R. (s.d.). <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radiom%C3%A9trie>.

S. Cao, Y. T. (2008). Flow around a circular cylinder in linear shear flows At subcritical Reynolds number. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol 96 PP 1961–1973. .

S. Pascal-Ribot, Y. B. (2007). S. Pascal-Ribot, Y. Blanchet. Buffeting lift forces and local air-water flow aspects around a rigid cylinder. International Journal of Multiphase Flow. VOL 33 PP 1237–1254.

S.C. Luo, T. C. (2003). Characteristic of square cylinder wake transition flows, Phys. Fluids, vol. 8, 2549-2559.

T. (s.d.). <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermographie>.

T.Nishino, G. X. (2006). Detached-eddy simulation of flow around a circular cylinder in ground effect. The seventeenth international symposium on transport phenomena, Toyama, JAPAN.

technique., B. (s.d.). Soufflerie subsonique a aspiration. EA 103.Deltalab.

TODOROFF, V. (2013). THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Délivré par : l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), En titre de Mesure d'un champ de masse volumique par Background Oriented Schlieren 3D. Etude d'un dispositif..

Vest, C. (s.d.). C.H. Vest, Holographic Interferometry, J. WILEY & SON, New-York (1978) T.F. Irvine, Jr. Ed. Academic Press, New-York (1970).

W. Hauf, U. G. (1970). "Optical Methods in Heat Transfer" in Advances in Heat Transfer, Vol 6, J.P Hartnett.

wiki. (s.d.). <https://fr.wikipedia.org/wiki/Holographie>.

Y.H. Madani, M. (2002). Etude numérique de l'écoulement d'un fluide visqueux incompressible autour de corps profilés par une méthode combinée d'ordre $O(h^2)$ et $O(h^4)$. Seminaire international de Genie Mecanique. Oran.