
Rapport de projet 1A : groupe 38

Photographie Schlieren et onde de choc

Hovanes BOKSYAN
Aymeric FREREJEAN
Nada KOUDDANE
Léo LAFFAY
Alexandre OCKIER
Yvonne SAUTRIOT
Nino VIVIAND

Tuteur du projet : David RIASSETTO

Membres des Jurys :

Daniel BELLET
Benoit CLEYET-MAREL

Nicolas RUTY
Mathias VOISIN-FRADIN

Phelma - juin 2022

Table des matières

Table des figures	4
Liste des tableaux	4
Introduction	5
1 EFFET SCHLIEREN	6
1.1 Principe du dispositif	6
1.1.1 Dispositif avec miroir sphérique	7
1.1.2 Dispositif avec lentilles convergentes	7
1.2 Protocole et organisation	7
1.2.1 Cahier des charges	7
1.2.2 Mise en place des montages optiques	8
1.2.3 Améliorations des montages	8
1.3 Observations et conclusion	8
1.3.1 Description des résultats	8
1.3.2 Interprétation	8
1.3.3 Conclusion partielle	8
2 DISPOSITIF À ONDE DE CHOC	9
2.1 Théorie du tube à choc	9
2.2 Protocole et organisation	10
2.2.1 Cahier des charges	10
2.2.2 Mise en place du dispositif	10
2.3 Observations et conclusion	11
2.3.1 Observations	11
2.3.2 Conclusion partielle	14

3	PHOTOGRAPHIE DE L'ONDE DE CHOC	15
3.1	Protocole et organisation	15
3.1.1	Cahier des charges	15
3.1.2	Mise en place du système final	15
3.2	Observations	15
3.2.1	Description des résultats	15
3.2.2	Interprétation	15
	Références	16
	Résumé	17
	Abstract	17

Table des figures

1.1	<i>Diagramme de GANTT prévu pour le montage optique</i>	7
2.1	<i>Principe et évolution de la pression dans le tube à choc</i>	9
2.2	<i>Diagramme de GANTT prévu pour le dispositif à onde de choc</i>	10
2.3	<i>Schéma du test réalisé à l'aide de la pompe hydraulique : 2,5 bars</i>	11
2.4	<i>Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 2,5 bars</i>	13
2.5	<i>Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 5 bars</i>	14

Liste des tableaux

1.1	<i>Membres et tâches attribuées (dispositif à imagerie Schlieren)</i>	7
2.1	<i>Membres et tâches attribuées (tube à onde de choc)</i>	10
2.2	<i>Résultats obtenus en fonction du matériau utilisé pour la membrane</i>	12

Introduction

La visualisation des ondes de choc générées par les avions permet d'étudier leur mouvement et contribue aux recherches dans le domaine de l'aéronautique et au développement de nouveaux engins. L'observation du mouvement de l'air autour des appareils supersoniques peut être réalisée à l'aide d'un dispositif simple et efficace : le dispositif d'imagerie Schlieren. Celui-ci s'appuie sur les principes de base de transferts thermiques et d'optique géométrique, principes utiles à tout étudiant en filière ingénierie physique. Ce projet constitue donc un moyen de mise en œuvre de connaissances théoriques pour la réalisation d'un livrable concret.

La problématique majeure du projet est la combinaison de deux systèmes distincts qui permettrait de visualiser et de photographier une onde de choc. Il faut en effet réaliser cette dernière ainsi que le dispositif de photographie par effet Schlieren.

L'objectif de ce rapport est donc de présenter non seulement les différents moyens déployés afin de mener à bien ce projet, que ce soit sur le niveau technique ou organisationnel, mais aussi les résultats obtenus lors de ce travail.

Ainsi, ce document est réparti en trois parties : la première porte sur les différents aspects du dispositif d'imagerie Schlieren. La deuxième est, quant à elle, consacrée à l'étude et la réalisation du dispositif à onde de choc. La troisième présente la combinaison des deux parties énoncées précédemment, et donc l'enjeu global du projet. Enfin, une conclusion en guise de récapitulatif sera donnée à la fin du rapport.

PARTIE 1

EFFET SCHLIEREN

1.1 Principe du dispositif

L'air est un fluide transparent, il possède un indice de réfraction qui suit une évolution linéaire par rapport à la densité :

$$n = 1 + k \rho \quad (1.1)$$

où n est l'indice de réfraction du fluide, ρ sa densité et k une constante appelée constante de Gladstone-Dale [1]. Si n_i et n_r sont respectivement les indices de réfraction des rayons incident et réfléchi, θ_i l'angle d'incidence et θ_r l'angle de réfraction, on peut écrire la loi de Snell-Descartes :

$$n_i \times \sin(\theta_i) = n_r \times \sin(\theta_r) \quad (1.2)$$

En faisant varier de manière non uniforme la température ou la pression de l'air, on fait apparaître des gradients de densité, ce qui fait que l'indice de réfraction ne varie pas de la même façon partout dans le fluide. Par conséquent, les rayons lumineux sont déviés, ce qui permet d'observer l'effet Schlieren.

1.1.1 Dispositif avec miroir sphérique

1.1.2 Dispositif avec lentilles convergentes

1.2 Protocole et organisation

1.2.1 Cahier des charges

Une fois l'objectif de cette partie défini, la mise en place d'un plan d'organisation s'est avérée judicieuse pour avancer dans le projet. Pour ce faire, le diagramme de GANTT de la figure 1.1 a été établi :

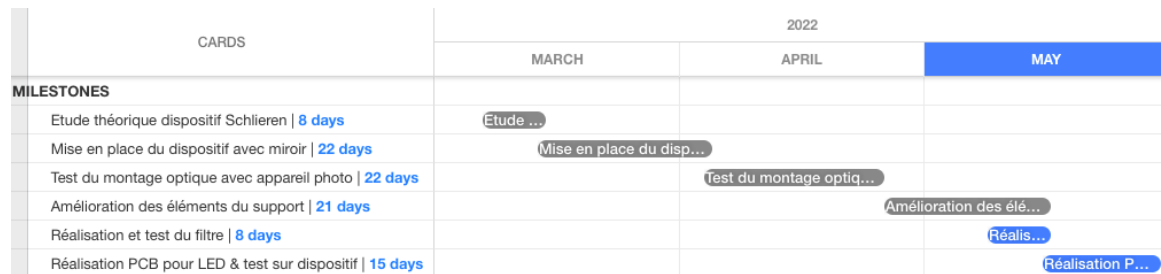


FIGURE 1.1 – Diagramme de GANTT prévu pour le montage optique

Par ailleurs, parmi les sept membres du groupe, quatre ont été chargés de mettre en place le système optique, un rôle a été attribué à chacun des membres :

Responsable effet Schlieren	Responsable communication	Responsable technique	Responsable planning
Yvonne SAUTRIOT	Léo LAFFAY	Alexandre OCKIER	Nada KOUDDANE

TABLE 1.1 – Membres et tâches attribuées (dispositif à imagerie Schlieren)

1.2.2 Mise en place des montages optiques

1.2.3 Améliorations des montages

1.3 Observations et conclusion

1.3.1 Description des résultats

1.3.2 Interprétation

1.3.3 Conclusion partielle

PARTIE 2

DISPOSITIF À ONDE DE CHOC

2.1 Théorie du tube à choc

Une onde de choc est une onde créée par une transition brutale [2], donc une discontinuité, de grandeurs physiques comme la pression, la masse volumique ou encore la vitesse. Pour pouvoir obtenir une onde de choc, on utilise un tube à choc. Le tube à choc sert à reproduire et concentrer des ondes de choc en simulant des explosions. Ici, le tube à choc permet la création d'ondes grâce à la discontinuité en pression à l'intérieur de ce dernier.

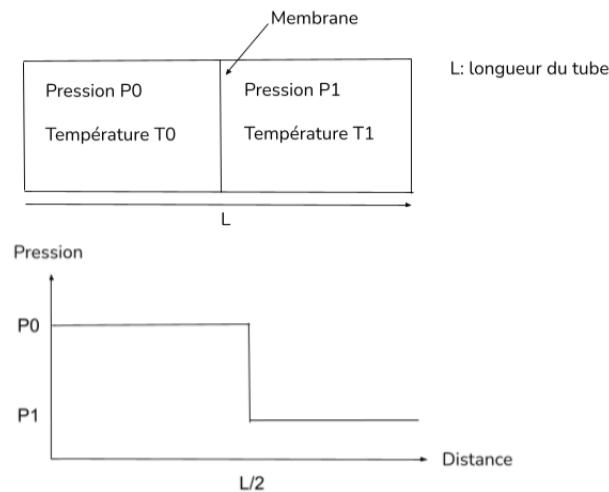


FIGURE 2.1 – *Principe et évolution de la pression dans le tube à choc*

Le tube à choc est composé de deux tubes en PVC séparés par une membrane. Le but étant avec une pompe à vélo de pomper la partie gauche, donc la pression sera élevée. A partir d'une pression P , la membrane se brisera et la discontinuité de pression dans le tube créera l'onde de choc et l'explosion à la sortie du tube.

2.2 Protocole et organisation

2.2.1 Cahier des charges

Après avoir déterminé les objectifs relatifs au dispositif à onde de choc, le diagramme de GANTT suivant a été établi :

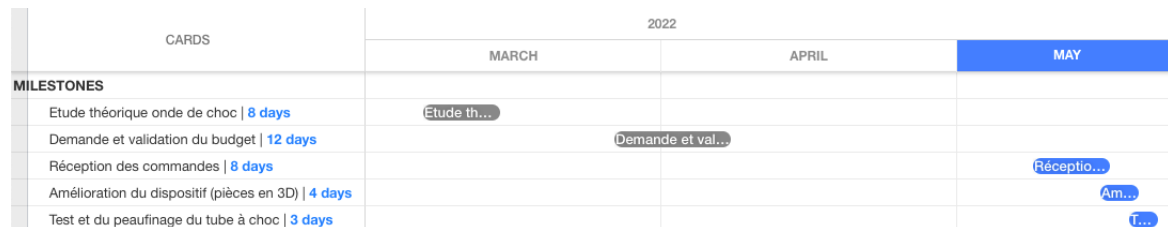


FIGURE 2.2 – Diagramme de GANTT prévu pour le dispositif à onde de choc

Le travail sur le tube à onde de choc a été confié aux trois membres restants du groupe. Le tableau 2.1 résume les postes attribués à chacun des membres :

Responsable onde de choc	Responsable budget	Responsable technique
Hovanes BOKSYAN	Nino VIVIAND	Aymeric FREREJEAN

TABLE 2.1 – Membres et tâches attribuées (tube à onde de choc)

2.2.2 Mise en place du dispositif

1^{er} essai : onde de choc hydraulique

Dans un premier temps, un test a été effectué grâce à une pompe hydraulique après avoir rempli une cuve d'eau à entrée réglable. Avec l'entrée bloquée par une vanne, un flux d'eau a été envoyé puis bloqué par la vanne et à un instant t , la vanne a été débloquée et a permis l'observation d'une onde de choc hydraulique (cf. figure 2.3).

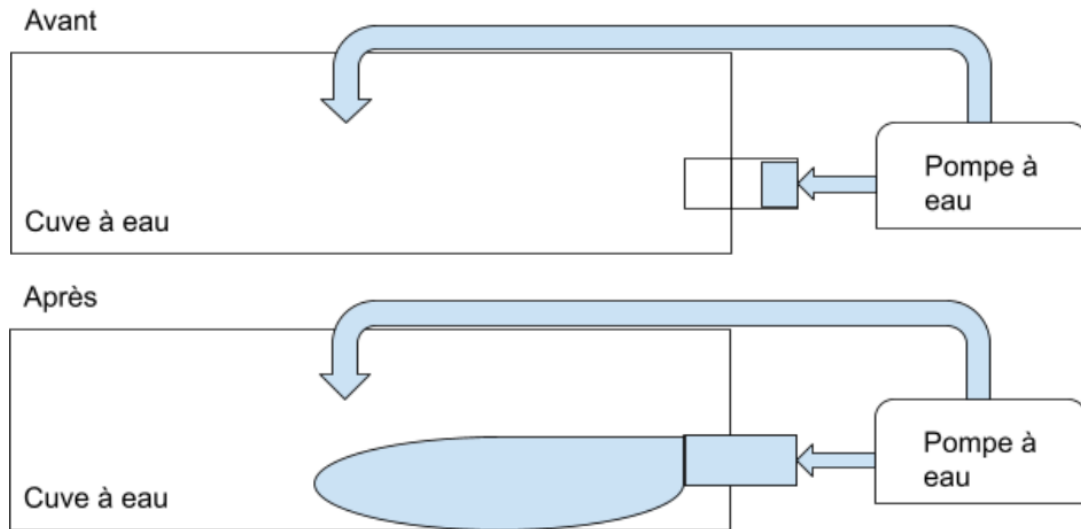


FIGURE 2.3 – Schéma du test réalisé à l'aide de la pompe hydraulique : 2,5 bars

2.3 Observations et conclusion

2.3.1 Observations

Afin de choisir le matériau adéquat pour la membrane, une série de tests a été effectuée. En effet, le matériau utilisé sur le site web consulté [3] qui a inspiré la conception du dispositif était difficilement trouvable en France. Par conséquent, une étude des matériaux dont les caractéristiques se rapprochent d'une feuille PVC de 70 μm a été réalisée.

Le tableau 2.2 résume les résultats obtenus selon le matériau utilisé pour la membrane.

	Feuille de plastifieuse (e = 75 µm)	Feuille transparente (feuille de classeur)	Feuille de papier imprimante	Mouchoirs en papier	Rouleau adhésif emballage (ultra résistant)	Rouleau adhésif type "gaffer"
Pression avant rupture	Pas de rupture	Pas de rupture	Pas de rupture	< 1 bar	Pas de rupture	≈ 2,5 bars
Commentaire	Tests jusqu'à 4 bars. Fuites d'air empêchant l'augmentation de la pression (la feuille se tord sous la contrainte. Déformation plastique à partir de 4 bars.	Tests jusqu'à 3 bars. Trop de déformation avant rupture. Matériau trop élastique.	Tests jusqu'à 3 bars. Trop de fuites d'air car la feuille se tord sous la pression.	Tests réalisés avec 1 à 8 couches. Rupture à trop basse pression pour créer une onde de choc.	Tests jusqu'à 5 bars. Pas de rupture avec une seule couche. Impossible d'augmenter la pression car trop risqué. Matériau trop résistant.	Tests réalisés avec une seule couche. Pas de fuite et une déformation du matériau quasiment pas visible, donc la rupture est nette.

TABLE 2.2 – Résultats obtenus en fonction du matériau utilisé pour la membrane

Le matériau le plus concluant s'est avéré être le scotch type "gaffer", il a donc été conservé pour réaliser un test filmé. Les images de la figure 2.4 ont été prises après avoir placé le canon du générateur à onde de choc en face d'un récipient rempli d'eau (1 seule couche de scotch, rupture à 2,5 bars) :



FIGURE 2.4 – Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 2,5 bars

On constate que, même à une pression de 2,5 bars, le système génère un résultat souhaité. En effet, trois éléments témoignent du passage de l'onde de choc : tout d'abord, on observe de fortes éclaboussures, ce qui montre bien la vitesse élevée de sortie de l'air. Les mouvements des gouttes d'eau sont accompagnés par un bruit sourd et de la fumée sortant du tuyau, comme le montre la dernière image de la figure 2.4.

La figure 2.5 représente les images obtenues pour 2 couches de scotch, c'est-à-dire pour une pression avant rupture de 5 bars.



FIGURE 2.5 – *Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 5 bars*

2.3.2 Conclusion partielle

PARTIE 3

PHOTOGRAPHIE DE L'ONDE DE CHOC

3.1 Protocole et organisation

3.1.1 Cahier des charges

3.1.2 Mise en place du système final

3.2 Observations

3.2.1 Description des résultats

3.2.2 Interprétation

Références

- [1] Harvard University, "*Schlieren Optics*", consulté le 28-05-22, [En ligne] : <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/schlieren-optics>
- [2] Wikipedia (04-05-22), "*Onde de choc*", consulté le 30-05-22, [En ligne] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_de_choc
- [3] F. Zigunov, "*Produce Your Own Shockwaves at Home!*", consulté de 30-05-22, [En ligne] : <https://www.instructables.com/Produce-Your-Own-Shock-Waves-at-Home/>

Résumé

La chaleur émanant d'une bougie, l'air sortant d'un sèche-cheveux ou encore l'onde de choc produite par un avion entraînent des fluctuations de la densité optique. Celles-ci sont toutefois invisibles à l'œil nu, il faut donc concevoir des dispositifs d'imagerie afin de pouvoir les visualiser. Ce projet a porté sur l'étude d'un système d'imagerie Schlieren, dont le principe est similaire au filtrage du son : il s'agit de couper une partie des rayons déviés par un changement d'indice de réfraction afin d'agir sur la luminosité de l'image en sortie. L'équipement consiste en un miroir sphérique, dont le but est de concentrer la lumière d'une source ponctuelle, et d'une lame de rasoir en guise de filtre. L'effet de la source de chaleur est ensuite observé à l'aide d'un appareil photo. Le système conçu a donné des résultats satisfaisants : le contraste pourrait être amélioré, mais l'effet Schlieren est bien visible. L'objectif final de ce projet est de concevoir une onde de choc et de la visualiser à l'aide du dispositif optique.

Mots-clés : effet Schlieren, onde de choc, densité optique, indice de réfraction, filtre

Abstract

Heat emanating from a candle, air coming through a hairdryer or a shock wave produced by a plane create fluctuations in optical density. However, they aren't visible to the naked eye; a specific system is needed in order to observe and analyse these phenomena. Schlieren imaging systems are based on light filtering : similarly to sound filtering, the purpose is to cut off part of the incoming light to create darker spots where it has been deflected by a change in the refractive index of the air. The device that was set in place consists of a spherical mirror that focuses the light coming from a point source and a razor blade that acts as a filter. Once the components are all in place, the interfering object is set in front of the mirror and the result is captured on camera. Experiments with matches gave pretty convincing results : although the contrast and focus still need to be improved, the heat coming out was clearly visible on screen. The final aim of this project is to generate a shockwave through a series of tubes directing air pressure and to observe it with Schlieren photography.

Keywords : Schlieren effect, shock wave, optical density, refractive index, filter