



UNIVERSITÉ
LAVAL



Étude de l'écoulement de l'air autour d'objets par imagerie Schlieren

Félix Desroches et Mathieu Marquis
Département de Physique, de Génie Physique et d'Optique,
Université Laval, Québec, QC G1K 7P4, Canada;
felix.desroches.1@ulaval.ca, mathieu.marquis.2@ulaval.ca
Reçu le 23 mars 2024

Abstract

L'imagerie Schlieren est une technologie optique permettant la photographie de l'écoulement de fluides de densités variables, donnant de l'information sur la différence d'indices de réfraction [1]. L'analyse des patrons obtenus image par image permet alors de voir la variation de l'écoulement sur un objet et donc la turbulence induite par ce dernier. L'énergie du mouvement (*motion energy*) de l'écoulement a alors pu être calculée à partir de séquences de plusieurs centaines d'images de celui-ci. Tout d'abord, l'étude d'un avion en papier face à un écoulement d'air chaud a permis de constater l'absence d'interaction avec l'écoulement et l'énergie du mouvement n'a donc pas pu être mesurée. Par la suite, l'utilisation d'autres formes plus massives a permis d'observer une variation notable de l'écart-type de l'énergie du mouvement causée par l'objet, allant de 0.090 ± 0.005 pour un angle de $(25 \pm 5)^\circ$ jusqu'à 0.160 ± 0.005 pour un plan à $(90 \pm 5)^\circ$, donc perpendiculaire à l'écoulement. Finalement, l'étude qualitative des images d'énergie du mouvement obtenues permet de conclure sur les sources de grande turbulence, soit des obstacles plans ou concaves.

Introduction

Les caractéristiques optimales d'un avion en papier font le sujet de beaucoup de curiosité chez les jeunes[2] et servent souvent d'activité scientifique dans les premières années d'éducation. L'optimisation du déplacement de l'avion, considéré sans propulsion, implique la minimisation de la résistance de l'air. Ainsi, la caractérisation de la grandeur de l'interaction d'un avion en papier ou d'un objet quelconque avec un flux d'air en fonction de la forme de l'objet permet de déterminer sa forme optimale. Afin de visualiser l'écoulement autour de l'objet analysé, une source d'air, soit un séchoir à cheveux, projette sur l'objet une masse d'air chaud, considérée à température constante sur les petites distances utilisées ($\sim 10^{-1}$ m), dont l'indice de densité optique est inférieur à celui de l'air environnant permettant à cette différence d'être visualisée par imagerie Schlieren. L'analyse de l'énergie du mouvement (*motion energy*) en fonction de la position permet de quantifier la turbulence dans l'air causée par la présence de l'objet. Une analyse de la mesure de la turbulence créée par plusieurs objets ainsi qu'un retour sur l'efficacité du montage utilisé seront traités.

Méthodologie

Afin de voir l'écoulement gazeux par imagerie Schlieren^[1], une source thermique d'air a été utilisée afin de propulser celui-ci avec un indice de densité optique différent. Cet écoulement d'air chaud a été généré par un séchoir à cheveux ~~de modèle standard Conair~~ en utilisant un embout à sortie planaire. Outre les avions en papier, l'ensemble des objets étant continus et de même forme dans la direction de la profondeur de l'image (axe normal à l'image), la sortie a été positionnée parallèlement à cet axe afin de maximiser l'effet de l'écoulement et de limiter les perturbations qui ne sont pas causées par la forme de l'objet. Les turbulences dans l'écoulement d'air impliquent des variations locales de température par mélange avec l'air ambiant, et ce, à haute fréquence spatiale ($\sim \frac{1}{60}$ de la taille de la région d'intérêt (*region of interest*, ROI)). Ces changements de température permettent ainsi la distinction entre l'air stable ambiant et l'air turbulent projeté. Les données enregistrées à 60 images par seconde ont été converties en tons de gris et la valeur absolue de la différence d'intensité entre deux images subséquentes pour chaque pixel a été calculée pour obtenir l'énergie du mou-



[1]. Imagerie Schlieren [3][4] : technique d'imagerie permettant de visualiser des changements dans la densité optique d'un milieu.

vement. La moyenne temporelle de ces variations pixel à pixel permet de quantifier la turbulence de l'écoulement pour chaque objet et ainsi de déterminer, par comparaison avec des mesures de turbulence sans objet et sans écoulement, la variation de la turbulence causée par la présence de l'objet. Dans le cadre de cette expérience, un montage tel que représenté dans la Figure 1 a été utilisé. La stabilisation sur un système d'optomécanique de la diode électroluminescente utilisée comme source ponctuelle de lumière et de la caméra a permis l'alignement des composantes optiques et leur stabilisation. Bien qu'un montage Schlieren typique utilise une lame de rasoir avant le capteur afin de séparer les faisceaux déviés, l'effet de cette composante n'a surprenamment pas été remarqué d'une manière notable. En effet, la déviation des rayons a été trouvée comme suffisante pour observer les flux d'air chaud créés et l'ajout de la lame n'avait aucun impact sur ces mesures. Il est possible que la grosseur minimale de l'image lorsqu'elle était située au centre de courbure du miroir, qui était plus importante qu'un simple point (rayon de ~ 1 cm), soit la cause de l'inefficacité de la lame de rasoir; cette dernière ne pouvait pas correctement séparer le faisceau à un point bien précis.

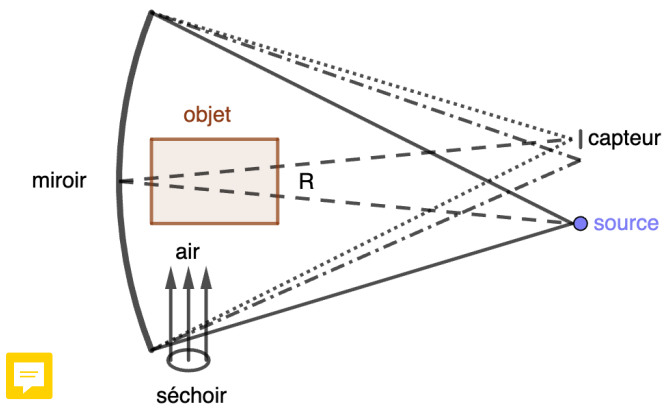


FIGURE 1 – Schéma du montage utilisé lors de l'expérience. Le rectangle à gauche représente une projection de l'objet utilisé, la courbe à gauche représente le miroir parabolique, l'ellipse illustre l'ouverture du séchoir à cheveux, les flèches indiquent la direction de l'écoulement ayant lieu dans le plan du schéma, le point à droite indique la position de la source ponctuelle et le segment à droite indique la position du capteur. Les deux segments pleins montrent les faisceaux marginaux provenant de la source, les segments en points indiquent la réflexion des rayons marginaux, les segments en traits et points indiquent la partie des faisceaux marginaux déviés par des indices de réfractions différents du reste du milieu et les segments en traits indiquent les distances importantes, soit $d = R = 2f$.

Résultats expérimentaux

Étant donné la petite taille des avions en papier formés et leur grande souplesse, une déviation quelconque du flux d'air n'a pas pu être remarquée à la fois dans les images Schlieren que dans les figures illustrant l'énergie du mouvement. La Figure 2 présente cette énergie, en unités arbitraires, obtenue en envoyant un flux d'air chaud constant sur un avion en papier.

Il est ainsi plus intéressant de représenter les différentes sections d'un avion par des maquettes agrandies permettant une analyse plus précise du comportement local. La Figure 3 montre les cas limite mesurés, soit des ouvertures symétriques de 25° et de 90° relatif à la bissectrice des deux segments de l'objet.

Quantitativement, la moyenne de l'énergie de mouvement permet de comparer la turbulence dans l'ensemble du système entre plusieurs images. En effet, considérant que les régions d'énergie nulle, soit l'objet, la section à droite de celui-ci et l'extérieur du miroir, sont de taille comparable dans l'ensemble des prises de mesure et que la taille totale de l'image est identique pour chaque prise de mesure, la moyenne de l'énergie permet de mettre en relation la somme des énergies. Cette somme d'énergie peut être indirectement associée à la turbulence totale et donc à l'intensité de l'écoulement. Similairement, l'écart-type de l'énergie dans la ROI délimitant l'écoulement permet de quantifier la perte de vitesse et donc l'intensité d'interaction entre l'objet et l'air. La Table 1 présente les valeurs de moyenne et d'écart-type mentionnées pour plusieurs situations.

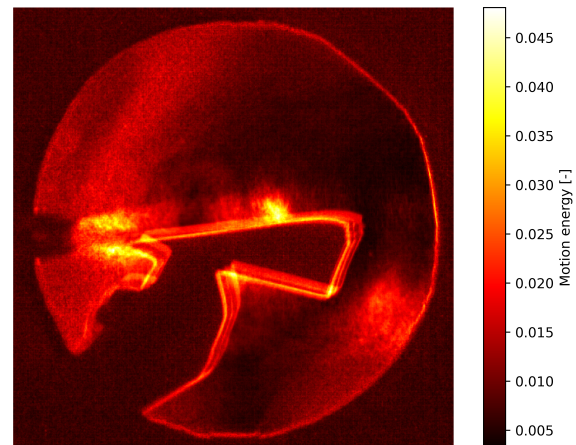


FIGURE 2 – Énergie du mouvement d'un flux d'air chaud créé par un séchoir à cheveux projeté sur un avion en papier d'une taille de l'ordre de 10 cm. L'artefact en bas à gauche de l'image provient de la méthode de support de l'objet tandis que la double image témoigne du manque de stabilité de l'objet face au jet.

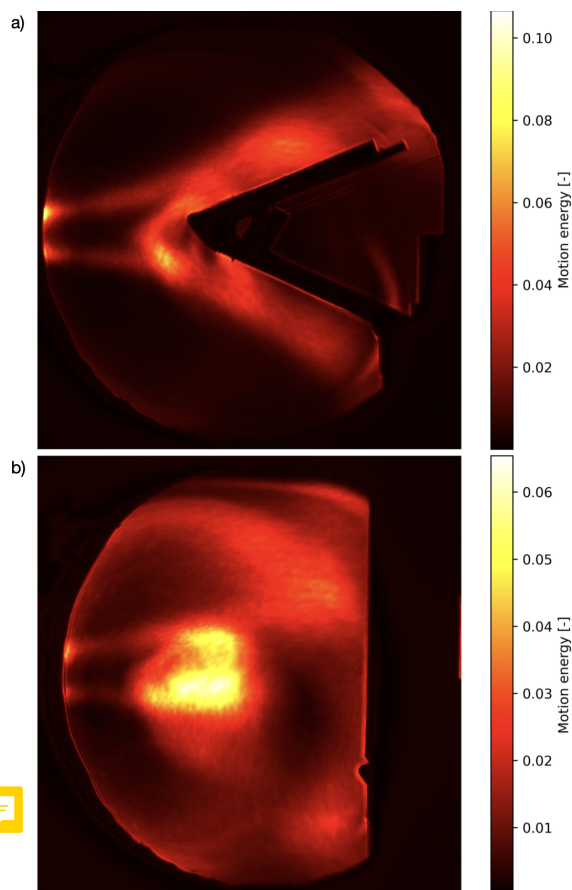


FIGURE 3 – Énergie du mouvement d'un flux d'air créé par un séchoir à cheveux projeté sur un coin formé de deux segments formant un angle de 25° [a)] et 90° [b)] avec la bissectrice.

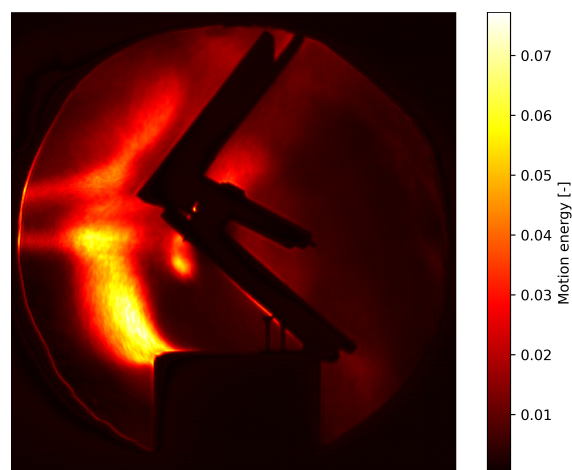


FIGURE 4 – Énergie du mouvement sur un obstacle concave. La région circulaire de haute énergie dans le coin inférieur gauche illustre le mouvement de convection causé par la cavité.

TABLEAU 1 – Moyenne de l'énergie du mouvement sur l'ensemble de l'image et écart-type de l'énergie sur la région de l'écoulement pour différents angles entre les segments et la bissectrice. Les incertitudes proviennent d'un calcul d'incertitude statistique. La ligne «vide» réfère à un écoulement sans objet et la ligne «ref.» réfère à l'absence d'écoulement et d'objet. La valeur élevée de l'écart-type sur l'énergie dans la ligne «vide» est explicable par l'absence d'obstruction causée par l'objet, augmentant ainsi la taille et la longueur de l'écoulement et donc la variance des vitesses dans ce dernier. La ROI de la ligne «ref.» est la totalité du miroir.

Angle [°]	Énergie moyenne [-]	Écart-type sur la ROI [-]
±5	±0.001	±0.005
25	0.008	0.090
35	0.008	0.090
45	0.008	0.100
60	0.010	0.110
90	0.009	0.160
vide	0.008	0.18
ref.	0.003	0.003

L'effet de formes concaves face à l'écoulement d'air a également pu être évalué qualitativement en plaçant un angle en bois sur une surface plane, créant ainsi une cavité dans laquelle l'écoulement subit un mouvement de convection. Ce mouvement de forme spirale est présenté à la Figure 4 et la turbulence principale le long du segment supérieur de l'angle est visible.

Analyse

Malgré l'essai de plusieurs angles et configurations d'avions en papier, l'écoulement créé n'interagissait pas significativement avec l'avion, résultant en un flux d'air principalement non affecté. Ce manque d'interaction est grandement responsable de la faible qualité des données et ainsi de l'impossibilité d'analyser directement un avion en papier. Ainsi, la taille de l'objet est un facteur limitant, car les objets doivent être plus grands que l'écoulement. Les mesures subséquentes ont donc été effectuées avec des objets représentant diverses caractéristiques des avions en papier, mais avec une taille et une rigidité considérablement plus importantes.

Les formes obtenues aux Figures 3 et 4 permettent d'étudier l'effet de certaines caractéristiques d'un avion en papier, permettant de remarquer les effets turbulents induits. Tel qu'attendu, l'écoulement devient très turbulent face à un mur étant donné l'induction d'un mouvement inverse à celui de l'écoulement, tel que vu à la Figure 3. À titre de comparaison, l'angle de 25° produit un écoulement globalement moins turbulent puisqu'il est

restreint aux surfaces des segments formant l'angle. La Figure 4 permet de constater la grande turbulence induite par la surface concave face à l'écoulement, où un mouvement de convection est visible dans la section inférieure concave, mais non dans la section supérieure, sans cavité. Il est possible d'inférer de ces résultats la forme optimale d'un avion, soit des ailes formant le plus petit angle possible et des surfaces uniquement convexes face au profil.

Les Énergies moyennes du Tableau 1 indiquent que l'ensemble des prises de mesures sont effectuées avec des intensités d'écoulement égales, donc des conditions expérimentales équivalentes. La comparaison avec la mesure du jet sans objet indique que la totalité de celui-ci a été visualisée dans chaque prise de mesure. L'analyse des écarts-types du même tableau indique que l'augmentation de l'angle avec la bissectrice implique l'augmentation de la dispersion de l'écoulement et ainsi de l'interaction entre ce dernier et l'objet. Il est donc possible de supporter quantitativement qu'une structure formée d'angles plus faible impliquera une réduction de la résistance de l'air. Ces conclusions sont cohérentes avec la théorie qui indique qu'un angle plus grand implique une augmentation de la déviation du vecteur de quantité de mouvement du fluide et ainsi applique une force accrue sur l'objet [5]. La comparaison avec la mesure de référence indique bien une augmentation d'énergie liée à la présence d'écoulement et une augmentation de l'écart-type lié à la présence de turbulence.

Les résultats, quoique plausibles, indiquent une méthode imparfaite par le recoupement de plusieurs données et l'analyse principalement qualitative. Notamment, les restrictions sur la taille de l'objet, soit plus grand que l'écoulement et plus petit que le miroir, limitent la précision des mesures. De plus, le montage utilisé ne pouvait pas être aligné sur une platine d'expérimentation. Ceci rendait difficile la minimisation des variations d'intensité et de contraste entre les différentes mesures. Ainsi, certaines prises de mesures possèdent des artéfacts ou de trop faibles contrastes pour permettre une analyse viable. L'accès à

une soufflerie et un miroir plus grand permettrait des mesures facilement analysables, et ce, avec la même technique d'imagerie.

Conclusions

En bref, l'imagerie Schlieren a permis l'étude indirecte des caractéristiques optimales d'un avion en papier étant donné l'incapacité d'analyser conclusivement l'avion lui-même. Toutefois, l'effet de la forme des ailes ou de la concavité de l'avion a pu être étudié à partir d'objets massifs illustrant une propriété spécifique de l'avion. L'analyse des écarts-types de l'énergie du mouvement a permis de conclure que la dispersion de l'écoulement augmente pour une surface de plus en plus plane face au flux d'air. Il est intéressant de noter qu'une adaptation du montage pourrait être effectuée afin d'étudier des effets similaires à la turbulence observée, mais dans un milieu d'eau, permettant alors de visualiser les différences de perturbation causée par divers corps entre un écoulement d'air et un écoulement d'eau.

Références

- ¹H. D. GOODFELLOW et Y. WANG, *Industrial Ventilation Design Guidebook*, 2^e éd. (Academic Press, 2021).
- ²C. C. MINCEMOYER, *Airplane explorations*, (2015) <https://extension.psu.edu/programs/betterkidcare/content-areas/environment-curriculum/activities/all-activities/airplane-explorations>.
- ³T. A., *Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode - Ein Beitrag zur Experimentalphysik* (Max Cohen & Sohn, Bonn, 1864).
- ⁴P. KREHL et S. ENGEMANN, « August Toepler — The first who visualized shock waves », *Shock Waves* 5, 1-18 (1995).
- ⁵B. R. MUNSON, A. P. ROTHMAYER, T. H. OKIISHI et W. W. HUEBSCH, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7^e éd. (Wiley, 2012).