

VISUALISATION DES GRADIENTS DE DENSITE PAR TECHNIQUE SCHLIEREN



Etudiants :

Ewen BOURGEON

Théo FERDIN

Matteo LECOQ

Anaïs MARCHAND

Adrien POMMIER

Enseignant-responsable du projet :

Nabil Mokrani

Date de remise du rapport :

10/06/2022

Référence du projet :

STPI/P6/2022 – 42

Intitulé du projet :

Visualisation des gradients de densité par technique Schlieren

Type de projet :

Recherches bibliographiques et expériences optiques

Objectifs du projet :

Découvrir les techniques de visualisation des gradients de densité et comprendre leur fonctionnement.

Mettre en place des protocoles expérimentaux et réaliser des manipulations suivant la méthode Schlieren.

Mots-clefs du projet :

Optique - Schlieren - Gradient de densité

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. Définitions	8
4. Histoire de Schlieren	10
4.1. Les Travaux de Foucault	10
4.2. L'invention de la méthode	11
4.3. Les travaux de Schardin	11
4.4. Évolutions et méthodes alternatives	13
5. Méthodes optiques de visualisation	15
5.1. Ombroscopie	15
5.2. Technique Schlieren	16
• Technique Schlieren avec deux lentilles convergentes	16
• Technique Schlieren avec un miroir concave	17
• Technique Schlieren avec deux miroirs concaves	18
5.3. Méthode B.O.S (Background Oriented Schlieren)	18
5.4. Interférométrie	21
6. Applications de la méthode Schlieren	24
6.1. Aérodynamique	24
6.2. Combustion	26
6.3. Convection des gaz et transfert thermique	28
6.4. Écoulements hydrodynamiques	32
7. Expériences	35
7.1. Montage Schlieren	35
7.2. Méthode BOS	39
7.3. Simulation numérique de convection naturelle	42
8. Conclusion	47
9. Bibliographie	48

1. INTRODUCTION

Lors de ce quatrième semestre de STPI nous sommes amenés à réaliser un projet de physique, avec pour objectif l'entraînement à la conduite de projets en groupe, à la recherche scientifique et à la réalisation d'expériences.

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudié la méthode Schlieren. Cette technique d'imagerie permet de visualiser les gradients de densité des fluides, invisibles à l'œil nu. C'est un sujet particulièrement intéressant car il permet d'observer et de mieux comprendre les phénomènes d'écoulement d'air et de convection qui sont omniprésents dans notre quotidien, mais la plupart du temps invisibles. De plus, la réalisation d'expérience nous a permis de visualiser directement ces phénomènes physiques et de comprendre concrètement leurs comportements. La mise en place des expériences ainsi que des simulations a été un réel défi auquel nous avons dû faire face en équipe.

Notre projet se divise en trois parties principales :

- Premièrement une recherche documentaire sur les phénomènes à étudier et les différentes méthodes possibles
- Ensuite l'élaboration de protocoles expérimentaux pour utiliser ces méthodes
- Et enfin la réalisation des différentes expériences

Ce rapport a donc pour but de présenter le travail accompli durant ce semestre. Dans un premier temps, nous traiterons de l'histoire des différentes méthodes Schlieren, comment et par qui elles ont été créées, quelles évolutions elles ont connues au fil des années.

Ensuite, nous expliquerons le fonctionnement de cette méthode ainsi que ses variantes.

Par la suite, nous détaillerons leurs applications concrètes dans l'industrie, la science et l'ingénierie, et montrerons quelles avancées elles ont permises.

Enfin, nous détaillerons les différentes expériences que nous avons pu réaliser et les analyses que nous en avons tirées.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Puisque ce projet était assez conséquent et que nous étions cinq à travailler dessus, nous avons dû nous organiser, définir une méthodologie pour le bon déroulement du projet.

Après avoir pris connaissance du sujet, nous avons choisi de commencer d'abord par la partie bibliographique. Nous avons donc fait des recherches poussées sur la technique Schlieren et ses applications en nous attribuant un angle de recherche parmi les suivants :

- L'histoire de la méthode Schlieren
- L'explication des différents montages optiques possibles
- La BOS
- Les applications

Ensuite, pendant cinq semaines nous avons mené à bien les différentes expériences que nous voulions réaliser en travaillant par demi-groupes : un groupe pour le montage classique avec davantage d'objets à observer, un autre pour le montage BOS et la simulation.

Enfin les deux dernières semaines ont été consacrées à la finalisation du rapport, l'élaboration du poster et la préparation de notre soutenance.

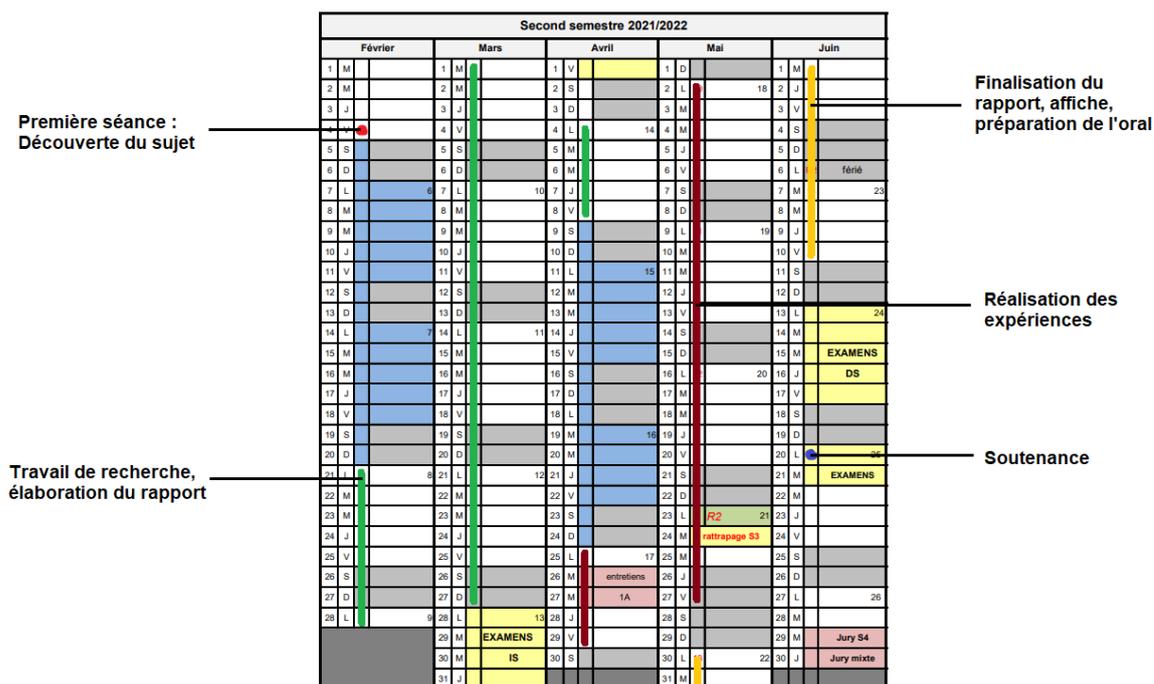


Figure 1 : Répartition des tâches dans le temps

Organigramme de répartition des tâches

	Anaïs	Matteo	Ewen	Théo	Adrien
Recherches Rapport	Ombroscopie Schlieren Interférométrie	Explication BOS Simulation	Applications	Applications Détail des expériences	Histoire Définitions Méthodologie
Expériences principales	Schlieren Chaud Froid Explosion	BOS Simulation	BOS Simulation	Schlieren Chaud Froid Explosion	Schlieren Chaud Froid Explosion

Figure 2 : Organigramme de répartition des tâches

3. DEFINITIONS

Mouvement supersonique :

Déplacement effectué à une vitesse supérieure à celle du son, à savoir 340 m/s en moyenne. Les phénomènes supersoniques (écoulement, onde de choc, ...) sont difficiles à étudier physiquement.

Flux d'air :

Le flux d'air est la quantité d'air circulant par unité de temps sur un circuit donné. Peut-être caractérisé comme laminaire ou turbulent.

Lumière collimatée :

Une lumière est collimatée si ses rayons sont parallèles, colinéaires. Elle ne se disperse pas ou très peu avec la distance.

Gradient de densité :

Le gradient de densité est la variation spatiale de densité (d'un fluide) sur une surface donnée. En aérodynamique notamment, on cherche à connaître le gradient de densité de l'air.

Turbulence :

En mécanique des fluides, la turbulence est un mouvement de fluide chaotique par ses changements désordonnés de pression et de vitesse d'écoulement. Par exemple l'écoulement d'air en sortie d'échappement.

Laminaire :

A l'inverse du flux turbulent, un flux laminaire a lieu quand le fluide se présente en couches parallèles, continues qui glissent les unes sur les autres. Par exemple l'écoulement de l'eau dans un fleuve.

Shadowgraph :

C'est une méthode optique, voisine de la méthode Schlieren, ayant pour but de visualiser les impuretés de milieux transparents. Comme son nom l'indique, elle utilise les ombres des objets considérés.

Convection :

La convection regroupe tous les mouvements internes d'un fluide causés par les déplacements de particules en son sein. La convection est par ailleurs une méthode de transfert de chaleur : un corps en se déplaçant transporte sa chaleur.

Computational fluid dynamics :

La « Computational fluid dynamics » (CFD), littéralement (l'étude) numérique de la mécanique des fluides ; est une branche de la mécanique des fluides utilisant l'analyse numérique et des

algorithmes scientifiques pour simuler, analyser et résoudre des problèmes d'écoulement des fluides.

Réfraction :

La réfraction est le changement de direction que subit un rayon lumineux quand il change de milieu de propagation.

Indice de réfraction :

Obtenu par la formule " $n = c / v$ " avec c vitesse référence de la lumière et v vitesse dans le milieu. L'indice de réfraction caractérise la capacité d'un milieu à ralentir et/ou dévier un rayon.

Focaliser la lumière :

Faire converger en un point tous les rayons d'une source de lumière.

Adiabatique :

Situation dans laquelle aucun transfert thermique n'a lieu.

Écoulement :

Mouvement d'un fluide autour d'un corps.

Caloduc :

Système de transport de chaleur dans le but de refroidir une pièce d'un mécanisme.

Pyrocumulonimbus :

Nuage et/ou phénomène convectif de grande extension verticale provoqué par des phénomènes violents (explosions, volcan, feu de forêt).

Instabilité de Rayleigh-Taylor :

Instabilité concernant deux fluides de densité différentes. Résultat de la poussée du fluide le plus lourd sur le fluide le plus léger.

4. HISTOIRE DE SCHLIEREN

4.1. Les Travaux de Foucault

Léon Foucault est un physicien et astronome français du XIXème siècle, principalement connu pour ses travaux en optique.

Il fait ses études au collège Stanislas, puis est diplômé de la faculté des sciences de Paris.

Parmi ses découvertes marquantes : on peut évoquer le gyroscope, le calcul de la vitesse de la lumière, sa démonstration expérimentale que la terre tourne sur son axe à l'aide d'un pendule de 67 mètres. Il a aussi accrédité la théorie de l'optique ondulatoire en démontrant que la lumière se déplaçait plus rapidement dans l'air que dans l'eau.

Enfin il a imaginé le test de Foucault pour les télescopes qui nous intéresse tout particulièrement dans notre sujet.

Il reste l'un des plus éminents scientifiques de son époque, son nom sera inscrit sur la Tour Eiffel pour avoir "honoré la France par ses travaux".



Figure 3 : Léon Foucault

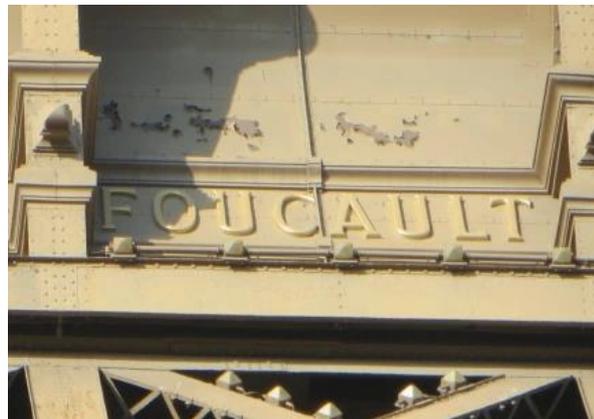


Figure 4 : Nom du savant inscrit sur la tour Eiffel

Le test de Foucault ou knife-edge test en anglais, est une méthode simple et peu coûteuse à mettre en place, pour déterminer la courbure d'un miroir concave. Comme indiqué sur le schéma ci-dessous, il ne nécessite que d'une lame, d'une source de lumière et d'un observateur humain.

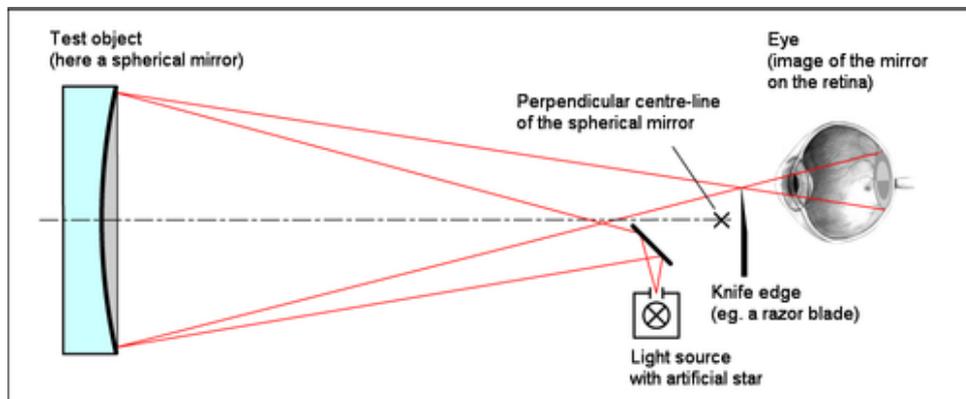


Figure 5 : Schéma du test de Foucault

Ce test est principalement utilisé pour créer des télescopes, en vérifiant la viabilité du miroir primaire qui doit être sphérique pour correctement concentrer les rayons lumineux en entrée du télescope.

Ce test fut inventé par Foucault en 1858 et il sera repris et adapté par August Toepler pour la méthode Schlieren. [1]

4.2. L'invention de la méthode

Le véritable inventeur de la méthode Schlieren est August Toepler, un physicien et chimiste allemand du XIX^{ème} siècle, ayant fait de grandes découvertes en optique et en électrostatique notamment.

August Toepler est né en 1836 et a d'abord fait des études de chimie au Gewerbe-Institut de Berlin et à l'université de Jena, avant de se pencher sur la physique expérimentale. Il sera alors professeur et chercheur à Poppelsdorf puis à l'institut polytechnique de Riga. C'est à cette époque, entre 1859 et 1868 qu'il fait ses découvertes les plus marquantes : la méthode Schlieren et la machine de Toepler.

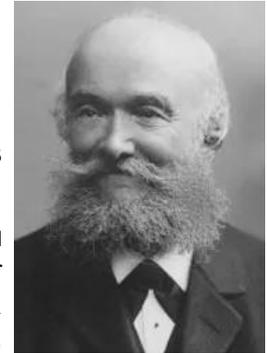


Figure 6 : August Toepler

La méthode Schlieren, signifiant 'traînée' est une méthode expérimentale permettant de visualiser des gradients de densité de fluides : gaz, liquides, sons. Par ailleurs, Toepler est le premier à mettre en évidence des ondes de chocs, leurs propagation, diffraction et réflexion ; à l'aide de ce procédé.

Cette méthode Schlieren possède de très nombreuses applications de nos jours, dans ses versions perfectionnées, en ingénierie, en acoustique, en propulsion...

August Toepler s'est en fait inspiré du test de Foucault. (permettant de vérifier qu'un miroir est concave pour les télescope avec une lame de couteau) [2], [3]

4.3. Les travaux de Schardin

Hubert Schardin est ingénieur et expert en balistique allemand (1902-1965).

Après avoir travaillé en Chine à l'élaboration d'un institut de balistique dans les années 30, il rentre en Allemagne où il occupe le poste d'enseignant-chercheur au Technical College of the German Air Force jusqu'à la fin de la guerre. C'est à cette époque qu'il développe des modèles de caméra haute vitesse et une méthode alternative de Schlieren (Focusing Schlieren optical system).

En 1945, Schardin et son équipe sont invités à reprendre leur recherche en Alsace à l'Institut de recherche de Saint-Louis pour la France.

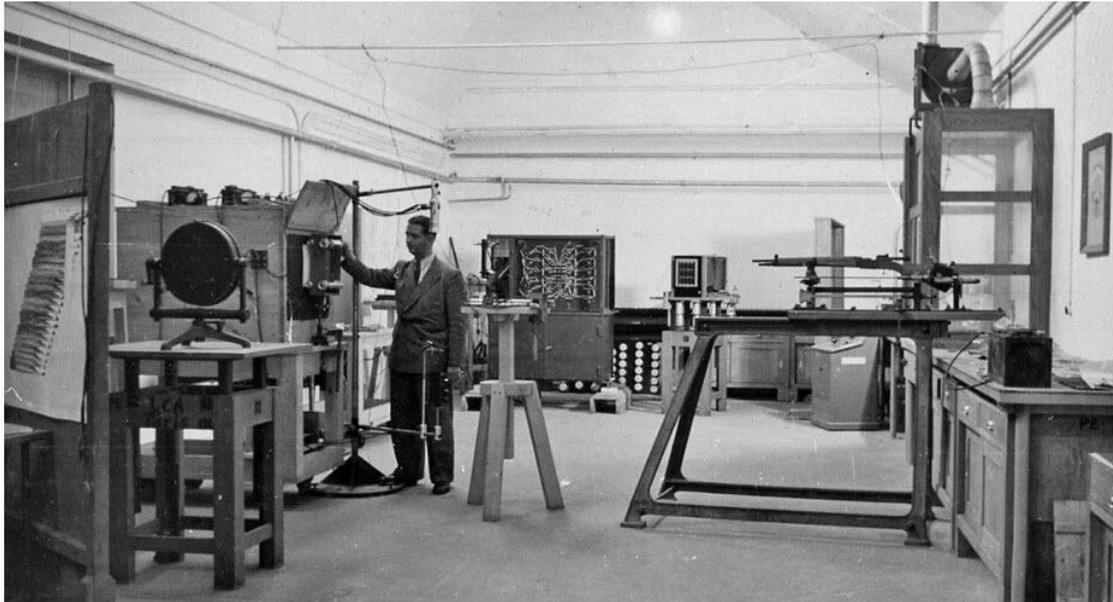


Figure 7 : Schardin dans son laboratoire de Saint-Louis

Par la suite, ce laboratoire deviendra transfrontalier dans le cadre du rapprochement entre la France et l'Allemagne. Hubert Schardin devint un pionnier de la coopération scientifique dans l'Union Européenne.

Les deux images ci-dessous ont été réalisées par Schardin.

A gauche il s'agit d'une balle traversant à grande vitesse la flamme d'une bougie, obtenu avec le Focusing Schlieren optical system.

A droite c'est le shadowgraphe d'une onde de choc se heurtant à un obstacle triangulaire, observé par shadowgraphie. [4], [5], [6]



Figure 8 : Balle traversant à grande vitesse la flamme d'une bougie

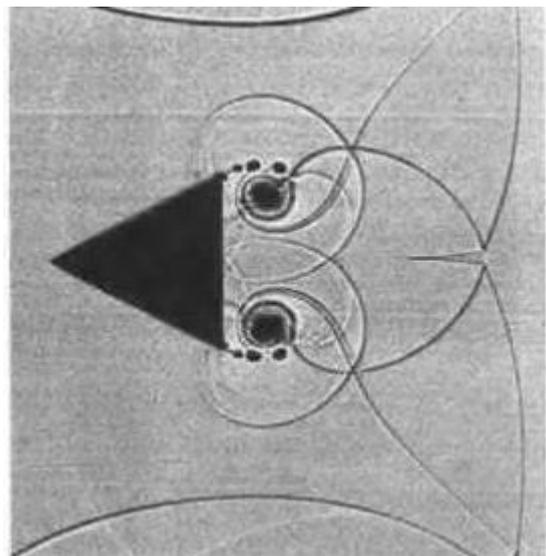


Figure 9 : Shadowgraphe d'une onde de choc

Hubert Schardin a donc beaucoup étudié la méthode Schlieren et a été en mesure, grâce à ses inventions de caméras haute vitesse, de suggérer une autre méthode, le Focusing Schlieren optical system. C'est R.A Burton qui dans les années 50 sera en mesure de mettre en œuvre ce système dont le fonctionnement est illustré ci-dessous.

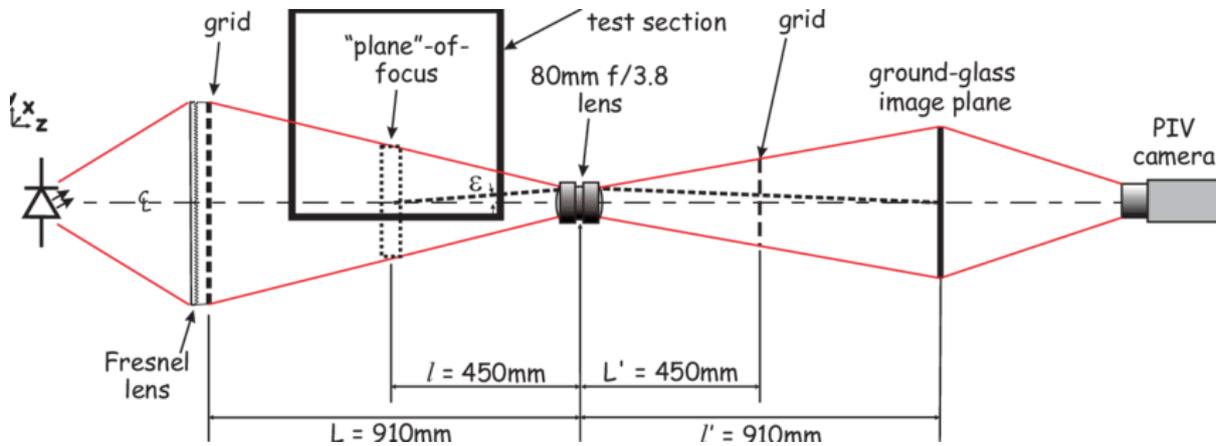


Figure 10 : Schéma du Focusing Schlieren optical system

Ce système a pour avantage d'être plus simple à mettre en œuvre, moins imposant. Par ailleurs, il donne des résultats plus nets mais nécessite un matériel plus coûteux notamment une caméra haute vitesse. [7]

4.4. Évolutions et méthodes alternatives

Par la suite, pendant la fin du XXème siècle et jusqu'à nos jours au XXIème siècle, les recherches sur la strioscopie et les méthodes Schlieren se sont poursuivies et de nouveaux procédés ont vu le jour. Une évolution majeure est la Background-Oriented Schlieren technique. Pour utiliser cette méthode il est seulement nécessaire de disposer d'une caméra haute vitesse de relativement bonne qualité. (Il est possible d'avoir des résultats avec une caméra de téléphone par exemple, mais la qualité du rendu sera bien meilleure avec une caméra haute vitesse scientifique, beaucoup plus coûteuse) Il est alors possible de visualiser les gradients de densité provoqué par tout objet sans vraiment de limite de taille, à condition qu'il se trouve devant un fond (background) propice.

Ce sont entre autres des scientifiques de la NASA qui ont contribué à développer ce système, et l'ont utilisé sur des avions ou des modules spatiaux au décollage. [8], [9], [10]

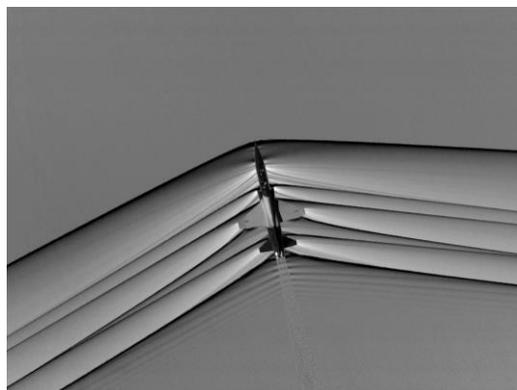


Figure 11 : Image d'un avion par BOS



Figure 12 : Procédure de BOS sur un hélicoptère

De nombreuses autres variantes d'imagerie Schlieren existent et continuent à se développer pour répondre à des besoins industriels précis. On peut ainsi évoquer la déflectométrie laser Schlieren, utilisée dans l'industrie pour mesurer la température d'un gaz dans des conditions microscopiques.

Il existe aussi une variante appelée "Rainbow Schlieren" qui remplace dans la méthode classique la lame de Foucault par un filtre multicolore pour avoir un rendu peut-être plus facile à distinguer que des teintes de gris. Ci-dessous avec la flamme d'une bougie.

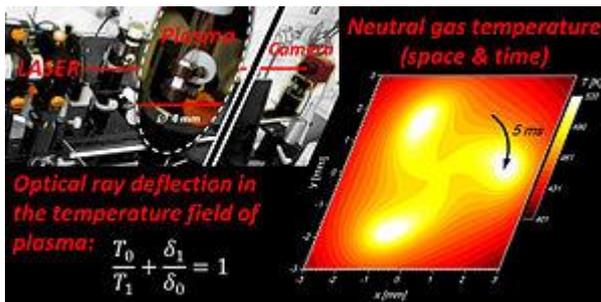


Figure 13 : Principe de la déflectométrie laser Schlieren

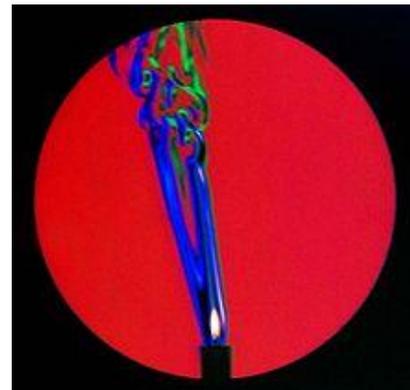


Figure 14 : Image obtenue par Rainbow Schlieren

Enfin, une multitude d'autres méthodes ou variantes existent pour des problèmes aussi divers que l'astronomie, les transferts de chaleur, l'ophtalmologie, la propulsion.

5. METHODES OPTIQUES DE VISUALISATION

5.1. Ombroscopie

L'ombroscopie peut être observée en dehors des laboratoires de recherche puisque, dans sa forme la plus simple, elle ne nécessite aucun composant optique. En effet, on peut par exemple visualiser l'ombre d'une bougie sur une surface plane ainsi que la présence d'ombres mouvantes au-dessus de la flamme illustrant le principe de convection.

Au XVII^{ème} siècle, Robert Hooke réalise les premiers travaux de création d'un dispositif expérimental sur cette technique. Cependant, les premières ombroscopies ne sont publiées qu'au XVIII^{ème} siècle par Jean-Paul Marat, celles de Robert Hooke n'ayant pas été conservées.

Pour cette technique, on utilise un système optique composé d'une source de lumière ponctuelle, de deux lentilles convergentes et d'une caméra.

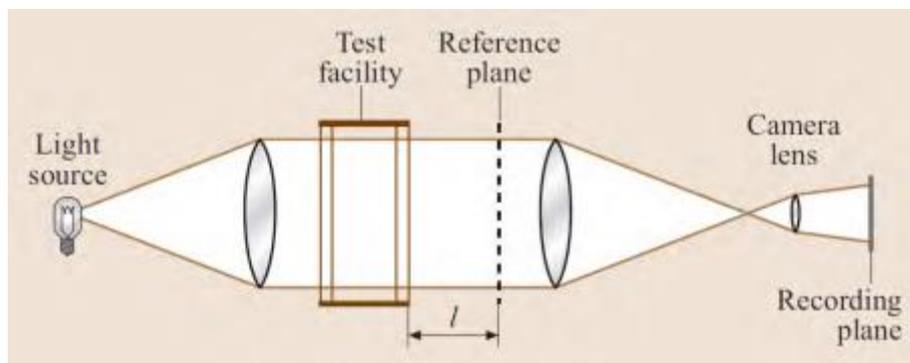


Figure 15 : Dispositif expérimental d'ombroscopie à faisceau parallèle (Tropea et al. (2006))

Les rayons lumineux émis par la source ponctuelle passent par le point foyer objet de la première lentille convergente, la traversent et en ressortent donc parallèles à l'axe optique. Ils traversent ensuite la zone où est placé l'objet et arrivent, toujours parallèles, sur la deuxième lentille. Enfin, ils sont rendus convergents à la sortie et passent par le point foyer image de cette lentille. Ils peuvent ainsi être enregistrés avec la caméra. On obtient une image en niveau de gris.

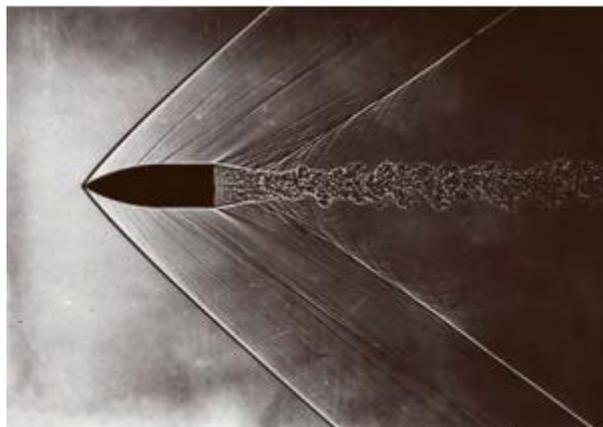


Figure 16 : Ombroscopie d'un projectile se déplaçant à une vitesse supersonique (image de l'ISL reprise dans Tropea et al. (2006))

La méthode de l'ombroscopie est sensible à la dérivée seconde. Cela implique que seuls les gradients de masse volumique importants sont correctement visualisés. Les zones lentement variables, de gradients faibles sont ainsi difficilement observables. [11]

5.2. Technique Schlieren

La technique Schlieren, aussi appelée Strioscopie, permet de visualiser la convection thermique, phénomène invisible à l'œil nu. Pour cela, on utilise un système optique composé d'une caméra, d'une source de lumière ponctuelle permettant d'éclairer un objet, d'un élément optique convergent permettant de focaliser la lumière (un miroir concave ou bien deux lentilles convergentes) et d'un couteau de Foucault placé au point focal qui va ainsi bloquer la lumière focalisée. [12]

Dans le cas d'un flux de densité uniforme, ce couteau a pour effet de rendre la photo obtenue sur la caméra deux fois moins lumineuse.

Dans le cas d'un écoulement avec des variations de densité, les rayons lumineux sont alors soumis aux variations de l'indice de réfraction causées par les gradients de densité dans le fluide. Ces différences de densité sont liées à des variations de température, de pression ou de composition du milieu. La trajectoire initiale des rayons est ainsi modifiée et ils se focalisent de manière imparfaite. Cette déviation des rayons crée une variation spatiale de l'intensité de la lumière. On obtient ainsi des tâches plus claires et plus sombres qui correspondent à des gradients de densité de fluide positifs et négatifs dans la direction normale au tranchant du couteau. [13]

Pour résumer, le principe de la technique Schlieren est de faire converger tous les rayons lumineux en un point et de mettre en ce point un obstacle, ici un couteau de Foucault. Les rayons qui ne sont pas déviés vont être bloqués par l'obstacle. Les rayons qui ont été déviés vont passer à côté de cet obstacle et vont donc traverser jusqu'à la caméra. On a ainsi une image seulement composée des rayons déviés. [14]

La strioscopie est sensible à la dérivée première. Contrairement à l'ombroscopie, elle est donc plus adaptée pour des écoulements de gradients de masse volumique faibles. [11]

- **Technique Schlieren avec deux lentilles convergentes**

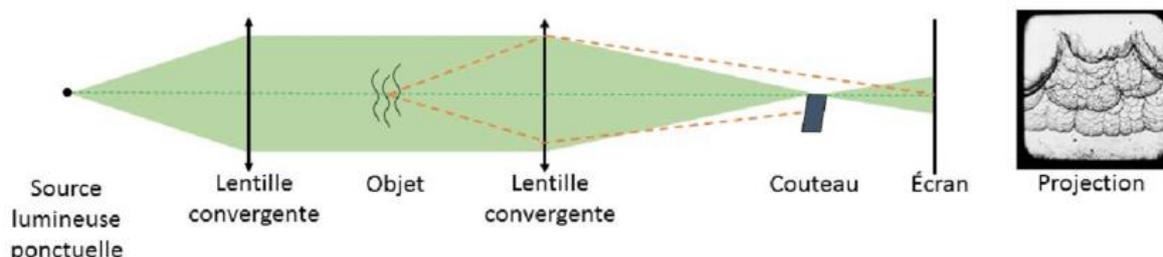


Figure 17 : Dispositif expérimental Schlieren à deux lentilles convergentes

La source lumineuse ponctuelle est placée sur le point foyer objet de la première lentille convergente. Les rayons lumineux émis par cette source passent alors par le point foyer objet de la lentille et la traversent. Ils en ressortent donc parallèles à l'axe optique.

Les rayons émergents qui :

- Ne passent pas par l'objet placé entre les deux lentilles convergentes, ne sont pas déviés et arrivent toujours parallèles à l'axe optique sur la deuxième lentille. Ils la traversent et passent par le point foyer image de cette deuxième lentille. Le couteau

de Foucault, placé sur ce point foyer image, va permettre de bloquer environ la moitié de ces rayons lumineux. On obtient donc un fond d'image gris.

- Passent par l'objet opaque, sont bloqués par celui-ci. L'objet apparaît donc en noir sur la caméra.
- Passent par le fluide sont déviés. [11], [15]

Pour expliquer ce phénomène de déviation, nous allons prendre l'exemple d'une bougie qui serait l'objet placé entre les deux lentilles. Les rayons lumineux réfractés par la première lentille, qui traversent la colonne d'air chaud au-dessus de la bougie, changent légèrement de direction. Ils sont en fait réfractés puisque l'indice de réfraction de l'air chaud est différent de celui de l'air plus froid autour de la bougie. En effet, on a : $n(\text{air}) \approx 1$ à 0°C et $1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$ mais l'air plus chaud a un indice de réfraction plus bas.

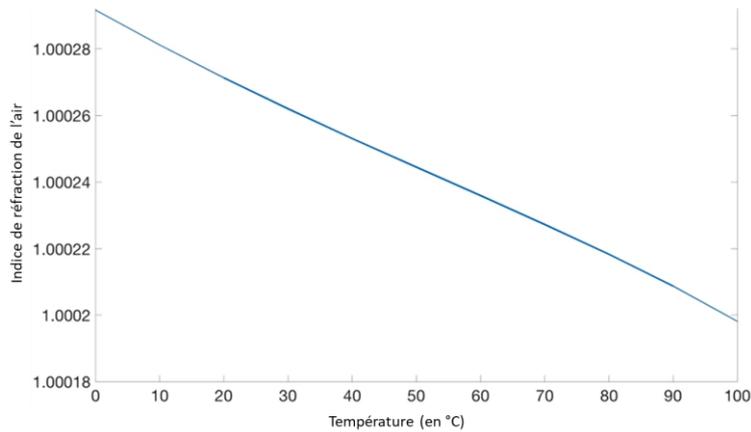


Figure 18 : Evolution de l'indice de réfraction de l'air en fonction de la température

Cette différence entre les indices de réfraction étant extrêmement petite, on ne remarque pas la déviation de la lumière à l'œil nu. Cependant, les rayons lumineux qui auraient dû passer au-dessus du couteau de Foucault sont déviés vers le bas et donc bloqués par celui-ci. Il se forme ainsi des tâches plus sombres sur l'image. Les rayons qui auraient dû être bloqués par le couteau de Foucault sont eux déviés vers le haut et passent au-dessus de celui-ci. On observe donc des tâches lumineuses sur l'image. Ainsi, l'image obtenue présente des zones plutôt noires ou blanches selon l'orientation de la déviation des rayons lumineux. [16]

• **Technique Schlieren avec un miroir concave**

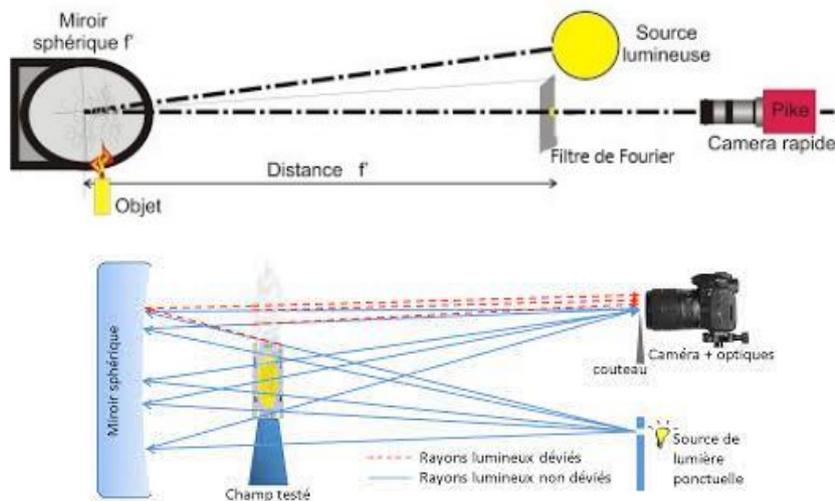


Figure 19 : Dispositif expérimental Schlieren avec un miroir concave

On place la source de lumière ponctuelle dans le plan focal du miroir concave. Le miroir convergent forme l'image de la source composée de tous les rayons non déviés qui se rejoignent en un même point. En masquant ces derniers à l'aide d'un couteau de Foucault dans le plan image, seuls les rayons déviés vont pouvoir franchir l'obstacle comme expliqué précédemment avec la configuration à deux lentilles convergentes. On obtient donc une image présentant des variations de contraste. Celles-ci sont modulées par les changements de température, de pression ou de composition du milieu liés à l'objet étudié et dont l'intensité est proportionnelle à ces variations. [12], [17]

- **Technique Schlieren avec deux miroirs concaves**

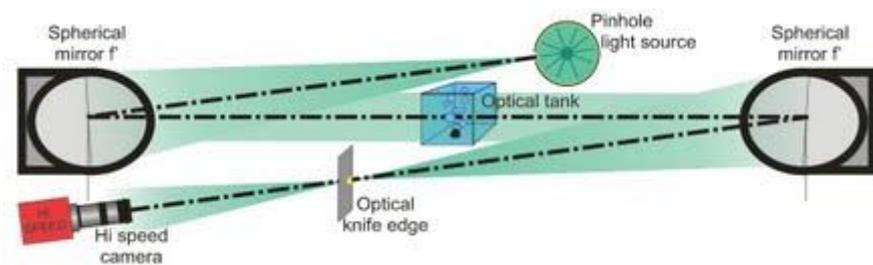


Figure 20 : Dispositif Schlieren en configuration Z

La configuration avec deux miroirs concaves de type Z est très répandue dans la pratique. En effet, on peut obtenir une plus grande zone de test grâce à cette méthode, sans avoir à augmenter la taille des miroirs. Cela permet donc d'éviter l'utilisation d'un grand miroir coûteux, nécessaire à la configuration avec un seul miroir lorsque l'écoulement étudié est de taille importante. De plus, cette méthode est plus précise qu'avec un montage à un seul miroir.

La source lumineuse est dirigée vers le premier miroir concave et collimatée. Les rayons lumineux sont donc parallèles et se propagent uniformément dans la zone entre les deux miroirs où se trouve l'objet étudié. Ils sont focalisés par le deuxième miroir concave. Les rayons non déviés arrivent donc sur le couteau de Foucault. Les rayons déviés vont passer au-dessus de la lame ou bien être bloqués par cette dernière comme expliqué précédemment. Finalement, on observe que les rayons lumineux se sont déplacés en forme de "z", d'où le nom du montage. [17]

5.3. Méthode B.O.S (Background Oriented Schlieren)

Explication de la méthode :

L'imagerie Schlieren ou B.O.S pour Background Oriented Schlieren, se base sur la déviation des rayons lumineux traversant un milieu dont la densité n'est pas uniforme et donc qui a des indices de réfraction différents.

Contrairement à la méthode classique, la méthode BOS se base sur la corrélation d'image numérique. La caméra enregistre soit le mouchetis (l'arrière-plan) seul directement (rayon rouge sur le schéma ci-dessous) soit son image à travers un écoulement. Dans cet écoulement, le rayon est dévié de sa trajectoire initiale et impacte un autre pixel de la caméra.

En effet, c'est en comparant ou plutôt corrélant l'image du mouchetis seul et à travers l'écoulement que nous pouvons voir chaque déplacement local du mouchetis et ainsi trouver les variations d'indice de réfraction et donc de densité du milieu étudié grâce au logiciel de traitement qui dérive de la PIV (Vélocimétrie par Image de Particules en français).

La PIV est une méthode de mesure qui permet de caractériser un écoulement à partir d'une image numérique. [10]

Avantages et inconvénients :

La technique B.O.S à donc de nombreux avantages, non seulement elle permet de visualiser un écoulement à une échelle beaucoup plus élevée que la strioscopie qui elle est limité par la taille du miroir, ce qui permet de réaliser des études hors laboratoire à échelle. Mais aussi nous pouvons remarquer la simplicité du banc expérimental pour cette technique qui la rend aussi plus abordable. Nous avons besoin d'une caméra, du mouchetis, d'une source d'éclairage et d'un ordinateur pour le traitement des images.

A noter aussi que cette technique permet de pouvoir visualiser des écoulements en bidimensionnel ou tridimensionnel avec un traitement adapté.

En 2004 il a été démontré que la technique BOS permettait l'obtention de résultats équivalant à celle de la strioscopie.

Il y a quand même des défauts apparents, parmi ceux-ci on trouve une grande sensibilité aux vibrations, qui rajoutent des déplacements d'ensemble aux déplacements liées à l'écoulement. Il faut donc corriger ces déplacements lors du traitement pour ne pas interférer avec les déplacements réellement liés à l'écoulement.

Il faut bien comprendre que contrairement à la strioscopie, la BOS capte un déplacement de pixel et non un angle de déviation des rayons lumineux. Ce qui veut dire que la BOS est plus proche de l'ombroscopie que de la strioscopie en termes de sensibilité. Il est donc préférable d'étudier des écoulements dans lesquels les gradients de densité sont relativement élevés.[11]

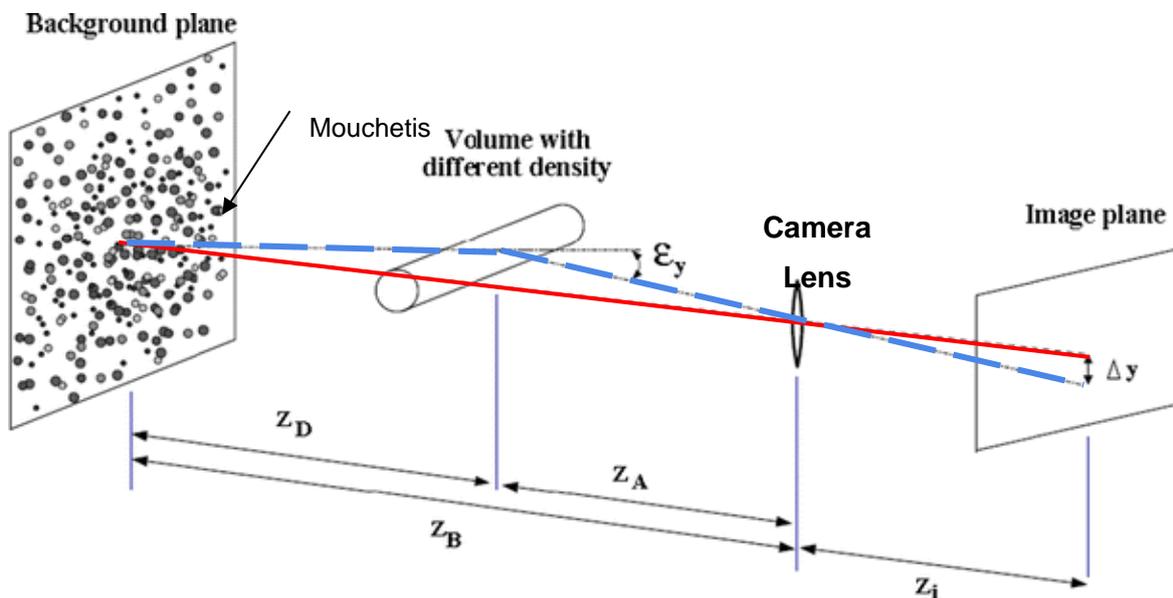


Figure 21 : Dispositif expérimental BOS

Pour l'expérience de dimensionnement du banc expérimental :

Dimensionnement et sensibilité :

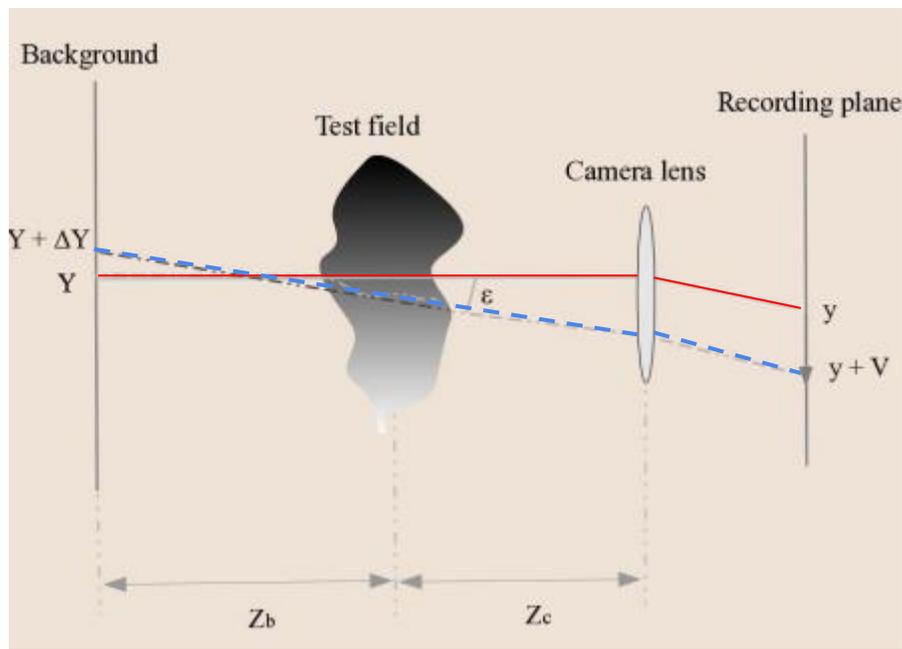


Figure 22 : Schéma BOS avec dimensions

Les équations affluent sur le banc expérimental de cette technique, permettant de déterminer avec précision la position des différents éléments du dispositif du banc expérimental et BOS.

Comme vu plus haut, à gauche nous avons l'écran au centre l'écoulement à visualiser et ensuite à droite la lentille et le capteur.

Le rayon de référence (au repos) traverse l'écran sans être dévié, c'est le rayon en trait continu.

Il part d'une position Y sur l'écran et est imagé à la position y sur le capteur de la caméra.

Le rayon dévié part de la même position que le rayon de référence mais il est dévié à travers l'écoulement et impacte le capteur de la caméra en position $y + V$. Sur la figure, ce rayon est prolongé à partir de la caméra afin de mettre en évidence d'où semble être issu ce point pour celle-ci. La raison semble issue du point en position $Y + \Delta Y$ (rayon pointillé bleu).

Maintenant pour visualiser l'écoulement, la BOS repose sur un traitement d'image. Pour faire simple on capture une image sans l'écoulement à visualiser qui est donc notre image repère. Ensuite on compare l'image avec l'écoulement à l'image de départ et nous pouvons observer l'angle de déviation de chaque pixel, qui semble intimement lié à l'indice de réfraction en ce point. Grâce à cet angle, on peut remonter au gradient de densité et donc visualiser l'écoulement.

Il faut noter que nous avons des moyens d'améliorer notre sensibilité, c'est-à-dire la capacité à capter des angles de déviations plus ou moins petits et donc voir les avec plus ou moins de détails les changements de densité.

Regardons les paramètres qui régissent le problème :

- La taille du champ / écoulement à visualiser, Y_f la demi taille de ce champ en mm
- La taille d'un pixel pix en mm/pixel, lié à la caméra
- La focale de l'objectif en mm

- La distance entre l'écran et l'écoulement Z_b en mm
- La distance entre l'écoulement et la caméra Z_c en mm

Ainsi que d'autres paramètres intermédiaires :

- Le grossissement G_r en mm/pix
- Le déplacement V en pixel
- La hauteur du point visualisé sur l'écran Y en mm
- La hauteur du point visualisé sur la caméra sans écoulement en pixel y en mm
- ΔY la différence de hauteur entre le rayon non réfracté et le rayon dont semble venir le rayon réfracté sur l'écran en mm

Pour dimensionner le banc expérimental nous avons :

- $G_r = \frac{Y}{y} = \frac{Z_b + Z_c}{f} \times pix$
- $\tan(\varepsilon) = \frac{\Delta Y}{Z_b}$ ε étant l'angle de déviation/réfraction
- $\Delta Y = G_r \times V$

On peut utiliser ici l'approximation des petits angles pour simplifier les calculs puisque dans un gaz les déviations sont faibles.

$$\text{Donc } \varepsilon = \frac{\Delta Y}{Z_b} = \frac{G_r \times V}{Z_b} = \frac{Z_b + Z_c}{Z_b \times f} \times pix \times V \quad (1)$$

La seconde équation qui régit le système est :

$$\frac{Yf}{Z_c} = \frac{Y}{Z_b + Z_c}$$

En remplaçant Y par $G_r \times y$ on obtient

$$\frac{Yf}{y \times pix} = \frac{Z_c}{f} \quad (2)$$

Pour dimensionner le banc nous avons donc 2 équations (1) et (2) et puisque notre caméra est choisie il nous reste plus que 2 inconnues Z_b et Z_c .

Néanmoins théoriquement, pour avoir la meilleure sensibilité possible, il faudrait une caméra avec une grande distance focale et des petits pixels. Ensuite il faut que Z_b soit le plus petit possible et Z_c le plus grand possible. [11]

5.4. Interférométrie

Un interféromètre est un instrument permettant de mesurer la différence de chemin (ou phase) entre deux rayons. Il y a deux méthodes d'interférométrie. L'interférométrie avec un faisceau de référence consiste à regarder la différence de phase entre un rayon ayant traversé l'écoulement étudié et un n'étant pas passé dans celui-ci. L'interférométrie différentielle consiste à étudier la différence de phase entre deux faisceaux ayant traversé l'écoulement à une faible distance l'un de l'autre.

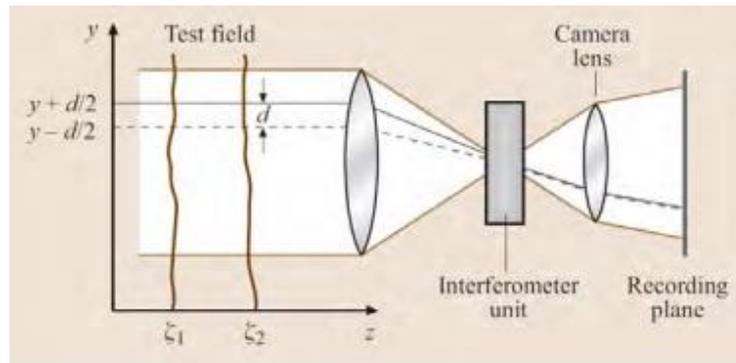


Figure 23 : Dispositif expérimental simplifié d'interférométrie différentielle (Tropea et al. (2006))

Sur la figure ci-dessus, on peut observer le dispositif simplifié d'un interféromètre. On distingue deux rayons, un en trait continu et un en pointillé, qui se combinent dans l'interféromètre. On considère que la distance d est très faible sur cette figure. Il s'agit donc de la méthode d'interférométrie différentielle. En général, on utilise un prisme de Wollaston comme interféromètre. Il est constitué de deux prismes en calcite ou quartz juxtaposés. Leurs axes optiques sont orthogonaux entre eux.

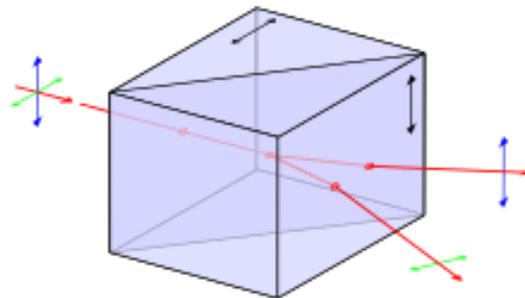


Figure 24 : Prisme de Wollaston avec les deux faisceaux sortants



Figure 25 : Panache convectif au-dessus d'une bougie visualisé par un interféromètre différentielle à prisme de Wollaston (Tropea et al. (2006))

Pour la méthode avec un faisceau de référence, on utilise l'interféromètre de Mach-Zehnder. Ce dispositif plus complexe, observable sur la figure ci-dessous, sépare largement les deux faisceaux en un qui traverse l'écoulement et un de référence qui ne le traverse donc pas. Il est composé de deux miroirs M_1 , M_2 et de deux séparateurs de faisceaux M'_1 , M'_2 . Cependant, ceux-ci doivent être adaptés à la taille de l'écoulement étudié. Ainsi, ce dispositif peut être très coûteux si l'écoulement présente une taille importante.

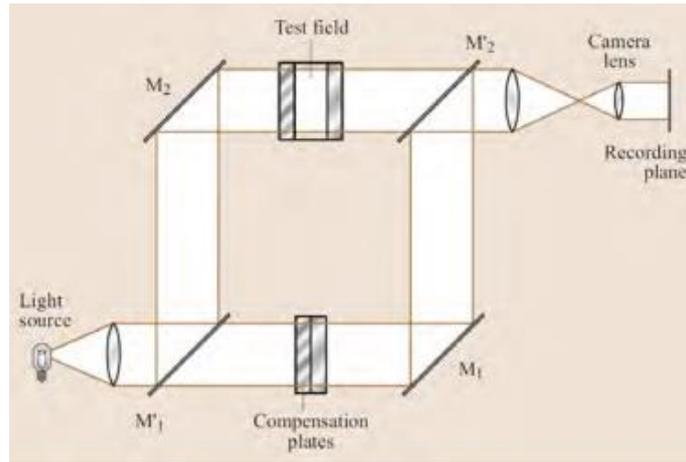


Figure 26 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder (Tropea et al. (2006))



Figure 27 : Interférogramme de Mach-Zehnder présentant la convection de Bénard dans un liquide (Tropea et al. (2006))

L'interférométrie holographique a permis d'apporter une solution à cet inconvénient de l'interférométrie avec un faisceau de référence. Grâce à cette méthode, il est possible d'enregistrer sur un seul hologramme les informations issues du rayon de référence et de celui ayant traversé l'écoulement. Le dispositif expérimental est alors simplifié puisque les deux enregistrements peuvent être effectués à des instants différents. L'hologramme créé retransmet la différence de phase entre les deux rayons.

Il est possible d'obtenir des interférogrammes en couleur grâce à l'utilisation de différentes longueurs d'onde pour les faisceaux.

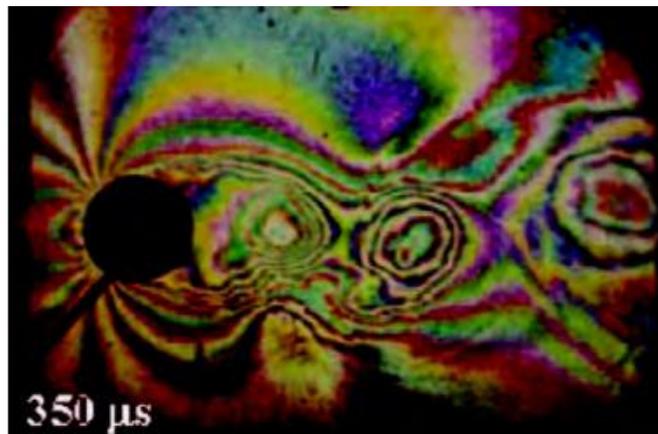


Figure 28 : Interférogramme issu de la technique d'interférométrie 3 couleurs (Desse et Tribillon (2009))

L'interférométrie a une sensibilité très importante. Elle nécessite l'analyse complexe des franges mais pas de phase d'intégration. [11]

6. APPLICATIONS DE LA METHODE SCHLIEREN

Les parties précédentes nous ont appris à utiliser la méthode, ainsi nous allons pouvoir parler de son utilité : dans quel domaine est-ce qu'on la retrouve. Cette méthode permet de voir le non visible mais ce que l'on cherche n'est parfois pas invisible.

Par exemple, en été lorsqu'il fait chaud, on peut apercevoir une nappe floue sur le bitume, c'est en fait le flux d'air qui est différent lorsqu'il est au contact d'une surface chaude, dans notre cas le bitume. Le gradient de température est alors bien plus fort à cet endroit ce qui dévie la lumière. La technique Schlieren permet donc d'observer ce phénomène qui n'est normalement pas perceptible à l'œil nu.

Durant la pandémie, l'utilisation du masque a été remise en question car la population doutait de l'utilité de ce dernier, à stopper la transmission du virus. Grâce à la méthode Schlieren, on a pu prouver que le masque réduisait le nombre de particule respiratoire. En effet, lorsque l'on respire on envoie de l'air qui a une température différente de celle de l'air ambiant donc de densité différente mais ce n'est pas visible sans méthode de visualisation.



Figure 30 : Schlieren sans masque



Figure 29 : Schlieren avec masque

Les photos ci-dessus, ont été prises dans les conditions Schlieren. On remarque une très grande différence de densité entre les deux images. La personne ne portant pas de masque propage bien plus loin lorsqu'il tousse, contrairement à celui portant un masque. On démontre bien ici l'utilité de ce bout de tissu.

La méthode Schlieren permet donc de résoudre des problèmes simples, mais elle est aussi très utile dans de nombreux autres domaines, tels que l'aérodynamique, la combustion, la convection et plus encore.

6.1. Aérodynamique

L'aérodynamisme est une branche de la mécanique des fluides, qui porte sur l'étude de l'air sur un objet. Il existe 2 types d'aérodynamisme, celui compressible et celui incompressible. Pour savoir dans quel type de fluide on se trouve on utilise le nombre de Mach : c'est le rapport de la vitesse entre un objet à celle du son $Ma = v / c$. L'aérodynamisme est incompressible lorsque $Ma < 0.2$. La partie compressible possède de nombreuses catégories : subsonique, transsonique, supersonique et hypersonique. Lorsqu'on est dans l'aérodynamisme compressible, l'objet en mouvement crée des ondes de chocs. Un appareil volant à la vitesse du son traverse des molécules, mais le système allant trop vite, les molécules se compressent, on a alors une augmentation de la pression à l'avant. Lorsque l'avion dépasse la vitesse de Mach, il dépasse le "mur" invisible qui entraîne un changement de pression rapide. [18]

L'imagerie Schlieren permet de visualiser les "ondes de chocs", une étude simple pour montrer ce phénomène : on place un pilier devant un mur et on envoie de l'autre côté une onde de choc. L'onde va d'abord passer par le pilier, puis va être réfléchi par le mur.[19]

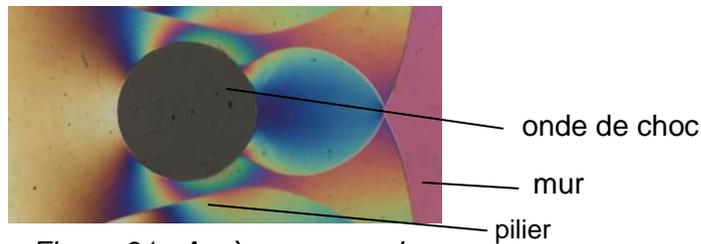


Figure 31 : Après passage du pilier

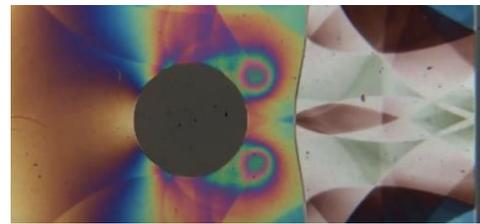


Figure 32 : Après réflexion du mur

La plus grande charge sur le pilier est la vague créée par le rebond du mur qui revient sur ce dernier. L'image après réflexion est d'une couleur blanche, la densité au sein de l'onde est donc plus forte. Cela illustre cet effort plus intense, qui peut créer des turbulences. [19]



Figure 33 : visualisation dépassement du mur de son méthode BOSCO

Un avion allant à une vitesse supersonique ($Mach > 1$), subit des ondes de choc, lorsque l'avion dépasse la vitesse du son, un bruit assourdissant est entendu (le bang). Ce bruit provient des ondes créées. [20] La Nasa s'intéresse au comportement des ondes par rapport à l'appareil. Pour se faire, l'imagerie Schlieren est nécessaire. A l'aide de la méthode BOSCO. La méthode consiste à faire voler un avion sous un corps céleste (dans notre cas : le soleil). Ils ont donc pu obtenir des images

comme on peut le voir ci-dessus. L'objectif des recherches est de réduire, voire supprimer le bruit lors du passage à la vitesse du son. Le résultat obtenu est de bien meilleure qualité qu'une simulation, le flux d'air est visualisé à haute définition. Cette méthode de visualisation permet également de mieux observer les panaches supersoniques, qui sont une masse d'air avec une température différente de l'air ambiant. Les résultats peuvent aussi aider à l'étude des traînées, c'est une force de frottement, sa visualisation servira à améliorer les prochains vaisseaux, en réduisant cette force. Pour déterminer l'angle, appelé cône de l'onde de choc, (en rouge sur l'image) on utilise la formule : $\sin \alpha = 1/Ma$. Un avion volant à Mach 1 a donc un angle de 90° . Grâce à la méthode BOSCO, la Nasa a pu obtenir des clichés très importants pour leur recherche, en effet on a pu voir les nombreuses informations contenues sur les photos. On tend donc vers un dépassement de la vitesse du son silencieux. [18]



Figure 34 : Cliché obtenu grâce à la méthode BOSCO

Avec toutes ses informations, l'ingénieur peut créer l'aile de l'avion au mieux. Le but de cette dernière est de provoquer l'effet de portance au maximum, pour compenser le poids de l'avion. En effet, même si les moteurs font avancer l'avion à une grande vitesse, il est toujours soumis à son propre poids. La solution est donc de concevoir de bonnes ailes.

Les images de Schlieren montrent l'écoulement autour de l'aile, on peut ensuite déterminer la portance, à l'aide de l'angle d'incidence. [18]

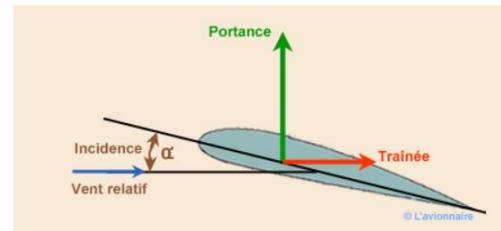


Figure 35 : Forces subies par l'aile

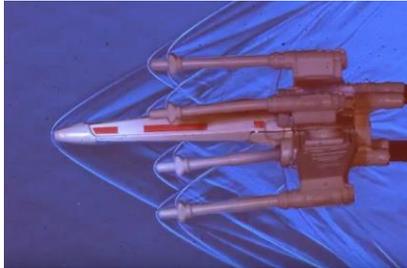


Figure 36 : Exemple avec un vaisseau "star wars"

La méthode Schlieren n'a pas de limite, nous ne sommes pas obligés de nous contenter de l'étude d'avion "standard", on peut très bien visualiser des avions tout droit sortie de "star wars" et voir s'ils peuvent voler sur Terre. Cette image nous montre que le système a de nombreux obstacles, qui lui font prendre le vent, ce n'est donc pas très optimal. [19]

En plus de montrer toutes ces caractéristiques de l'aérodynamique, Le Schlieren permet de visualiser les turbulences. L'air étant un fluide, il est soumis à des courants, ascendant (pour un flux d'air chaud) et descendant (pour un flux d'air froid). Ces mouvements de masse d'air vont alors engendrer une variation de l'altitude, qui paraît plus importante pour un passager que ce qu'elle est réellement. Les apparitions de ses "courants" peuvent dépendre du terrain (cause géographique), effectivement les obstacles peuvent faire varier le courant, tout comme une pierre aurait un impact sur une rivière. Les terrains montagneux auront donc plus de chance d'engendrer des turbulences, qu'un terrain plat. La cause peut aussi être météorologique : lorsqu'il y a du vent l'atmosphère est plus instable. Nous le verrons plus tard, mais cela est dû à la convection, l'air chaud passe au-dessus de l'air froid, à cause de son plus faible poids, ce qui produit un courant ascendant. Et enfin on retrouve aussi des turbulences dites de "sillage" qui augmentent la traînée ralentissant l'appareil. La création de turbulence n'est pas rare, il faut donc pouvoir prévoir l'effet qu'elle aura sur l'avion. L'imagerie Schlieren est un bon outil pour les observer. Il permet l'obtention d'images d'une qualité suffisante. [18]

En résumé, La méthode Schlieren permet la visualisation de nombreux phénomènes aérodynamiques, important pour la conception de chaque partie d'un avion. La visualisation des ondes de chocs a permis la réduction du bang du mur du son par exemple

6.2. Combustion

La méthode Schlieren permet de voir les choses non visibles. Elle est donc très utile dans le domaine de la combustion car, il est compliqué d'obtenir des images représentant la zone complète d'une flamme, à l'aide de la méthode Schlieren qui montre les gradients de température, on arrive à obtenir des images précises du phénomène.

Une fois ces images obtenues, on est en mesure de déterminer la vitesse de propagation. Pour ce faire, on découpe le contour du front de flamme obtenue sur les vidéos puis à l'aide de logiciel (Scilab, ...) on détermine la position en se plaçant au sommet du contour, il suffit ensuite de regarder l'évolution temporel pour obtenir la vitesse de propagation.

Pour mesurer cette vitesse, la méthode de bec Bunsen est aussi utilisé : pour ce faire, on mesure la surface de la flamme (ou l'angle de la flamme lors de l'écoulement).

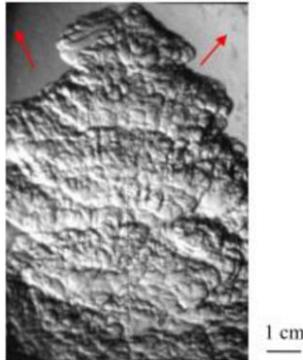


Figure 37 : Visualisation avec la méthode Schlieren

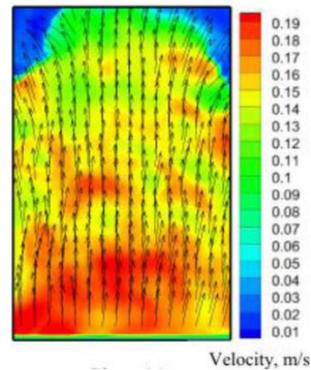


Figure 38 : Rendu Fluent à l'aide de la vidéo

Voici par exemple, à gauche une image tirée d'une combustion et à droite l'étude à l'aide d'un logiciel (comme fluent), de la combustion. On peut donc terminer la vitesse de propagation, la vitesse étant plus rapide lors du départ de la flamme et on remarque un ralentissement par la suite.

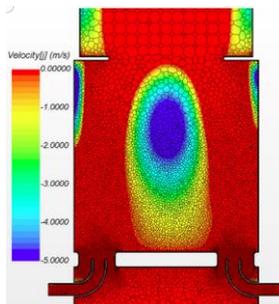


Figure 39 : Simulation d'une combustion

Les ingénieurs utilisent aujourd'hui des simulations sur des logiciels comme fluent, cela permet de tester différents modèles sans avoir à le mettre en place dans une expérience.

Les résultats obtenus sont précis mais peuvent varier de la vérité, on ne prend pas en compte tous les paramètres qui peuvent avoir lieu lors de l'expérience. [21]

La combustion fournit 85 % de l'énergie primaire dans le monde, si elle est mal exploitée, elle peut devenir dangereuse et très polluante. Prévoir le comportement de cette dernière est donc nécessaire afin de diminuer l'émission de gaz nocif. Grâce à la visualisation par la méthode Schlieren, on a accès à de nombreux paramètres physiques (température, pression, vitesse des flammes...). Avec les résultats obtenus, les scientifiques anticipent les dysfonctionnements possibles : l'instabilité de la flamme par exemple, qui peut endommager le système, tel que les fusées et moteurs d'avions.

Nous allons faire l'étude du mode de combustion PGC (Pressure Gain Combustion) qui permet une augmentation de la pression au sein de la chambre de combustion, sans consommer plus qu'une combustion classique. On peut y retrouver une détonation qui produit un changement de chaleur rapide. Lors du passage déflagration à détonation, la vitesse de propagation se multiplie par 1000. Schlieren est utilisé pour visualiser le comportement du champ d'écoulement et capter l'accélération de la flamme, qui est compliqué à obtenir puisque lors de la détonation la vitesse augmente drastiquement.

On fait passer à l'intérieur d'un tube en se mettant dans les conditions de Schlieren à l'extérieur pour observer la propagation. On fait 6 prises avec des paramètres différents.

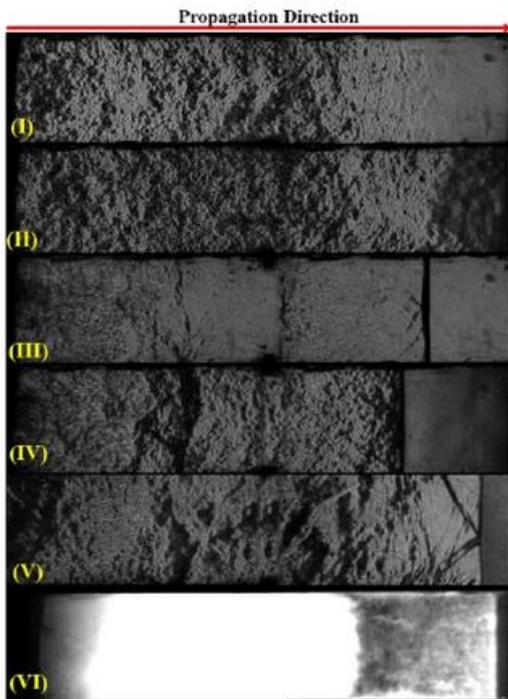


Figure 40 : Combustion avec et sans onde de choc

Cette image est tirée d'une expérience de la chercheuse *Camille Hespel*, elle souligne l'effet de du dioxygène dans un combustion, en effet lorsqu'on a une solution comportant 15% de O_2 on a une flamme plus fort qui se propage plus rapidement, la densité en tous points est très élevée. La simulation donne un résultat identique mais ne souligne pas les extrémités de la flamme qui ne sont pas symétriques, on peut noter des dispersions. [23]

Les image I et II sont des déflagrations lentes. La première déflagration commence par une vitesse lente, on observe une haute densité, qui diminue après accélération, jusqu'à devenir lisse. On peut expliquer ce lissage par la création d'onde de compression lors de l'accélération. La combustion 4, est une déflagration qui entraîne un choc, on part d'une flamme rapide créant des turbulences ce qui amène ce choc, on peut l'observer sur l'image (bar noire qui fait une césure entre la partie froissée et celle lisse).

La VI montre une détonation, ce qui explique le choc lumineux. On montre donc que l'accélération de la flamme permet de passer dans un état plus stable moins froissés. Les chocs dans le V se croisent créant un système quasi cellulaire (division de l'espace en petite zones le long d'un flux), ce qui entraîne une augmentation de la chaleur. [22]

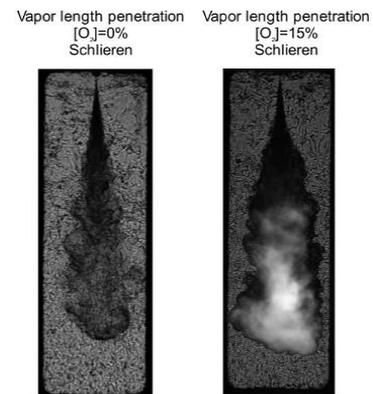


Figure 41 : Combustion avec et sans O_2

La visualisation des gradients de densité par la méthode Schlieren se révèle très pratique pour observer la pression, la température et la vitesse d'une combustion. Elle est utilisée en paire avec la simulation qui permet de valider un modèle.

6.3. Convection des gaz et transfert thermique

Cette technique peut avoir des applications très variées. La visualisation des écoulements convectifs que ce soit dans les liquides ou bien les gaz sont de bons exemples. Dans cette partie nous allons traiter plus particulièrement l'observation des masses d'air et des échanges de températures au sein des gaz. Cela permet par exemple d'observer et de mettre en évidence les systèmes de ventilations et de chauffages pour juger de leur efficacité. C'est une des utilisations les plus fréquentes, elle est très pratique pour tester ou même étudier leur comportement dans des situations bien différentes.



Figure 42 : Exemple d'imagerie Schlieren

A droite, un exemple d'imagerie Schlieren sur un objet du quotidien, une bouilloire. On peut voir le flux convectif de chaleur s'en échapper. A gauche un autre exemple d'application sur l'observation du fonctionnement d'un système de chauffage. [24]

Toutes les visualisations/expériences qui vont suivre permettent de mettre en évidence et de manière qualitative le nombre de Grashof :

$$Gr \equiv \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta_T \cdot \Delta T}{\mu^2}$$

avec

g – l'accélération de la pesanteur

ρ – la masse volumique

l – la longueur caractéristique

μ – la viscosité dynamique

ΔT – la différence de température

β_T – le coefficient de dilatation

Figure 43 : Définition du nombre de Grashof

La longueur caractéristique ayant une puissance de 3, on peut remarquer que si une des longueurs caractéristiques est diminuée de moitié, la différence de température augmente d'un facteur 8. [24], [25]

Ce nombre est très utilisé en mécanique des fluides. Il représente notamment le rapport entre les forces de gravité et les forces visqueuses. Il caractérise le transfert thermique et la convection d'un fluide, d'où son utilisation dans ce domaine. Ce nombre met en évidence que l'on peut réaliser des expériences à petite échelle sur des maquettes 1/6, voire plus petites. Si l'on substitue de l'eau à l'air, la masse volumique compense largement la longueur caractéristique. Une expérience à grande échelle

reste plus précise mais dans la majorité des cas la maquette reste suffisante pour se donner une vision d'ensemble. [24]

Une application très concrète de l'imagerie Schlieren est de déterminer si les détecteurs de fumée installés au-dessus des ventilateurs de plafond restent toujours efficaces pour la détection des incendies. Le cadre de cette expérience est les établissements de soins pour personnes âgées de Taïwan.

En effet, dans ces établissements les ventilateurs de plafond sont très utiles. Ils permettent la régulation de la température en été, la disparition des mauvaises odeurs (*) et la réduction de la consommation d'énergie de la climatisation. Sauf que les pièces sont généralement petites et les détecteurs de fumée ne peuvent être installés qu'au-dessus des ventilateurs. Cette expérience teste leur efficacité dans cette configuration.

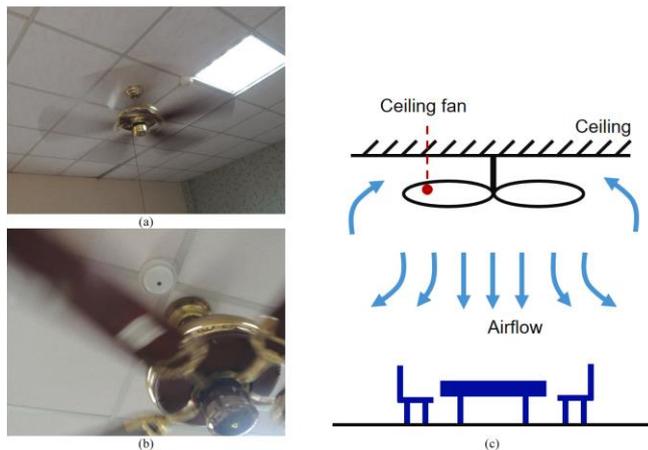


Figure 44 : Ventilateur de plafond

(*) Ce schéma montre le flux d'air propulsé par ce type de ventilateur. Le flux d'air est propulsé vers le bas. L'air froid remonte sur les côtés du ventilateur, et refroidit ainsi le plafond.

Pour se faire, une étude numérique est complexe dans le cadre d'une combustion. Elle est donc réalisée grâce à une maquette à échelle 1/15. L'imagerie Schlieren est obtenue grâce à la méthode des miroirs concaves. Lorsque le ventilateur ne fonctionne pas, le détecteur capte la différence de température de façon normale. Cependant lorsqu'il est en fonctionnement, celui-ci disperse le flux de chaleur montant et réduit considérablement la température du plafond au-dessus (Voir schéma ci-dessus). Allant jusqu'à une différence de température de 6°C. *“La température du plafond a diminué, [...], ce qui a influencé négativement le fonctionnement du détecteur, indiquant que le temps d'activation du détecteur d'incendie serait retardé après un incendie”* [26]

Le ventilateur souffle l'air aux alentours. Cette expérience a montré que même si la source de l'incendie n'était pas directement en dessous du ventilateur cela retarde considérablement la détection. *“Plus la source d'incendie est éloignée du ventilateur de plafond, plus il sera long ou moins probable que le détecteur d'incendie au-dessus du ventilateur de plafond détecte le flux d'air à haute température.”* [26]

L'expérience Schlieren est illustrée ci-dessous. La (a) représente le flux de chaleur lorsque le ventilateur n'est pas allumé. Dans ce cas, le détecteur fonctionne de manière normale et le flux monte verticalement. Ensuite en (b) les conditions sont les mêmes, à l'exception du ventilateur qui lui est allumé. Le flux de chaleur est bien perturbé par le ventilateur. Dans ce cas, la température du plafond monte bien moins vite. Le flux de chaleur de la flamme ne peut notamment pas monter jusqu'en haut. Dans l'expérience (c) et (d), la bougie est placée de plus en plus à gauche du ventilateur. Le flux de chaleur va se retrouver propulsé à gauche et le détecteur est plus lent à capter la différence de température.

Cette technique d'expérimentation reste donc très efficace pour réaliser des modèles assez précis de la réalité en matière de convection. Très utile notamment comme illustré plus tôt afin de démontrer l'efficacité ou non des détecteurs de fumée ou des systèmes de ventilation et de chauffage. [26]

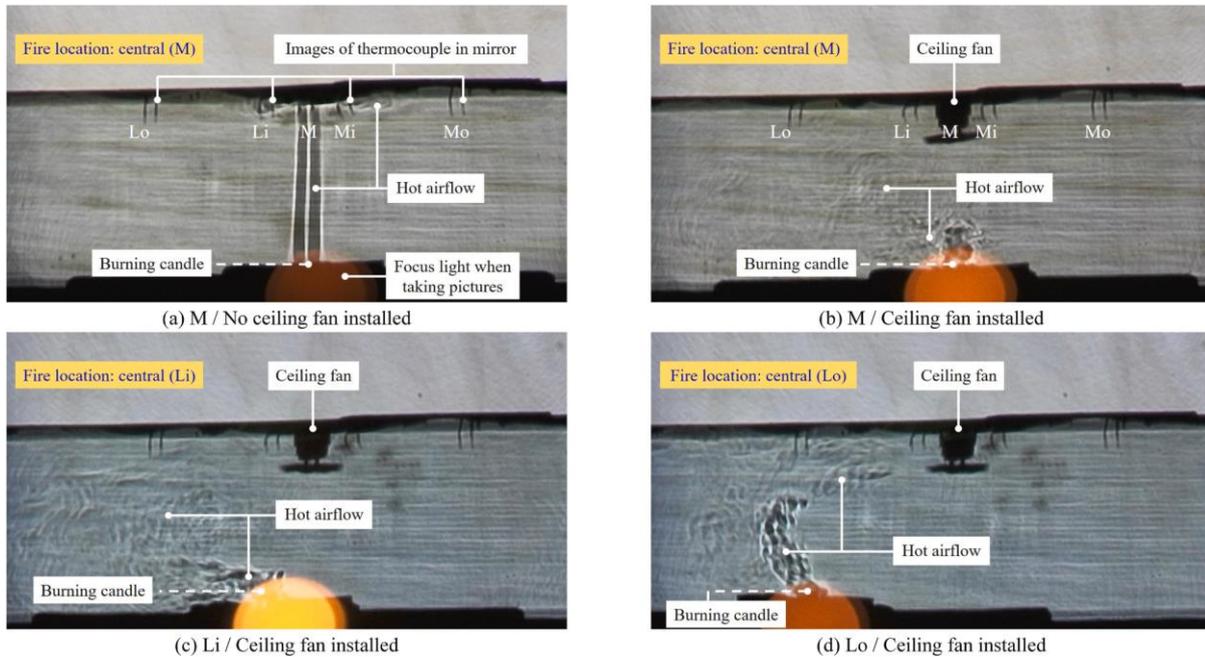


Figure 45 : Expérience Schlieren avec un ventilateur de plafond

L'imagerie Schlieren est une technique indissociable de l'expérimentation que ce soit en pratique ou informatiquement (computational fluid dynamics (CFD)). En effet, cela dépend de l'expérience. Pour un modèle à échelle humaine ou assez simple à modéliser, l'expérimentation physique sera à privilégier. Car même si la puissance des ordinateurs ne fait qu'augmenter au fil des années, les modélisations de convection et notamment les combustions restent compliquées à simuler. Une expérimentation Schlieren peut être plus précise. En couplant les deux on peut se rendre compte de la limite des 2 modèles. Dans certains cas l'étude est uniquement simulée par ordinateur car trop complexe à expérimenter. C'est le cas de l'expérience suivante.

Le but de cette expérience est de visualiser et de comprendre le modèle d'écoulement autour d'une particule de carbone (~ 3,5 mm de diamètre) alors que le processus d'oxydation de l'eau supercritique à lieux. Pour ce faire on a réalisé 2 expériences, une expérimentation optique classique du phénomène ainsi qu'une simulation informatique.

On étudie ici le gradient de densité de l'écoulement ainsi que le transfert de masse entre le solide et l'eau. *“La dynamique de l'écoulement affecte les gradients de concentration dans un réacteur et influence ainsi l'uniformité de la vitesse de réaction”* [27]

La comparaison entre les deux expériences permet au mieux de rendre compte des phénomènes observés. Dans ce cas, le phénomène était bien trop complexe pour être juste expérimenté réellement. La simulation a été réalisée ici grâce au logiciel FLUENT.

Sur l'image (exp a) on peut observer la particule de charbon dans de l'eau supercritique sans oxygène. Dans l'image (exp b) c'est la même expérience avec de l'eau oxygénée tandis que dans l'image (exp c) c'est une particule de graphite qui est placée dans de l'eau oxygénée. L'expérimentation réelle de cette expérience montre bien qu'il n'y a que dans de l'eau oxygénée que la réaction est plus rapide mais celle-ci ne permet pas de visualiser précisément les gradients de densité de la réaction autour de la particule.

Image exp :

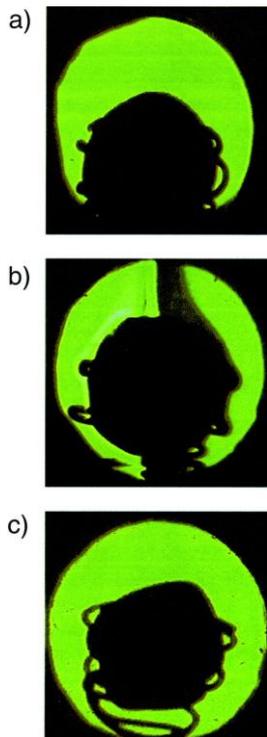


Figure 46 : Images exp

Image sim :

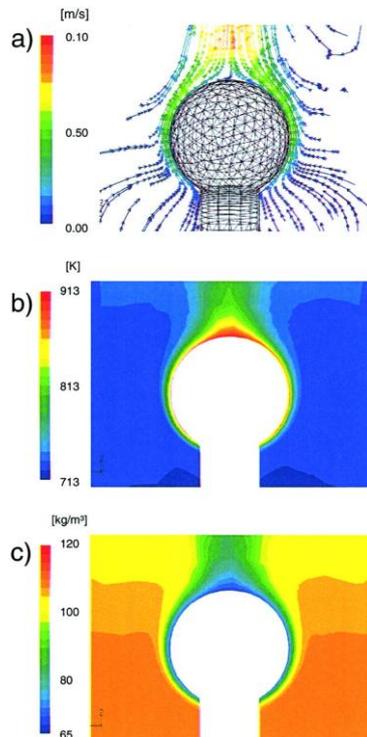


Figure 47 : Images sim

La simulation numérique reprend donc l'expérience de l'image (exp b) afin d'observer plus en détail le phénomène. Sur l'image (sim a) on peut observer les gradients de vitesses des particules virtuelles. Dans l'image (sim b) on observe les gradients de température et dans l'image (sim c) il s'agit des gradients de densités. La particule est considérée comme adiabatique, on observe uniquement des gradients à l'extérieur en convection dans le fluide

L'image (sim a) permet notamment de se rendre compte du phénomène de flottabilité grâce aux gradients du dessous ainsi que la chaleur de la réaction augmente la température du fluide autour de la particule ce qui accélère la réaction.

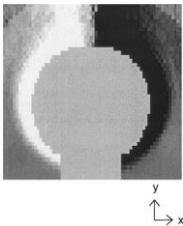


Figure 49 : Image Schlieren

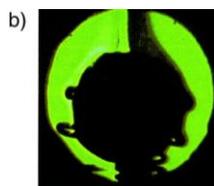


Figure 48 : Simulation de l'image Schlieren

L'image de droite est une simulation de l'image Schlieren. On constate que les deux images sont très proches et convergent vers la même conclusion "il est certain que l'écoulement ascendant causé par la chaleur de la réaction de surface existait réellement, et ce modèle d'écoulement a pu être prédit par des simulations CFD." [27]

L'étude des comportements convectifs reste un des sujets majeurs de l'imagerie Schlieren. Elle permet la visualisation de phénomènes invisibles afin de les comprendre et de les maîtriser. Les scientifiques et les ingénieurs peuvent ainsi selon le type d'observation réaliser des simulations informatiques (CFD) et/ou des expériences à échelle réduite. La comparaison des deux permet en général de rendre compte de tous les aspects du phénomène et d'avoir des résultats plus précis. Bien que dans certains cas la simulation reste encore compliquée. [27]

6.4. Écoulements hydrodynamiques

Tout phénomène et étude de mécanique des fluides peuvent être améliorés et confirmés grâce à une observation expérimentale ou une simulation. La visualisation Schlieren est, comme vu plus haut, la méthode la moins chère, la plus rapide et suffisamment précise pour être utilisée dans de très nombreuses expériences et ce de manière très convaincante.

Dans les liquides, l'imagerie Schlieren se fait directement par l'observation des variations de densité due à une différence de température. Ceux-ci sont visibles grâce à la déviation de la lumière due à la présence de gradients d'indice de réfraction dans l'écoulement fluide.

On peut observer des phénomènes extrêmement utiles pour les ingénieurs et notamment sur la conception et l'amélioration de système hydraulique.

Plus l'écart de température est grand entre deux sources, plus le gradient sera important et plus l'image Schlieren de celui-ci sera visible. Les expériences de transfert thermique au sein d'un liquide sont donc les expériences les plus fréquentes réalisées dans l'eau.

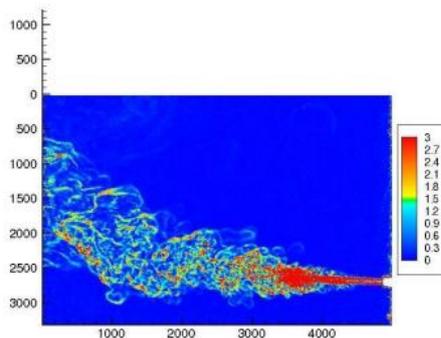


Figure 50 : Méthode CBOS pour un écoulement hydrodynamiques

Une première étude utilise la méthode CBOS d'imagerie Schlieren, fréquemment utilisée pour des écoulements aérodynamiques. Ici cette étude démontre et présente son utilisation pour des écoulements hydrodynamiques. L'expérience est simple, il s'agit d'un jet d'eau à 44°C introduit à 26cm/s dans un volume d'eau à 24°C. Le résultat de l'expérience est donné ci-contre. Le transfert thermique de l'eau y est très bien visible. On remarque bien la transition laminaire-turbulaire du jet ainsi que les structures turbulentes de celui-ci. Cette expérience montre que l'utilisation de la méthode d'imagerie Schlieren peut aussi être utilisée pour l'étude des écoulements hydrodynamiques de l'eau. [25]

Cette deuxième étude nous présente un système de caloduc intégré à des plaques de refroidissement. Le but ici est d'étudier le comportement du transfert de chaleur à l'intérieur de ce dispositif. Le principe de ce genre d'expériences est de permettre aux ingénieurs de mieux comprendre les phénomènes internes du système pour améliorer ses performances. Dans ce cas, les performances du caloduc sont améliorées quand il parvient à transmettre efficacement la chaleur dans le but de refroidir le système dans lequel il est installé. Dans cette expérience, les chercheurs ont installé une source de chaleur simulant un système en surchauffe. Ils ont étudié les températures d'un caloduc nu, d'un tuyau de cuivre et d'un caloduc amélioré avec des plaques de refroidissement. Le caloduc nu sans plaques de refroidissement est observé par imagerie Schlieren ci-contre. Le comportement de celui-ci ne peut pas être associé à un tube de cuivre. Le caloduc ayant un profil de température discret alors que celui du tube de cuivre est continu. Lorsque les plaques de refroidissement sont installées, le caloduc est modifié à un profil de température très proche de celui d'un tube de cuivre. L'imagerie Schlieren ci-dessus valide également le résultat. On observe un flux de chaleur se propageant de la gauche vers la droite au fur et à mesure que le caloduc conduit la chaleur. La chaleur à l'intérieur du caloduc est donc perdue dans l'eau par transfert thermique au fur et à mesure qu'il la transporte. Sans plaque de refroidissement, le caloduc conduit la chaleur avec beaucoup de pertes, ce qui rend impossible son utilisation. L'expérience montre bien l'amélioration nette du caloduc par l'installation des plaques de refroidissement. D'ailleurs le refroidissement est d'autant plus efficace que les plaques sont proches de la source de chaleur.

L'expérience montre que le caloduc à refroidissement a le même profil de température que celui du cuivre nu. Les résultats du caloduc nu montrent que celui-ci conduit très mal la chaleur. [28]

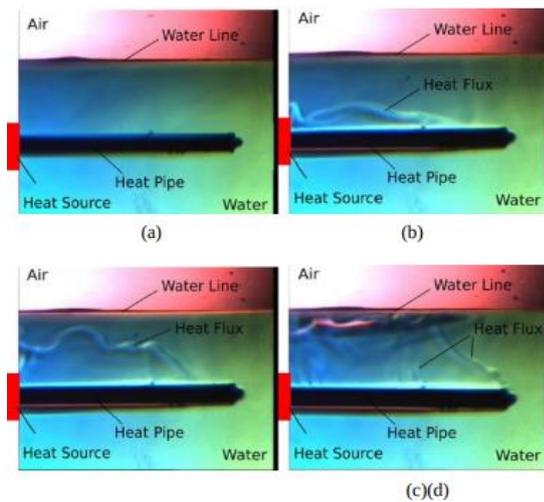


Figure 51 : Imagerie Schlieren d'un écoulement d'un flux d'eau

L'étude d'écoulement d'un flux d'eau peut être dans certains cas compliqué à visualiser. Les différences de température sont parfois trop faibles pour observer des variations optiques. Dans l'expérience suivante les chercheurs ont réussi à mettre en évidence l'écoulement en introduisant une solution de sucre dans un fin jet d'eau. 0.1% de sucre suffit à le mettre en évidence par imagerie Schlieren. (soit 1g de sucre pour 1L d'eau). L'expérience consiste en un poids de forme quelconque (ici un triangle et un cercle) qui est suspendu au bout d'un tuyau. La solution s'écoule de celui-ci, directement dans le bocal et s'échappe par le bas.

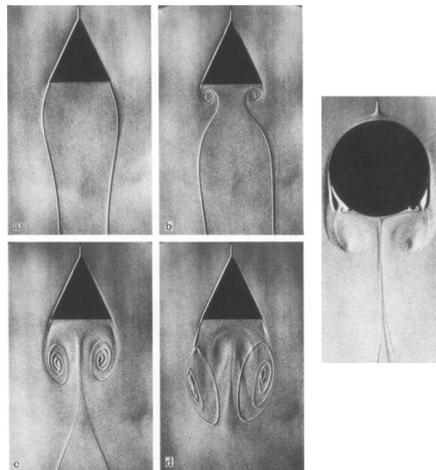


Figure 52 : Mise en évidence des perturbations du fluide

Sur cette image ci-contre on constate bien que le tracé du sucre est non seulement très bien visible mais aussi rend très bien compte des perturbations du fluide. On distingue bien les traces du vortex dues à l'écoulement du fluide autour de la forme triangulaire. En effet la forme triangulaire contenant des coins trop nets au niveau de sa base facilite la formation de vortex de perturbations. La forme circulaire a quant à elle une extrémité facilitant l'adhésion de la couche limite au contraire de la forme précédente. Elle est donc moins sujette à la formation de vortex. [29]

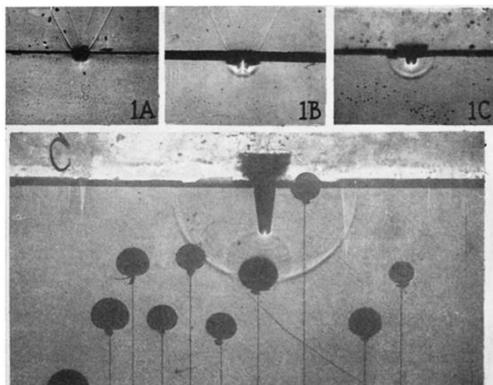


Figure 53 : Formation et propagation d'une onde de choc dans l'eau

L'imagerie Schlieren a aussi des applications dans le domaine militaire. En effet, cette étude réalisée par US Naval Ordnance Laboratory, analyse l'onde de choc due à l'impact de projectiles lancés à grande vitesse dans l'eau. Sur cette image on aperçoit la formation et la propagation de cette onde de choc dans l'eau. Le laboratoire étudie l'impact de cette onde sur des obstacles sous-marins comme ici des mines sous-marines. L'imagerie Schlieren est donc utile dans les domaines d'étude des ondes de choc que ce soit dans un liquide ou un gaz. L'étude de ce phénomène permet aux ingénieurs de mieux comprendre leur impact sur le produit en lui-même mais aussi sur son environnement. [30]

L'imagerie Schlieren bien que très utilisée pour des études de mouvements d'air et d'aérodynamique peut tout aussi être très satisfaisante pour l'observation des phénomènes hydrodynamiques. Les phénomènes d'hydrodynamique et de mécanique des fluides restent compliqués à simuler c'est pourquoi l'imagerie est une méthode très utilisée. Elle est utile aux ingénieurs dans de très nombreux domaines et leur permet d'observer des phénomènes invisibles pour un moindre coût.

7. EXPERIENCES

7.1. Montage Schlieren

Nous avons donc réalisé plusieurs expériences sur notre banc de projet. Sur ce banc nous avons le miroir concave (1) d'un diamètre de 20cm, une table à expérience (2) (sur lequel prend place tout notre matériel d'expérience), une caméra d'Iphone 11 (3) à 30 images par seconde ainsi que la source lumineuse (4) (une fibre optique) et tous les supports qui vont avec. Pour mettre en œuvre l'imagerie Schlieren afin de visualiser les gradients de températures, nous plaçons notre objet de test comme par exemple des bougies ou un pain de glace sur la table à expérience. Ensuite avec la caméra mise en place sur son support. Nous zoomons sur la source lumineuse dans le miroir de façon à ce qu'elle prenne tout le fond du miroir. Cela permet d'avoir un contraste satisfaisant dans le but de visualiser les gradients de température. La caméra est soigneusement placée sur le point focal du miroir afin d'avoir une image nette du phénomène. Malgré cela un phénomène de réflexion peut être visible mais cela n'affecte pas nos expériences.

Pour notre montage, nous n'avons pas utilisé de couteau de Foucault. En effet, l'iris de notre caméra joue le rôle du couteau de Foucault et on utilise la périphérie de l'objectif pour former l'image.

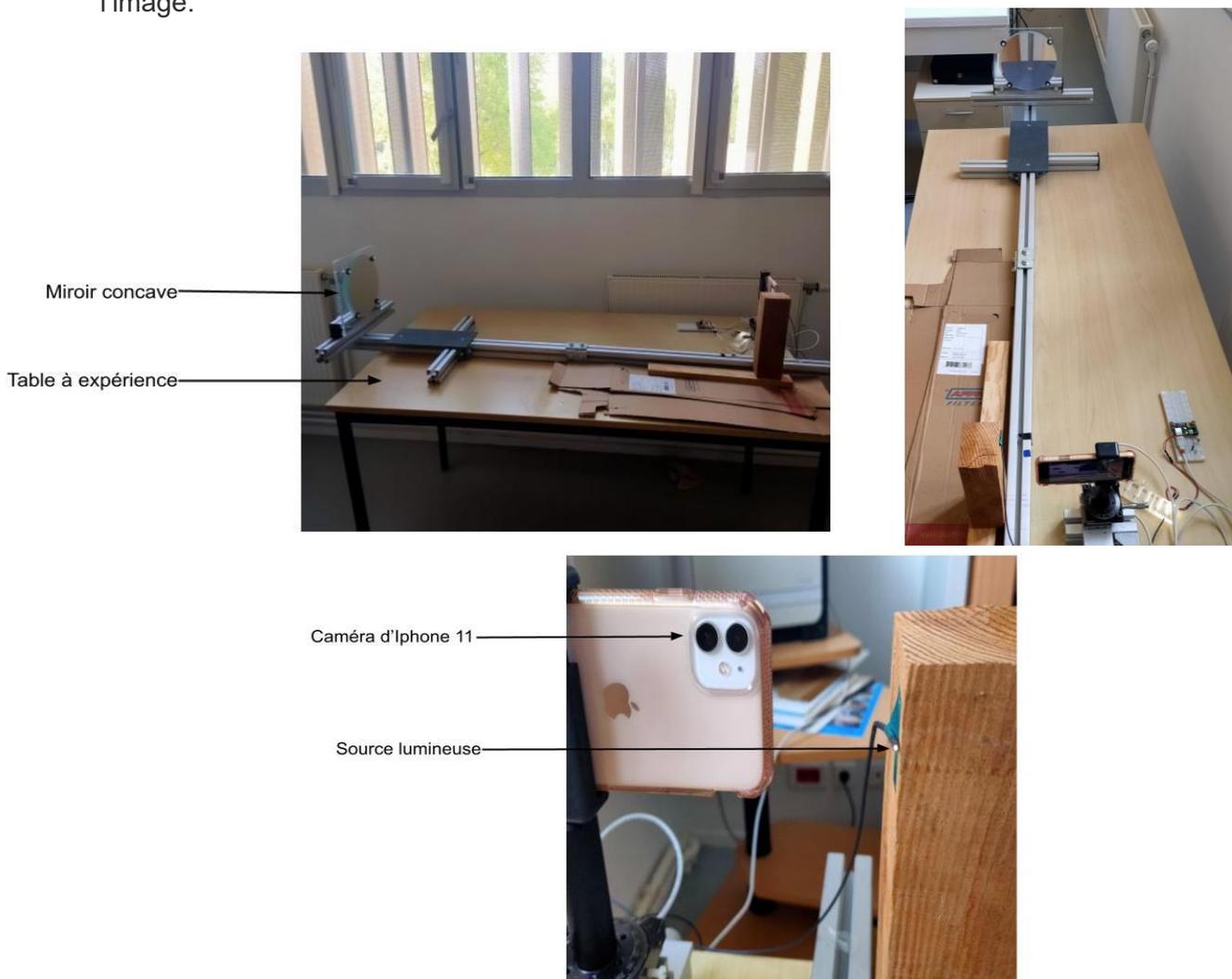


Figure 54 : Notre montage Schlieren

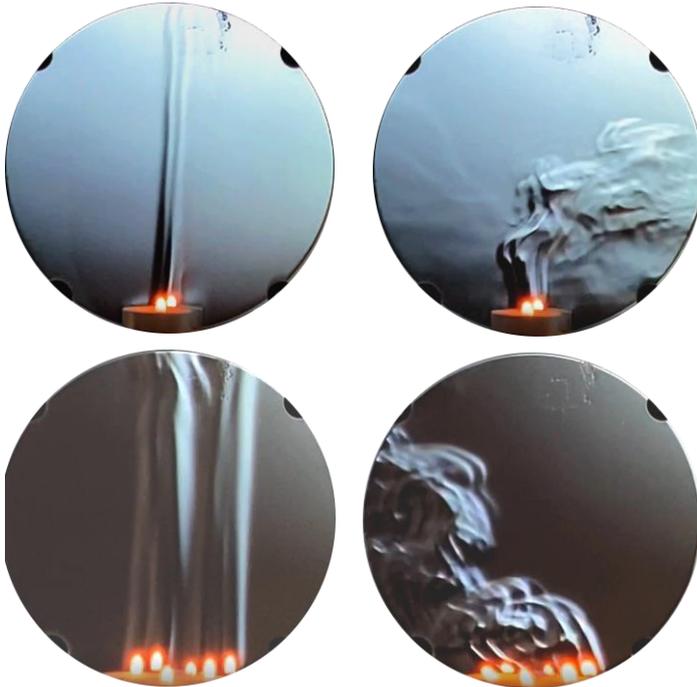


Figure 55 : Flux de chaleur de bougies

La première expérience réalisée est celle de l'observation du flux de chaleur de bougies. On a observé deux configurations : en configuration stationnaire et perturbation, avec une et trois bougies simultanément. On remarque distinctement le flux laminaire et sans perturbation du mode stationnaire, toutes les lignes de courants sont parallèles entre elles, le flux est laminaire. De plus, l'ajout de plusieurs bougies ne semble pas affecter le flux de chaleur. A l'inverse dans la configuration de perturbations les lignes de courants sont chaotiques et le flux est imprédictible. De nombreuses turbulences sont observées.

Un autre exemple de flux de chaleur turbulent est celui du briquet ci-dessous à gauche. La flamme du briquet n'étant pas stable à cause de l'apport en gaz non parfaitement constant et de la main manipulant celui-ci qui n'est pas stable dans le temps. A l'instar d'une bougie pour laquelle le filament est immobile et stable dans le temps. Bien qu'un début de flux laminaire puisse être observé au niveau de la flamme. Mais celui-ci devient perturbé à mesure que le flux monte. Ci-dessous à droite on observe le flux de chaleur d'une lampe électrique chauffante. Dans ce cas là non plus, le flux de chaleur n'est pas stationnaire et accuse de nombreuses turbulences. Lorsque la source de chaleur n'est pas ponctuelle comme la flamme d'une bougie, la stationnarité est difficile à obtenir en pratique.



Figure 56 : Flux de chaleur d'un briquet

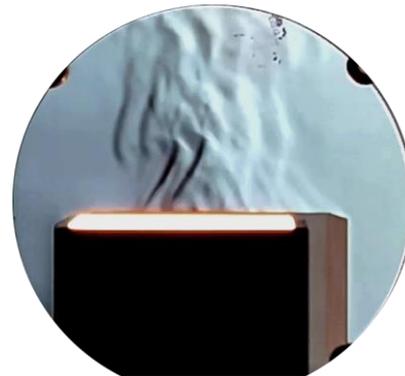


Figure 57 : Flux de chaleur d'une lampe électrique

Jusqu'à maintenant nous avons étudié des flux sans vitesse initiale et pour lesquels le cas stationnaire est plus facile à atteindre. Pour le cas de flux avec une vitesse initiale, la stationnarité est plus difficile à obtenir.

Cette expérience est celle de l'observation du flux de chaleur d'un chalumeau. On remarque que du fait de la vitesse initiale du flux, celui-ci est très perturbé, il accuse des rotations et est chaotique. On peut même calculer la vitesse de déplacement du flux grâce au

nombre d'images par secondes et au diamètre du miroir en observant le déplacement du flux image par image. On obtient un déplacement de 0.2m en 0.3 secondes ce qui donne une vitesse de 0.67 m/s.



Figure 58 : Flux de chaleur d'un chalumeau

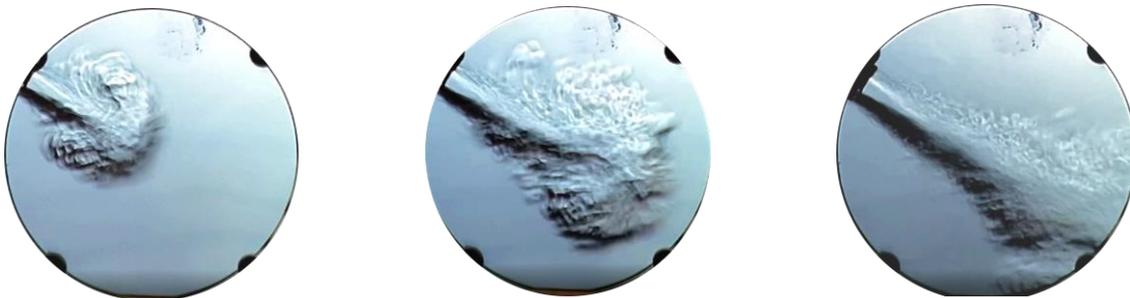


Figure 59 : Flux d'un sèche-cheveux

Pour cette série d'images, il s'agit du flux d'un sèche-cheveux. On observe bien l'évolution du flux lorsqu'il traverse le miroir. Au début, il crée deux rotations à mesure que le flux pousse l'air ambiant. Ensuite celui-ci devient plus chaotique à mesure qu'il se propage plus loin dans l'air. Au final, au début le flux est laminaire à la sortie de la buse et celui-ci devient turbulent après. Le flux se déplace de 0.2m en 0.2 secondes. On a alors une vitesse de 1 m/s pour le flux du sèche-cheveux.

Avec le montage précédent, nous avons aussi essayé de voir un phénomène d'explosion. Pour ce faire, notre encadrant nous a suggéré de réaliser des bulles de savon remplies de gaz et de les faire exploser devant le montage. Ce protocole d'expérience a été le plus compliqué à mettre en place, car nous nous sommes heurtés à plusieurs problèmes, il fallait :

- Créer des bulles de gaz suffisamment importantes sans les éclater
- Mettre des électrodes à l'intérieur d'une bulle sans l'éclater
- Avoir un mélange gaz / air dans les bulles.

Nous avons donc utilisé un chalumeau de cuisine relié à un tube flexible dont l'extrémité était trempée dans le liquide vaisselle ; ainsi en actionnant le chalumeau une bulle se formait bien à l'embout.

Nous avons aussi modifié un allumeur à arc électrique en retirant sa sécurité et en prolongeant ses électrodes pour pouvoir les mettre à l'intérieur de la bulle.

Nous obtenons les résultats suivants :



Figure 60 : Avec le chalumeau en dessous



Figure 62 : Avec la bulle flottante

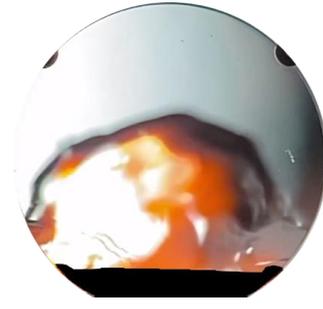


Figure 61 : Avec la bulle posée sur une plaque



Sur ces images on peut voir une forme convective de champignons pour les perturbations créées par l'inflammation de la bulle, qui se dissipent progressivement. Cette forme si caractéristique des explosions est très souvent présente lorsqu'une masse d'air très chaude se situe dans une masse d'air plus froide. Cela va créer un pyrocumulonimbus dans une échelle large mais ici uniquement un phénomène convectif à cause de la petite échelle. En effet la masse d'air chaude a tendance à monter et le courant ascendant siphonne l'air ambiant comme dans une cheminée à cause d'une instabilité de Rayleigh-Taylor. L'explosion en elle-même crée une onde de choc visible sur les photos ci-dessus.

Nous n'avons cependant pas réussi à faire détoner les bulles de l'intérieur malgré les électrodes directement placées dans la bulle. La faute au mélange de butane/air pas assez équilibré pour permettre une combustion

Quoi qu'il en soit, les images obtenues avec le montage Schlieren sont de bonne qualité et permettent bien de voir la dissipation de chaleur.

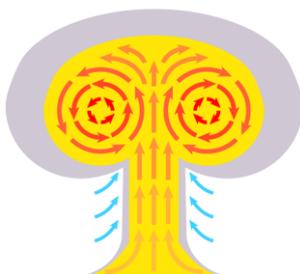


Schéma du flux convectif de chaleur lors d'une explosion, ainsi que le champignon formé en conséquence. [31]

Figure 63 : Flux convectif de chaleur lors d'une explosion



Figure 64 : Perturbations descendante d'un pain de glace

Nous avons aussi observé des objets froids avec le montage. Contrairement aux expériences précédentes, les perturbations émanant de l'objet descendent. Sur l'image ci-contre, on peut voir nos résultats avec un pain de glace. Le phénomène est moins visible, il aurait fallu maintenir le pain de glace à une température plus basse mais cela était impossible ne disposant pas de congélateur à l'INSA.

Nous avons donc ramené le pain de glace depuis chez nous dans une glacière pour essayer de le garder le plus froid possible.

7.2. Méthode BOS

Les parties précédentes nous ont permis de comprendre le fonctionnement de la méthode BOS. Elle consiste à filmer un corps devant un fond pixelisé, on observe alors le déplacement des petits points au fil du temps. On obtient ce type d'image lorsque l'on filme.

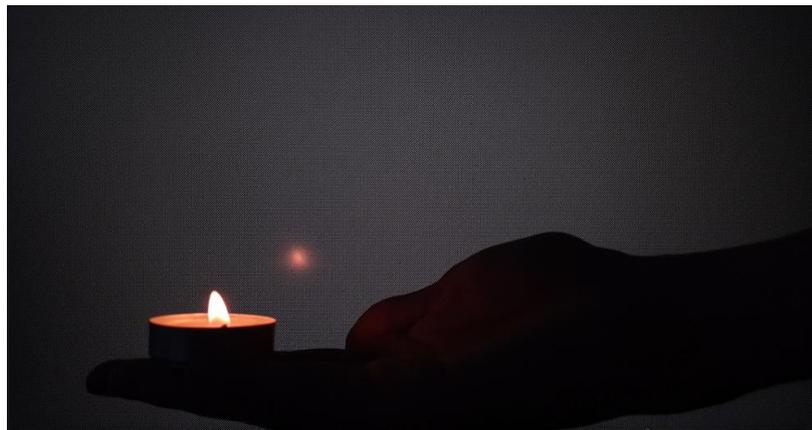


Figure 65 : Méthode BOS avec une bougie

Nous avons noté que ce dispositif est très sensible aux vibrations qui induisent de léger déplacement et donc réduisent la sensibilité. Le résultat est donc moins précis. De plus, il nous a fallu beaucoup d'essais afin de régler le dispositif, et trouver une bonne sensibilité. On parle ici de la caméra, (zoom, luminosité, mise au point, ...) mais aussi de la distance entre la caméra et l'écoulement, et de l'écoulement au fond (Z_b et Z_c). Nous avons remarqué que la distance avec le fond doit être maximale mais qu'il faut tout de même que la caméra distingue chaque pixel. Deuxièmement, comme vu théoriquement, la distance entre l'écoulement et la caméra doit être la plus petite possible. Dans ces conditions, nous avons obtenu les meilleurs résultats. Enfin le choix du fond est important car plus les pixels sont petits plus la caméra doit être proche pour voir ces derniers. Néanmoins des petits pixels permettent de voir de petits déplacements, il faut donc trouver le compromis entre taille des pixels et distance de la caméra.



Figure 66 : Etude de la sensibilité aux gradients en fonction de la taille des pixels

Les pixels plus grands sont à gauche, à la distance à laquelle nous nous sommes placés, sont plus précis que les plus petits à droite, moins sensible aux gradients.

Cependant, ce n'est pas le résultat attendu. La densité n'est pas mise en avant. On va donc devoir utiliser le langage de programmation python pour faire un traitement vidéo. Pour faire ce traitement, on a à notre disposition la bibliothèque openCV qui permet, grâce à plusieurs fonctionnalités, de créer une interface graphique simple. En utilisant par exemple la méthode de *Mean-shift* pour suivre l'objet. OpenCV est utilisé pour faire des deepfake par exemple, il permet de reconnaître un visage et de le changer.

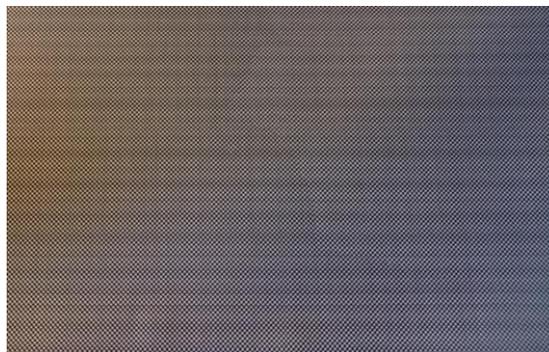


Figure 67 : Fond en damier noir et blanc utilisé

Maintenant que l'on en sait plus sur cette bibliothèque, on va se pencher sur le programme. Dans un premier temps on va donc appeler openCV, puis mettre en place nos variables dont la vidéo à traiter.

Ensuite on va prendre la première image comme image de référence. En superposant la vidéo à celle-ci. On va ensuite calculer la différence entre les points, OpenCV permettant de cibler chaque pixel. Pour avoir un meilleur résultat, on enlève le pixel à faible et haute valeurs. On multiplie le reste des pixels par 4 pour égaliser.

Pour finir on enregistre le résultat dans le fichier et on appuie sur *Echap* pour mettre fin au programme.

```
import cv2
cap= cv2.VideoCapture('BOS2.mp4')
ret, img = cap.read()
background = img

count = 1
meanframe = cv2.absdiff(img, background)

frameh, framew, ch = img.shape
writer = cv2.VideoWriter_fourcc('M', 'J', 'P', 'G')
out = cv2.VideoWriter('out.avi', writer, 30, (framew,frameh))

while(ret) :

    frame = cv2.absdiff(img, background)

    ret,frame = cv2.threshold(frame,20,255,cv2.THRESH_TOZERO)
    ret,frame = cv2.threshold(frame, 60, 255, cv2.THRESH_TOZERO_INV)
    frame = frame*4

    cv2.imshow('frame', frame)
    out.write(frame)
    ret, img = cap.read()

    k = cv2.waitKey(33)
    if k==27:
        break

cap.release()
out.release()
cv2.destroyAllWindows()
```

Figure 68 : Programme de la chaîne Youtube FinFET

Dans un premier temps, nous avons projeté le fond en damier sur un écran d'ordinateur. Et ensuite sur une feuille à 3.

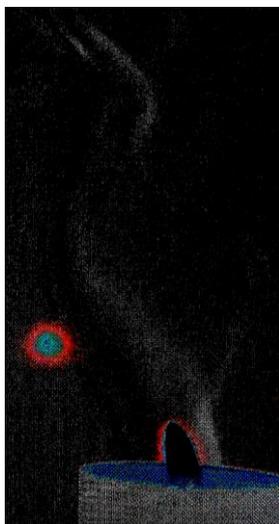


Figure 70 : Fond ordinateur

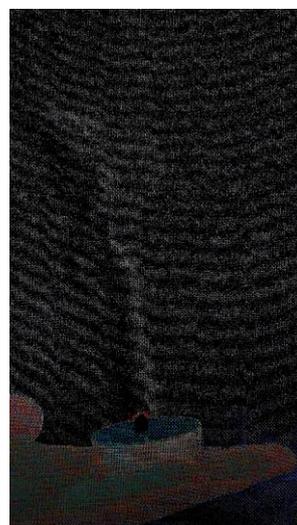


Figure 69 : Fond feuille A3

Sur le rendu feuille avec fond ordinateur. On visualise bien le phénomène mais on observe le reflet de la flamme sur l'écran, les gradients de densité observés sont lisses : on manque d'information. L'image avec la feuille A3, est un peu moins explicite mais on arrive à déterminer les gradients de densité. On a un rendu plus froissé qui se rapproche de la visualisation réelle.

Pour obtenir des résultats plus visibles, il faut que la différence de température entre la flamme et l'air ambiant soit élevée.



Figure 71 : Expérience BOS avec un briquet et un aérosol

L'image ci-dessus est plus nette, on observe mieux le phénomène. On utilise un briquet et un aérosol. Expérience assez dangereuse, il faut éviter le retour de flamme. On se met donc dans le cas où la vitesse du mélange à la sortie de la buse est supérieure à la vitesse d'inflammation, il n'y a donc pas de création de flamme mais la température augmente.

Le résultat montre une densité froissée, la température est bien plus forte que l'air de la salle (20°C), ce qui explique le gradient de densité élevé.

7.3. Simulation numérique de convection naturelle

Le but de cette simulation numérique sous le logiciel ANSYS fluent est d'étudier la convection d'un bloc d'aluminium refroidi à 273 Kelvin soit 0°C dans l'air à 300 Kelvin soit 27°C. Puisque la température du bloc est plus faible nous nous attendons à une convection vers le bas.

Maintenant voyons comment réaliser cette étude. La première étape est de créer notre géométrie (surface ou volume de l'objet). Ici nous avons fait l'étude en 2D mais il est possible de la réaliser en 3D.

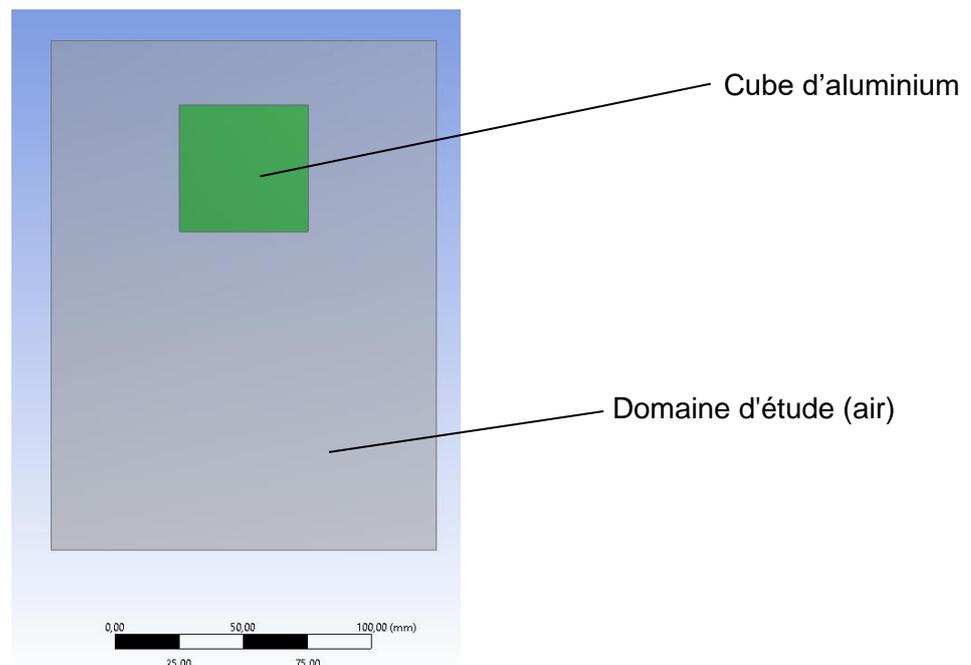


Figure 72 : Création de la géométrie

La seconde étape est de constituer un maillage de la géométrie à étudier. Le maillage permet de discrétiser spatialement notre géométrie. Ainsi on pourra calculer les valeurs souhaitées (température, vitesse, pression, ...) à chaque nœud (point d'intersection entre 2 mailles). Il existe différentes formes pour les mailles mais les plus utilisées sont les triangulaires, carrés/quadrilatères/hexagonales). A noter qu'un mélange peut aussi être utilisé.

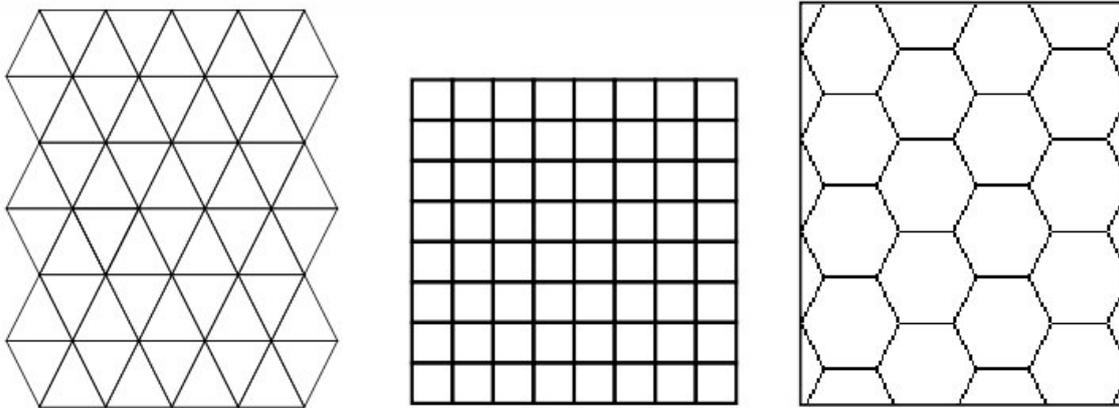


Figure 73 : Constitution du maillage de la géométrie étudiée

Dans une maille on considère que la valeur mesurée est constante, donc plus il y a de mailles (plus le maillage est fin) plus on est précis, mais plus les calculs seront longs. Comme à chaque fois, il est question de compromis. La différence entre les mailles est que pour la triangulaire la moyenne des mesures pour la maille se fait par la moyenne des valeurs sur les trois nœuds autour le quadrilatère 4 et l'hexagonale 6.

Nous obtenons donc le maillage suivant, avec des mailles plus fines sur des parties importantes.

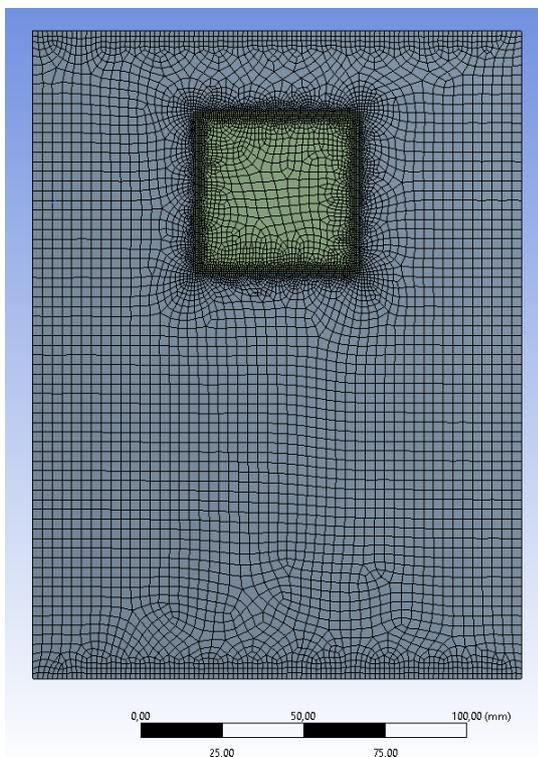


Figure 74 : Maillage fin

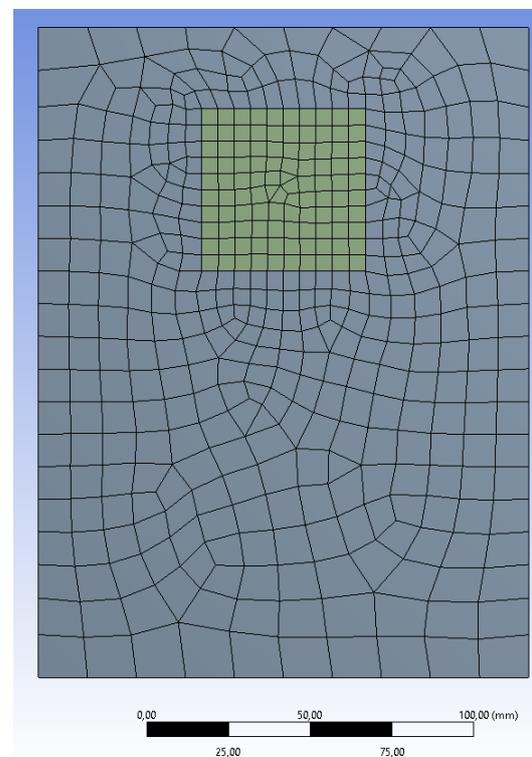


Figure 75 : Maillage grossier

Le maillage étant fait nous pouvons passer à la simulation. Ici il est question de définir chaque partie de la géométrie, ici le domaine fluide et le domaine solide.

Il ne reste plus qu'à initialiser les calculs. Donner les températures initiales (0°C pour le cube et 27°C pour l'air).

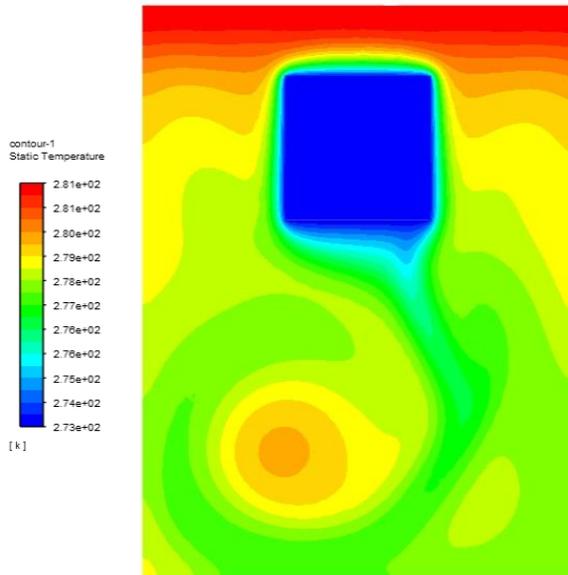


Figure 77 : Maillage fin

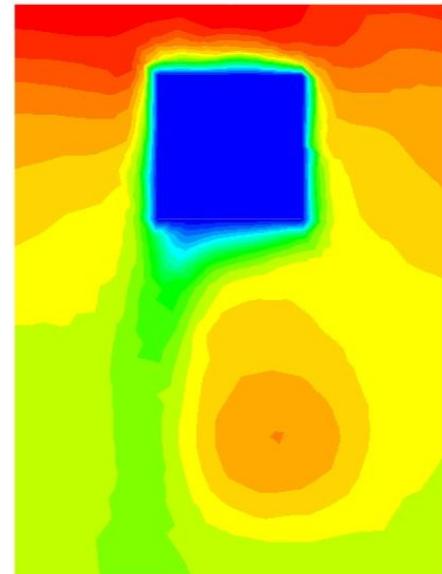


Figure 76 : Maillage grossier

Ici nous voyons la simulation à un instant t. Nous pouvons voir que le maillage fin est mieux défini. De plus, le temps de calcul a été de 23 minutes pour le maillage fin contre 12 pour le grossier. Faisons une dernière comparaison avec les résultats.

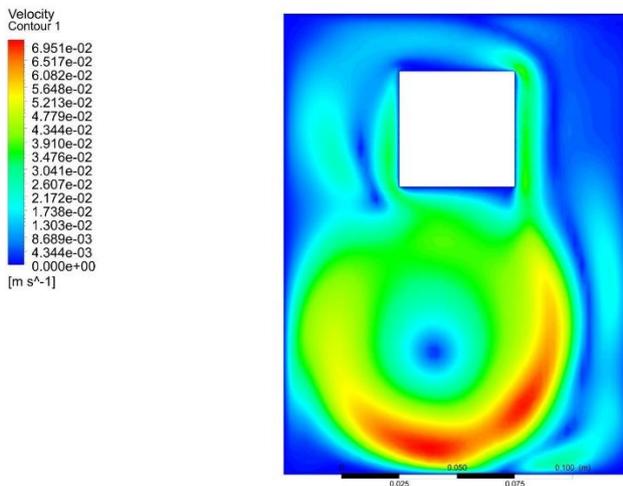


Figure 78 : Maillage fin

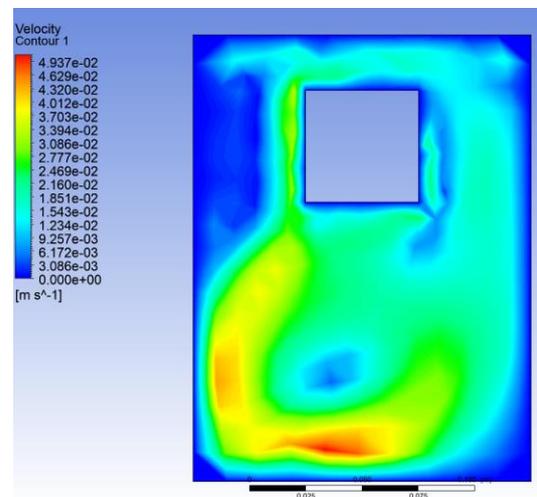
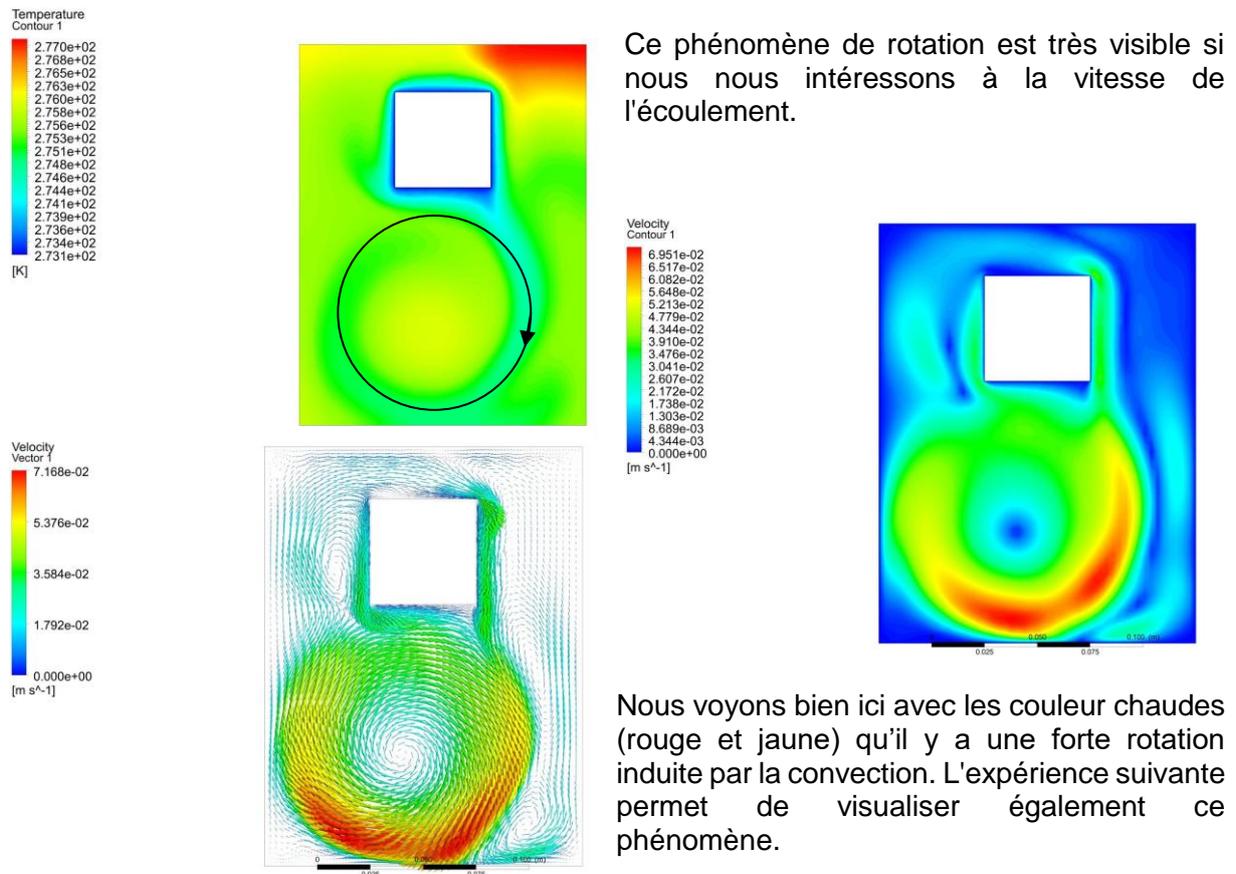


Figure 79 : Maillage grossier

Encore une fois ici on voit que le champ des vitesses est beaucoup mieux défini. A gauche on voit bien la continuité alors qu'à droite il y a des formes carrées pas très bien définies.

Après avoir vu l'importance du choix du maillage et avoir fait la simulation, analysons les résultats. Nous pouvons nous intéresser aux gradients de température dans le système. Au début nous sommes avec un écart de 27 Kelvin entre le cube et l'air et après l'écart a nettement diminué jusqu'à 4 Kelvin à la fin de la simulation. Nous remarquons aussi qu'en haut la température reste plus élevée qu'en bas ce qui est normal, puisque les l'air plus chaud a tendance à monter. Mais à cause des parois du système, nous remarquons des flux d'air dans ce dernier. Aussi, au cours de la simulation nous avons pu voir un phénomène de rotation en

dessous du cube que nous remarquons même ici avec un courant d'air plus froid. Ces différences de température induisent des écoulements d'air.



Ce phénomène de rotation est très visible si nous nous intéressons à la vitesse de l'écoulement.

Nous voyons bien ici avec les couleurs chaudes (rouge et jaune) qu'il y a une forte rotation induite par la convection. L'expérience suivante permet de visualiser également ce phénomène.

Figure 80 : Résultats de la simulation

Pour valider l'expérience, on se place dans les mêmes conditions devant un fond damier (Méthode BOS). Le rendu est très faible, la différence de température entre le cube et l'air ambiant étant faible, il est compliqué d'obtenir un bon résultat. On peut quand même observer l'écoulement en rotation, vu sur la simulation.

La méthode BOS ne permet pas de valider la simulation, même si l'écoulement semble du même type.

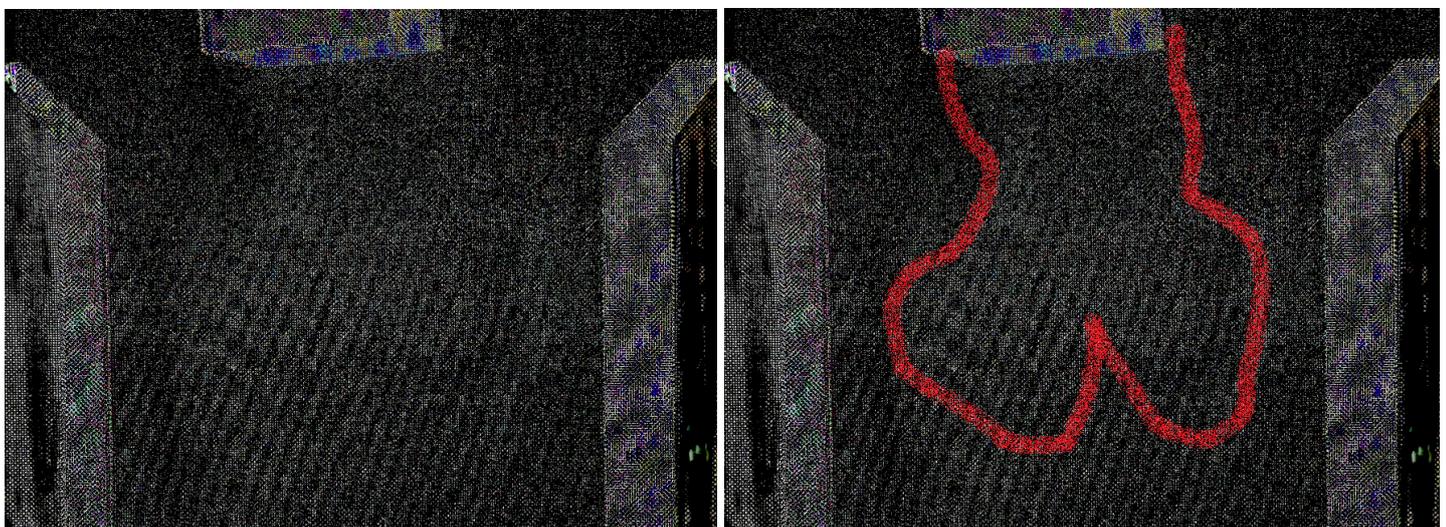


Figure 81 : Résultat de la méthode BOS

La méthode Schlieren est plus sensible que celle de BOS, on se met donc dans les mêmes conditions que l'expérience précédente :



Figure 82 : Montage avec cube froid et plexiglas aux extrémités

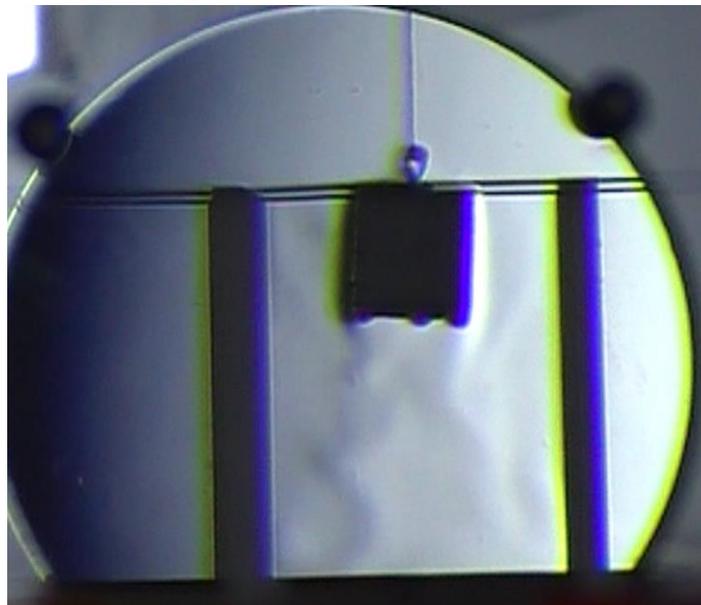


Figure 83 : Résultat avec la méthode Schlieren

8. CONCLUSION

Avant ce projet, la méthode Schlieren nous était tous étrangère. Ce projet a donc été l'opportunité de nous familiariser avec cette méthode. Grâce à notre organisation que nous avons mise en place dès le début du projet, nous sommes non seulement parvenus à comprendre la méthode de visualisation des gradients de densité Schlieren, mais aussi la méthode alternative qu'est le Background Oriented Schlieren.

Au cours du semestre, nous avons pensé puis réalisé des expériences en rapport avec ces méthodes. Grâce aux expériences menées, nous avons pu mettre en application les connaissances acquises durant la phase de recherche bibliographique.

Nous sommes donc satisfaits d'avoir pu développer les parties théorique et pratique à la fois pour la méthode classique et également pour la BOS.

Ce projet a aussi été l'occasion de découvrir le logiciel ANSYS Fluent. Nous avons ainsi pu faire la simulation numérique de la convection naturelle d'un bloc d'aluminium refroidi à 0°C.

La partie expériences est celle qui nous a posé le plus de difficultés. En effet, il nous a fallu nous familiariser avec le montage optique et comprendre comment bien faire les réglages (placement de la caméra par rapport au miroir, orientation de la fibre optique...) afin d'obtenir un contraste satisfaisant pour bien visualiser les mouvements de convection. De plus, la mise en place de l'expérience bulle de savon explosive a été compliquée. La mise en pratique de la BOS nous a également pris beaucoup de temps pour trouver les bons réglages et avoir une sensibilité suffisante.

Les méthodes optiques que nous avons été amenés à étudier et les expériences que nous avons réalisées se sont révélées très intéressantes et enrichissantes. Il a été impressionnant de découvrir qu'avec finalement peu de matériel nous sommes capables de voir des phénomènes invisibles, et d'autant plus de mettre en pratique et de tester expérimentalement les phénomènes étudiés en cours et lors des recherches.

Grâce à ce projet, nous avons donc acquis de l'expérience dans cette méthodologie expérimentale qu'est la méthode Schlieren. Nous avons pu utiliser nos connaissances acquises en STPI ainsi que nos connaissances personnelles pour mener à bien ce projet. Nous avons appris à mettre en place un montage optique Schlieren et proposer des expériences pertinentes pour illustrer notre projet. Ce travail de groupe a également été l'occasion de gagner en autonomie. Pour conclure, ce projet a été pour nous très positif et instructif et nous a permis de développer des compétences indispensables en tant que futurs ingénieurs.

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Foucault knife-edge test », *Wikipedia*. 15 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Foucault_knife-edge_test&oldid=1033659268
- [2] P. Krehl et S. Engemann, « August Toepler — The first who visualized shock waves », *Shock Waves*, vol. 5, p. 1-18, juin 1995, doi: 10.1007/BF02425031.
- [3] « August Toepler », *Wikipedia*. 3 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=August_Toepler&oldid=1031816266
- [4] « Histoire | Saint-Louis. Au temps des pionniers de la construction européenne ». <https://www.lalsace.fr/haut-rhin/2019/06/23/au-temps-des-pionniers-de-la-construction-europeenne>
- [5] « Figure 2.1: Picture made by the Schlieren method, shows a bullet... », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Picture-made-by-the-Schlieren-method-shows-a-bullet-travelling-through-the-air-above_fig3_339593928
- [6] « Hubert Schardin », *Wikipedia*. 30 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hubert_Schardin&oldid=1062850209
- [7] « A Modified Schlieren Apparatus for Large Areas of Field ». <https://opg.optica.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-39-11-907>
- [8] A. Bauknecht, C. Merz, et M. Raffel, « Airborne Application of the Background Oriented Schlieren Technique to a Helicopter in Forward Flight », *undefined*, 2014, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Airborne-Application-of-the-Background-Oriented-to-Bauknecht-Merz/04f4075716ea0ac75279359960ea2eff3a4f4344>
- [9] « Synthetic schlieren », *Wikipedia*. 11 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Synthetic_schlieren&oldid=1033141931
- [10] L. GmbH, « Imagerie BOS ». <https://www.smart-piv.com/fr/techniques/schlieren-bos/>
- [11] V. Todoroff, « Mesure d'un champ de masse volumique par Background Oriented Schlieren 3d. Etude d'un dispositif expérimental et des méthodes de traitement pour la résolution du problème inverse. », p. 217.
- [12] L. Canale et G. Zissis, « La Strioscopie \ldots Révélation des dessous des LEDs, une lumière "froide" dans un corps chaud ! », in *Voir l'Invisible T.2*, Armir, Éd. Editions du Puits Fleuris, 2019, p. 100-101. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03164483>
- [13] « Photographie de Schlieren ». http://stringfixer.com/fr/Schlieren_interferometer
- [14] « Strioscopie ». http://dansetrad.fr/Orgue_de_barbarie/Orgue/Th/Striographie/index.html#lentille
- [15] « Strioscopie », *Wikipédia*. 29 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Strioscopie&oldid=188422198>
- [16] Veritasium, *Voir l'invisible : L'imagerie Schlieren au RALENTI*, (15 juin 2017). [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=4tgOyU34D44>
- [17] S. Kook, M. Le, S. Padala, et E. Hawkes, « Z-type Schlieren Setup and its Application to High-Speed Imaging of Gasoline Sprays », *SAE Tech. Pap.*, août 2011, doi: 10.4271/2011-01-1981.
- [18] « L'avionnaire site dédié à l'aviation ». <https://www.lavionnaire.fr/>
- [19] UNSW Canberra, *Schlieren Imaging Systems*, (8 mai 2020). [En ligne Vidéo]. Disponible

sur: <https://www.youtube.com/watch?v=JonG86KrxCM>

- [20] NASA Armstrong Flight Research Center, *NASA Supersonic Flights Validate Flightworthiness for Future Schlieren Imaging*, (14 décembre 2017). [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=0eimg8IMsGA>
- [21] « Figure 3: Non reactive CFD simulation of velocity distribution inside... », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Non-reactive-CFD-simulation-of-velocity-distribution-inside-combustion-chamber_fig2_323207698 (consulté le 8 juin 2022).
- [22] H. Chin, R. Hytovick, K. Ahmed, et A. Poludnenko, « Investigation of Hydrocarbon Fast-Flame Regimes for Flame Acceleration to Detonation », août 2020. doi: 10.2514/6.2020-3865.
- [23] « Camille Hespel | Université d'Orléans ». <https://www.univ-orleans.fr/fr/prisme/camille-hespel> (consulté le 8 juin 2022).
- [24] G. S. Settles, *Schlieren and shadowgraph techniques*, Springer., vol. 1. 2006.
- [25] « Nombre de Grashof », *Wikipédia*. 5 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Nombre_de_Grashof&oldid=191637489
- [26] S. Hung, K. Chong, S. Liu, C. Su, et L. Chen, « Effect analysis of the airflow field generated by ceiling fans on fire detectors using model experiments and Schlieren photography », *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, p. 101087, août 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101087.
- [27] M. Sugiyama, S. Tagawa, H. Ohmura, et S. Koda, « Supercritical water oxidation of a carbon particle by Schlieren photography », *AIChE J.*, vol. 50, n° 9, p. 2082-2089, 2004, doi: 10.1002/aic.10246.
- [28] C.-C. Ting et C.-C. Chen, « Experimental Analysis of Heat Transfer Behavior inside Heat Pipe Integrated with Cooling Plates », *Engineering*, vol. 03, n° 09, p. 959-964, 2011, doi: 10.4236/eng.2011.39118.
- [29] F. Peters, T. Kuralt, et J. Schniderjan, « Visualization of water flow by sugar schlieren », *Exp. Fluids*, vol. 12, n° 4, p. 351-352, mars 1992, doi: 10.1007/BF00187313.
- [30] « 321.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: <https://rupress.org/jem/article-pdf/85/3/321/1183608/321.pdf>
- [31] « Nuage en champignon », *Wikipédia*. 4 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuage_en_champignon&oldid=180537932