

---

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

<b>Table des figures</b>	<b>4</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>4</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 EFFET SCHLIEREN</b>	<b>6</b>
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 . . . . .	8
1.2.1 Cahier des charges . . . . .	8
1.2.2 Mise en place des montages optiques . . . . .	9
1.2.3 Améliorations des montages . . . . .	10
1.3 Observations et conclusion . . . . .	10
1.3.1 Observations . . . . .	10
1.3.2 Conclusion partielle . . . . .	11
<b>2 DISPOSITIF À ONDE DE CHOC</b>	<b>12</b>
2.1 Théorie du tube à choc . . . . .	12
2.2 Protocole et organisation . . . . .	13
2.2.1 Cahier des charges . . . . .	13
2.2.2 Mise en place du dispositif . . . . .	13
2.3 Observations et conclusion . . . . .	15
2.3.1 Observations . . . . .	15
2.3.2 Conclusion partielle . . . . .	18

---

<b>3</b>	<b>PHOTOGRAPHIE DE L'ONDE DE CHOC</b>	<b>19</b>
3.1	Protocole et organisation . . . . .	19
3.1.1	Cahier des charges . . . . .	19
3.1.2	Mise en place du système final . . . . .	19
3.2	Observations . . . . .	19
3.2.1	Description des résultats . . . . .	19
3.2.2	Interprétation . . . . .	19
	<b>Références</b>	<b>20</b>
	<b>Résumé</b>	<b>21</b>
	<b>Abstract</b>	<b>21</b>

# Table des figures

1.1	<i>Schéma du dispositif de Schlieren avec miroir sphérique . . . . .</i>	7
1.2	<i>Schéma du dispositif de Schlieren avec lentilles convergentes . . . . .</i>	7
1.3	<i>Diagramme de GANTT prévu pour le montage optique . . . . .</i>	8
1.4	<i>Matériel utilisé pour l'effet Schlieren . . . . .</i>	9
1.5	<i>Schéma du schéma et de la PCB réalisés pour la LED . . . . .</i>	10
2.1	<i>Principe et évolution de la pression dans le tube à choc . . . . .</i>	12
2.2	<i>Diagramme de GANTT prévu pour le dispositif à onde de choc . . . . .</i>	13
2.3	<i>Schéma du test réalisé à l'aide de la pompe hydraulique . . . . .</i>	14
2.4	<i>Schéma du dispositif construit pour l'onde de choc finale . . . . .</i>	14
2.5	<i>Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 2,5 bars . . . .</i>	17
2.6	<i>Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 5 bars . . . .</i>	18

# Liste des tableaux

1.1	<i>Membres et tâches attribuées (dispositif à imagerie Schlieren) . . . . .</i>	8
2.1	<i>Membres et tâches attribuées (tube à onde de choc) . . . . .</i>	13
2.2	<i>Résultats obtenus en fonction du matériau utilisé pour la membrane . . . .</i>	16

## 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,  $\rho$  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,  $\theta_i$  l'angle d'incidence et  $\theta_r$  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. Le montage optique peut être réalisé avec un miroir sphérique ou avec deux lentilles convergentes.

### 1.1.1 Dispositif avec miroir sphérique

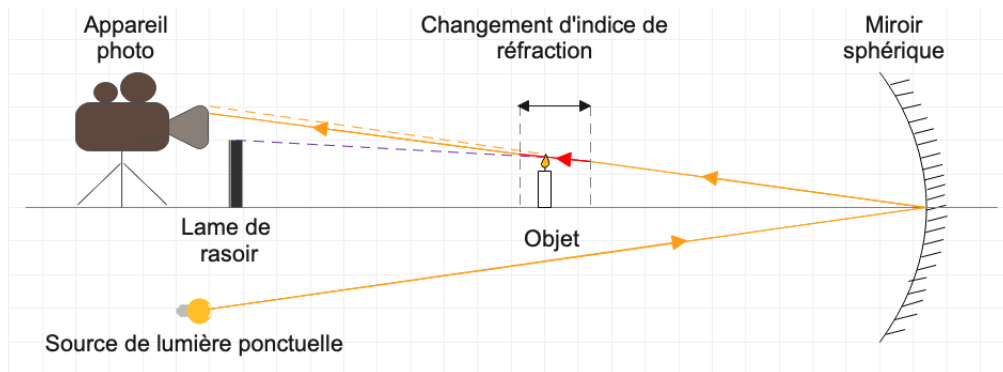


FIGURE 1.1 – Schéma du dispositif de Schlieren avec miroir sphérique

Ce dispositif consiste en un miroir sphérique éclairé par une source ponctuelle ; un écran ou une caméra est placé à côté de cette dernière, toujours à une distance égale à deux fois la distance focale du miroir, pour capturer les rayons lumineux réfléchis. Or l'objet à observer est placé en face du miroir, créant une perturbation dans l'air. Certains rayons sont alors déviés, puis coupés par une lame de rasoir qui agit en tant que filtre. On observe ainsi des tâches plus ou moins sombres correspondant à la forme de la perturbation [1].

### 1.1.2 Dispositif avec lentilles convergentes

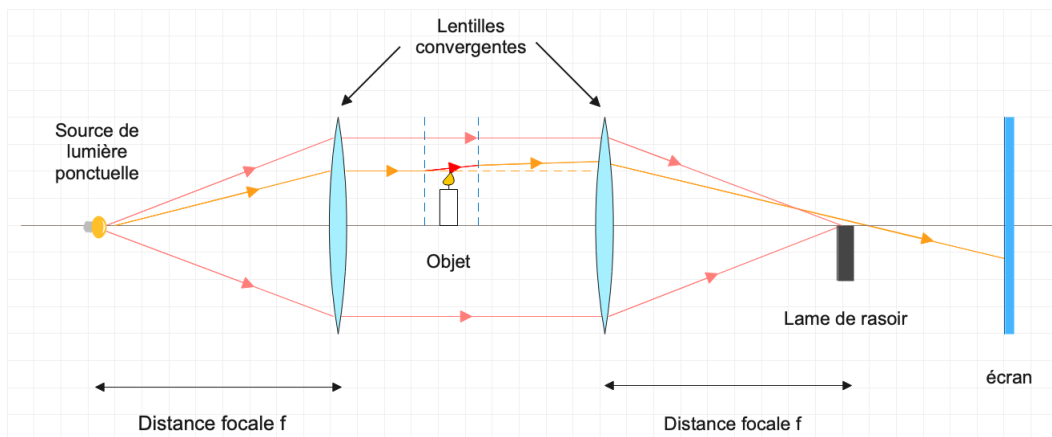


FIGURE 1.2 – Schéma du dispositif de Schlieren avec lentilles convergentes

Ce système est constitué d'une source de lumière ponctuelle, d'une lame de rasoir, d'un écran et de deux lentilles convergentes faisant office de lentille de Fresnel. On positionne la source ponctuelle au point focal objet de l'une des lentilles afin d'obtenir un faisceau de rayons parallèles, et on se sert de l'autre lentille pour faire converger le faisceau, créant ainsi un système afocal. En plaçant la lame de rasoir au point focal image de la deuxième lentille, on élimine les rayons parallèles au faisceau, ce qui permet d'observer les rayons déviés par effet Schlieren sur l'écran.

Le but de cette première partie est donc de réussir à observer l'influence des gradients de densité sur l'air grâce à l'un des dispositifs énoncés précédemment.

## 1.2 Protocole et organisation

### 1.2.1 Cahier des charges

Une fois l'objectif 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 1.3 a été établi :

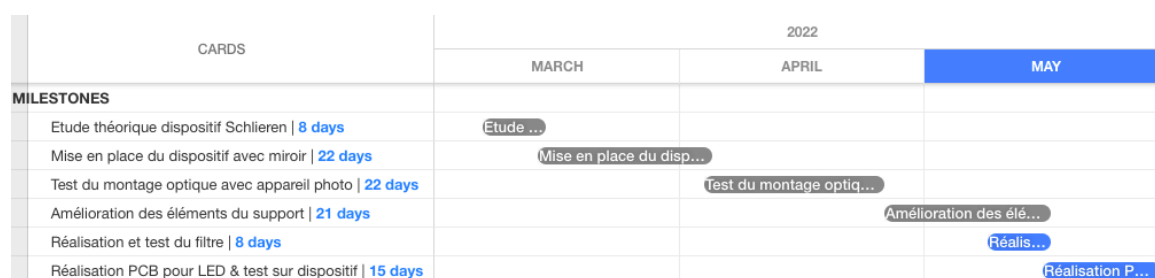


FIGURE 1.3 – Diagramme de GANTT prévu pour le montage optique

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

#### MONTAGE AVEC LENTILLES CONVERGENTES

Le système optique avec lentilles convergentes a été constitué à partir des éléments suivants :

- Deux lentilles convergentes de distance focale **50 mm** ;
- Une troisième lentille de distance focale **35 mm** pour transformer la source lumineuse en une source ponctuelle ;
- Une lame de rasoir ;
- Une source lumineuse : le flash d'un téléphone portable ;
- Un écran.

#### MONTAGE AVEC MIROIR SPHÉRIQUE

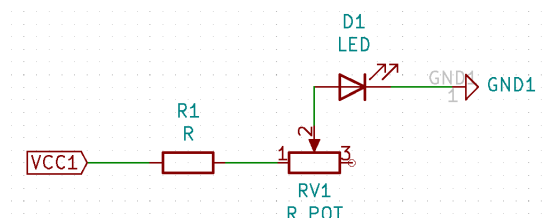
Pour ce montage, le matériel suivant a été utilisé :

- Un miroir sphérique :  $\varnothing$  **86 mm**, distance focale : **520 mm** ;
- Une lame de rasoir ;
- Une source lumineuse : lampe disponible en salle de TP ou flash de téléphone portable ;
- Un appareil photo.

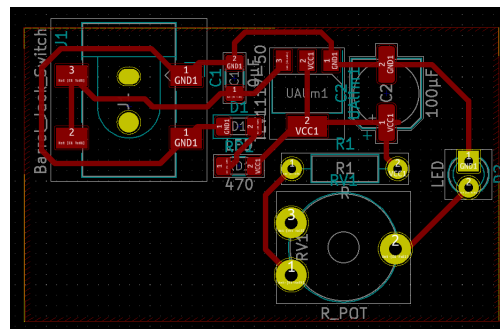


FIGURE 1.4 – *Matériel utilisé pour l'effet Schlieren*

### 1.2.3 Améliorations des montages



(a) Schéma Kicad de la LED



(b) Schéma de la carte PCB

FIGURE 1.5 – Schéma du schéma et de la PCB réalisés pour la LED

## 1.3 Observations et conclusion

### 1.3.1 Observations

#### MONTAGE AVEC LENTILLES CONVERGENTES

Avec le dispositif des lentilles, le contraste n'est pas excellent. Cela est dû à la précision du montage qui est nettement moins bonne que celle du montage avec le miroir. En effet, l'utilisation de trois lentilles affecte la précision du montage et ainsi le rendu final. Le filtrage permet néanmoins une amélioration du contraste et améliore la qualité sur l'écran. Ce montage est correct pour des fortes variations d'indices notamment avec l'utilisation d'une flamme (briquet ou allumette). Cependant, avec le sèche-cheveux, les variations d'indices sont moins importantes car la température est plus faible que celle d'une flamme. De ce fait, on ne peut observer l'effet Schlieren avec ce montage. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser un autre montage optique.

#### MONTAGE AVEC MIROIR SPHÉRIQUE

Avec le dispositif du miroir, le contraste est nettement meilleur. De plus, on observe qu'avec le filtrage, le contraste est encore amélioré. L'utilisation d'un seul élément optique permet une meilleure précision et ainsi un rendu très net. Cette fois-ci, nous pouvons observer nettement l'effet du sèche-cheveux sur la variation

de l'indice de l'air. Il y a une réflexion totale de la lumière, ce qui permet d'obtenir une netteté plus importante. Pour améliorer ce rendu, nous pourrions utiliser des filtres de couleurs afin d'améliorer le contraste mais cette solution ne sera pas détaillée ici.

### **1.3.2 Conclusion partielle**

On remarque bien qu'en comparant la différence de contraste entre les deux méthodes, la méthode avec miroir donne une image plus visible qu'avec les lentilles. En optant plutôt pour une LED de forte intensité que pour une lampe, on peut améliorer le rendu des tests.

Pour pousser encore plus loin l'intérêt de l'effet Schlieren, il a été décidé de réaliser un dispositif à onde de choc. Cette dernière provoque une variation de l'indice optique mais de manière très brève. Le dispositif en question couplé avec le montage optique Schlieren permet de visualiser nettement cette variation d'indice, et ainsi détecté la présence d'une onde de choc.

## 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.

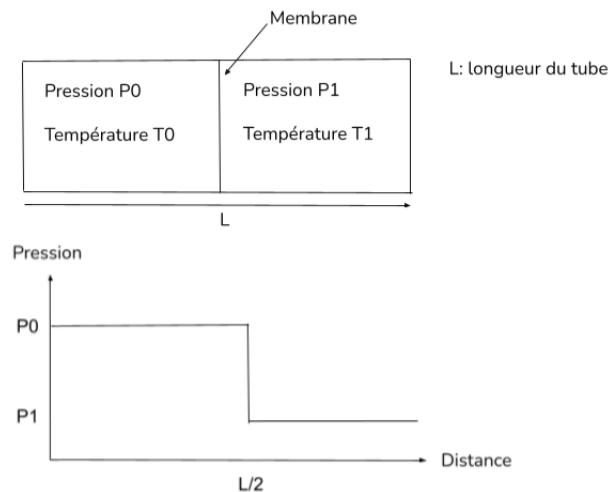


FIGURE 2.1 – *Principe et évolution de la pression dans le tube à choc*

Le tube à choc est composé de deux tubes en PVC séparés par une membrane.

En pompant la partie gauche du montage à l'aide de la pompe à vélo, on augmente la pression dans le tube de gauche. A partir d'une pression  $P$ , la membrane se brise et la discontinuité de pression dans le tube crée l'onde de choc et par conséquent l'explosion à la sortie du tube.

Le but de cette étape du projet est d'exploiter ce principe pour générer une onde de choc.

## 2.2 Protocole et organisation

### 2.2.1 Cahier des charges

Après avoir déterminé les objectifs techniques, le diagramme de GANTT suivant a été établi :

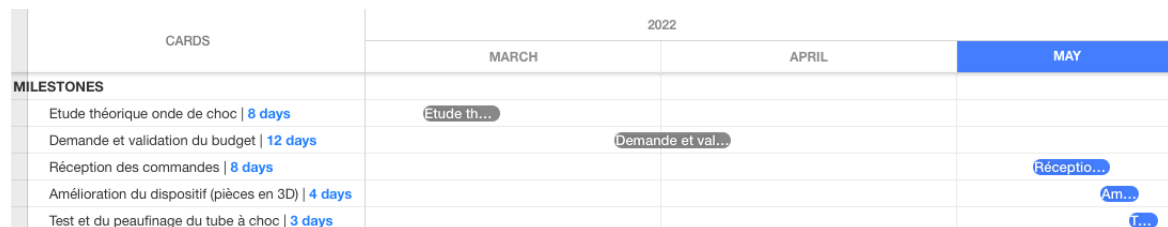


FIGURE 2.2 – Diagramme de GANTT prévu pour le dispositif à onde de choc

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<sup>er</sup> 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).

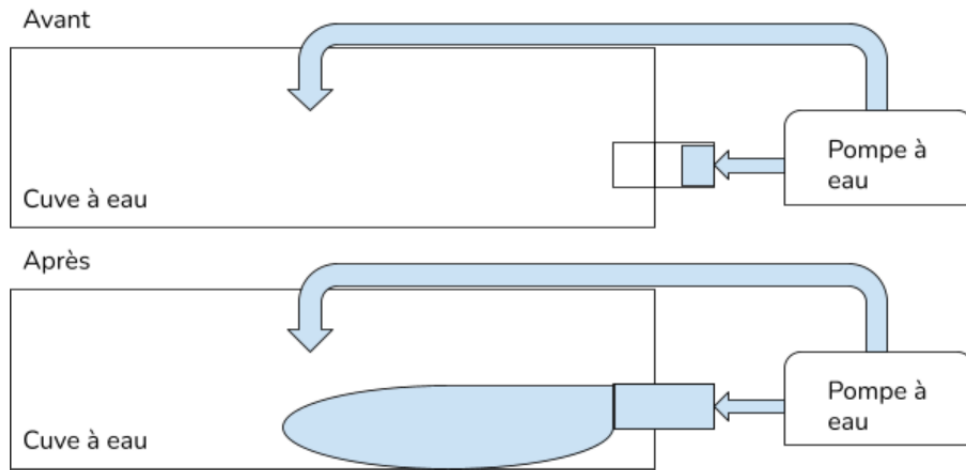


FIGURE 2.3 – Schéma du test réalisé à l'aide de la pompe hydraulique

#### TEST FINAL DE L'ONDE DE CHOC

Une fois le principe de l'onde de choc testé sur la pompe hydraulique, on procède aux tests avec pompe à air.

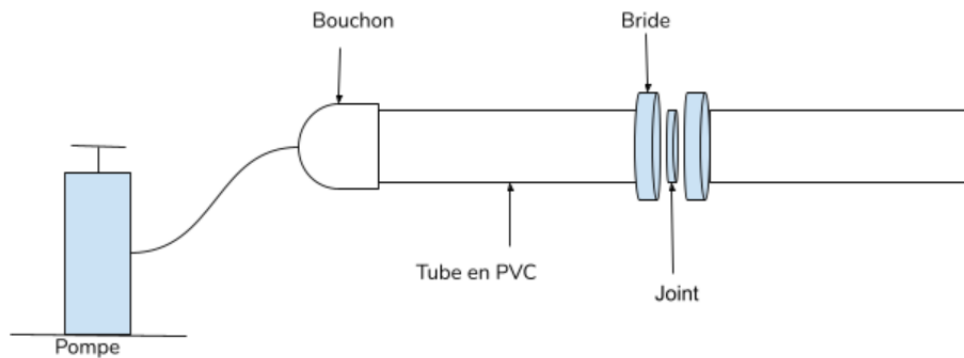


FIGURE 2.4 – Schéma du dispositif construit pour l'onde de choc finale

Pour réaliser le tube à choc de la figure 2.4, le matériel suivant a été utilisé [3] :

- 1 tube en PVC :  $\varnothing$  40 mm,  $L = 1$  m (dimensions habituelles) ;
- 1 bouchon à coller en PVC :  $\varnothing$  40 mm pour éviter la fuite d'air d'un côté du tube ;

- 1 colle PVC ;
- 2 brides :  $\varnothing$  **40 mm** ;
- 4 vis et écrous ;
- 1 pompe à pied ;
- 1 joint en caoutchouc.

Le budget total du dispositif s'est élevé à **55,86 €**. Entre le joint et la bride de droite est placée la membrane dont le matériau doit être déterminé.

## 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  $\mu\text{m}$  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)	<b>Rouleau adhésif type <i>Gaffer</i></b>
Pression avant rupture	Pas de rupture	Pas de rupture	Pas de rupture	< 1 bar	Pas de rupture	<b>≈ 2,5 bars</b>
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.	<b>Tests réalisés avec une seule couche. Pas de fuite et une déformation du matériau quasiment pas visible, donc la rupture est nette.</b>

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 2.5 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) :



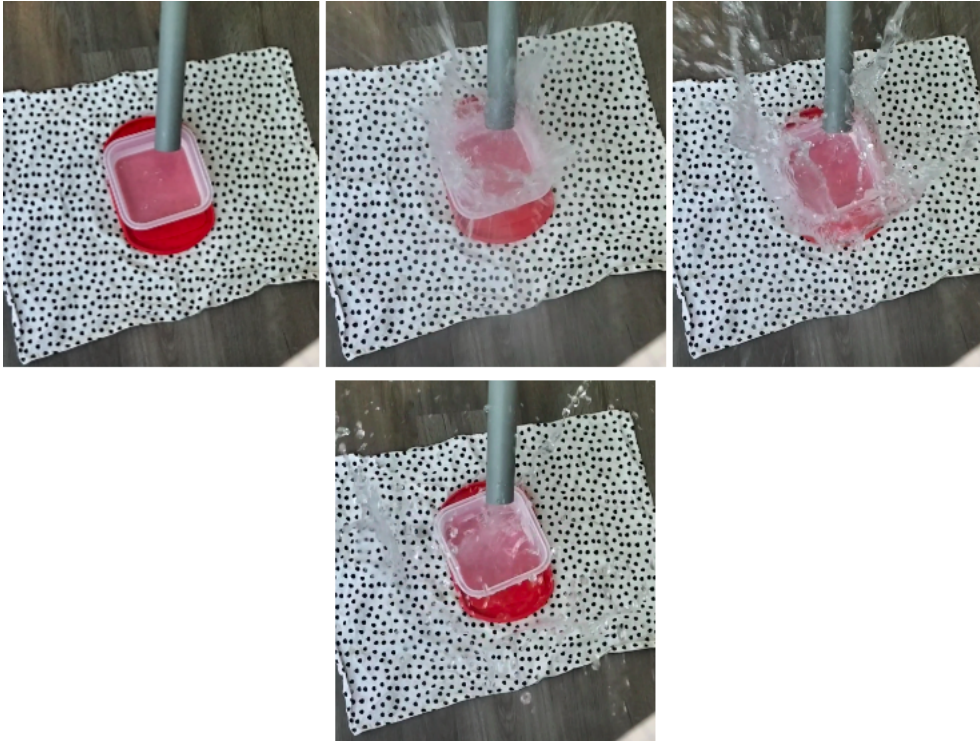


FIGURE 2.5 – Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 2,5 bars

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 2.5.

La figure 2.6 représente les images obtenues pour 2 couches de scotch, c'est-à-dire pour une pression avant rupture de 5 bars.



FIGURE 2.6 – Images de l'onde de choc générée, pression avant rupture : 5 bars

En empilant plusieurs couches de scotch, il est possible d'augmenter la pression avant rupture selon une relation vraisemblablement linéaire (1 couche = 2,5 bars, 2 couches = 5 bars, etc..) et ainsi obtenir une onde de choc plus rapide. Cependant, une vitesse plus importante signifie une photographie à travers le dispositif Schlieren plus difficile à prendre. De plus, il faut prendre en compte l'aspect sécurité. Les pièces PVC sont censées résister à près de 10 bars, mais afin de limiter au maximum les risques d'explosion, on se limitera à 5,5 bars lors des tests. Une légère déformation des pièces imprimées en 3D a aussi été constatée lors des tests à deux couches de scotch. Enfin, le bruit est encore plus sourd et nécessite le port d'un casque antibruit. Pour toutes ces raisons, il a été décidé de se limiter à une seule couche de scotch *Gaffer* pour les tests avec le dispositif optique.

### 2.3.2 Conclusion partielle

Les résultats obtenus montrent que le matériel choisi a permis d'obtenir une onde de choc. Cependant, la problématique demeure dans la capacité à obtenir une imagerie visible de l'onde avec le dispositif d'imagerie Schlieren, tout en tenant compte de la rapidité de la perturbation et des limites de l'appareil photo.

## 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](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