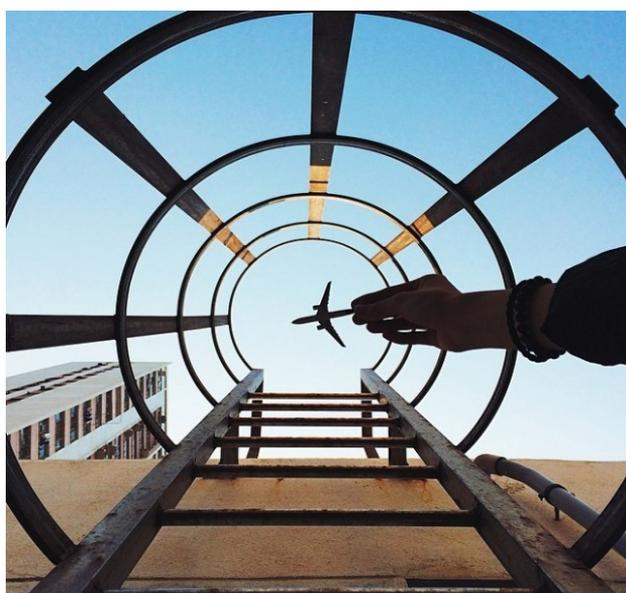


**Étude expérimentale d'illusions d'optique :  
le mirascope et l'effet Pulfrich**



**Étudiants :**

**Oksana Allaire**

**Théo Patry**

**Marie Lebranchu**

**Thibault Bonneaud**

**Noémie Lebranchu**

**Enseignant-responsable du projet :**

**David Honoré**

---



Date de remise du rapport : **10/06/2016**

Référence du projet : **STPI/P6/2016 – 22**

Intitulé du projet : ***Encore d'autres illusions d'optique.***

Type de projet : Calculs théoriques comparés à des expériences.

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est d'étudier deux illusions d'optique : le mirascope et l'effet Pulfrich.

Mots-clefs du projet : mirascope, effet Pulfrich

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3. L'effet Pulfrich.....	6
3.1. Modélisation mathématique de l'effet Pulfrich.....	6
3.2. Réalisation des montages pour l'étude de l'effet Pulfrich.....	9
3.2.1. Mise en place du pendule pour la visualisation de l'effet Pulfrich.....	9
3.2.2. Mise en place du système à polariseurs pour la variation d'éclairement reçue par les yeux.....	10
3.3. Résultats et analyses.....	11
3.3.1. Quantification expérimentale de l'effet Pulfrich.....	11
3.3.2. Comparaison des mesures expérimentales et de la modélisation.....	12
3.3.3. Étude du délai de perception.....	12
3.4. Étude de la sensibilité des paramètres.....	14
3.4.1. Étude de la sensibilité de la distance GD.....	14
3.4.2. Influence sur la position de l'image virtuelle.....	15
4. Mirascope.....	16
4.1. Détermination de la distance focale des miroirs concaves par leur forme parabolique	16
4.2. Mesure directe de la distance focale.....	18
4.3. Trajet des rayons.....	20
4.4. Limites.....	21
4.5. Mirascope géant.....	22
4.6. Conclusion.....	25
5. Conclusions et perspectives.....	26
6. Annexes.....	27
6.1. Index des illustrations.....	27
6.2. Index des tableaux.....	27
6.3. Annexe 1 : Vérification de la loi de Malus.....	28
6.4. Annexe 2 : Étude de l'influence des autres paramètres de notre équation du mouvement.....	29
6.5. Annexe3 :Protocoles pour déterminer la distance focale.....	33
6.6. Annexe 4 : Diagramme de Dante.....	35
6.7. Bibliographie.....	36

## 1. INTRODUCTION

Nous connaissons tous le fameux dicton « je ne crois que ce que je vois ». Mais doit-on toujours croire ce que nous voyons ? La perception visuelle repose sur deux organes : l'œil et le cerveau. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il est très facile de tromper ces deux organes. Les illusions d'optique sont de parfaits exemples des limites de notre perception visuelle. Ce sont des perceptions qui trompent le système visuel humain, de l'œil jusqu'au cerveau, et qui aboutissent à une vision erronée de la réalité. Il est donc possible de classer ces illusions d'optique sous deux catégories, en fonction de leur cause. En effet, les causes de ces illusions peuvent être spatiales (mécanisme de l'œil parfois trompé par des ensembles de miroirs par exemple), ou bien temporelles (traitement des informations par le cerveau). Elles peuvent survenir naturellement ou être l'objet d'astuces visuelles.

Nous avons donc décidé de travailler sur deux illusions d'optique différentes, une illusion d'optique spatiale et une temporelle. C'est pourquoi nous avons choisi d'expliquer le phénomène du mirascope, ainsi que l'effet Pulfrich.

En effet, le mirascope est un ensemble de deux miroirs concaves donnant l'impression qu'un objet peut flotter dans l'air, au dessus du système. Ce dispositif appartient donc bien à la catégorie des illusions d'optique spatiales, notre œil est trompé, il ne voit pas l'objet là où il se trouve réellement.

Quant à l'effet Pulfrich, nous allons voir qu'il s'agit d'un effet s'appuyant sur le retard de perception d'un des deux yeux, ce qui donne lieu à un décalage du traitement de l'information au niveau du cerveau. Il appartient donc à la catégorie des illusions d'optique temporelles. L'effet Pulfrich est une illusion d'optique permettant de simuler un effet de 3D.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour réaliser notre projet, nous avons séparé les tâches en deux : une partie du groupe s'est intéressée à l'étude du mirascope et l'autre à l'effet Pulfrich. Travailler de cette façon nous a permis d'être plus efficace et nous a permis de répartir le travail sur l'ensemble de la période de travail plutôt que de le diviser en deux. Tout le long de ce semestre, nous nous sommes répartis de la façon suivante : Marie et Oksana étaient chargées de s'occuper du mirascope, et Théo et Noémie pour l'effet Pulfrich. Etant cinq, Thibault faisait le relais entre nos deux groupes, mais finalement, le mirascope posant plus de problèmes, il est resté principalement sur cette partie du projet.

Pour bien répartir notre temps et avoir une idée de ce que nous devons faire, nous avons réalisé un diagramme de Dante, c'est-à-dire que nous avons établi dès le début une liste de toutes les tâches que nous aurions à faire dans chacun des deux projets, et une estimation du temps que chacune d'elles nous prendrait. Pour une explication plus détaillée des tâches que nous avons effectuées chacun, voir l'Annexe 4.

## 3. L'EFFET PULFRICH

Le but de cette première partie est d'étudier l'effet Pulfrich. C'est un phénomène psycho-optique basé sur le temps de perception du cerveau. Il est le plus couramment utilisé pour créer un effet de trois dimensions. Il a été découvert en 1922 par le physicien allemand Carl Pulfrich<sup>[1]</sup>.

Cette illusion optique est fondée sur le fait que la vitesse d'un signal nerveux est influencée par l'intensité lumineuse du signal capté par l'œil. Plus l'intensité lumineuse est élevée plus la vitesse de propagation du signal nerveux est importante. La visualisation de l'effet Pulfrich repose donc sur la différence d'intensité lumineuse reçue par les deux yeux<sup>[2]</sup>.

Dans l'objectif d'étudier l'effet Pulfrich, nous avons souhaité dans un premier temps mettre en place un modèle mathématique nous permettant de modéliser l'illusion d'optique. Pour cela, nous avons choisi le modèle d'un pendule. C'est un modèle dont le mouvement est simple à décrire et qui permet une bonne visualisation de l'effet Pulfrich. Ensuite, nous avons cherché à déterminer les coordonnées de l'objet virtuel, c'est-à-dire celui que nous croyons voir. En effet, l'objet virtuel en question décrit, par son mouvement, une ellipse alors qu'il s'agit d'un pendule se déplaçant le long d'un axe.

Dans un second temps, nous avons réalisé le montage permettant de visualiser l'effet. Pour cela nous avons dû fabriquer un pendule et définir de quelle façon nous allions créer la différence d'intensité lumineuse entre l'œil gauche et l'œil droit. Afin de créer cette différence d'intensité, nous avons choisi d'utiliser deux polariseurs superposés l'un sur l'autre. Ce dispositif permet d'atténuer l'intensité lumineuse de façon variable. En fonction de l'angle entre les deux axes des polariseurs l'éclairement varie, ce qui nous a permis de mettre en relation l'intensité lumineuse et l'accentuation de l'effet Pulfrich, c'est-à-dire la profondeur de l'ellipse observée.

Ensuite nous avons cherché à valider notre modèle mathématique. Pour cela, grâce à notre montage, nous avons pu relever des mesures de l'ellipse. Nous les avons confrontées avec le modèle mathématique mis en place précédemment. Ces relevés de mesure nous ont également permis de déterminer le délai de perception. Le délai de perception est le temps supplémentaire que met l'information pour arriver au cerveau, dû à une intensité lumineuse moins importante. Au début de notre travail, nous avons pris une valeur que nous avons trouvée lors de nos recherches. Nous avons donc voulu retrouver cette valeur par l'expérience.

Pour finir, nous avons souhaité étudier l'influence de tous les paramètres rentrant en compte dans nos équations afin de tenter d'expliquer les imprécisions obtenues pendant l'expérience. En effet, certains paramètres sont plus sensibles que d'autre et pour certains il n'est pas facile d'être précis dans leur mesure.

### 3.1. Modélisation mathématique de l'effet Pulfrich

Lors de la première étape de notre étude nous avons choisi de mettre en place un modèle mathématique nous permettant de bien comprendre et quantifier l'effet Pulfrich. Pour cela, nous avons décidé de mettre en équation la trajectoire d'un pendule. Par la suite, nous avons déterminé la position de l'objet virtuel à chaque instant, celle que l'on croit voir du fait de l'effet Pulfrich.

Pour représenter un pendule, nous avons essayé de modéliser un objet en mouvement rectiligne périodique, se déplaçant le long d'un axe. Nous avons défini  $x_G(t)$  comme la position de l'objet perçue par l'œil gauche et  $x_D(t)$  la position de l'objet perçue par l'œil droit à un instant  $t$ . Nous considérons qu'on ne place pas de polariseur devant l'œil gauche, alors qu'on en place un devant l'œil droit. Si les deux yeux sont dégagés, alors  $x_G(t)$  et  $x_D(t)$  sont confondus. L'effet Pulfrich n'est alors pas observable puisqu'il repose sur la différence d'intensité lumineuse, dans notre cas la présence du polariseur. Comme l'œil droit est masqué, il perçoit l'objet avec un retard par rapport à l'œil gauche. Ce retard correspond au délai de perception de l'œil droit.

Les deux yeux reçoivent deux informations différentes quant à la position de l'objet. Le cerveau fait alors une superposition entre l'image perçue par l'œil gauche et celle de l'œil droit. En effet, cette superposition peut se voir comme une triangulation entre les deux yeux et l'image qu'ils perçoivent respectivement, comme le montre l'illustration 1. Cela forme alors un objet virtuel, nous avons l'impression de ne plus voir l'objet sur l'axe alors qu'il s'y trouve bien. Au cours d'une période, nous avons donc l'impression de le voir décrire une ellipse.

Pour poser nos conventions d'écriture et de calcul nous avons établi le schéma de l'illustration 1.

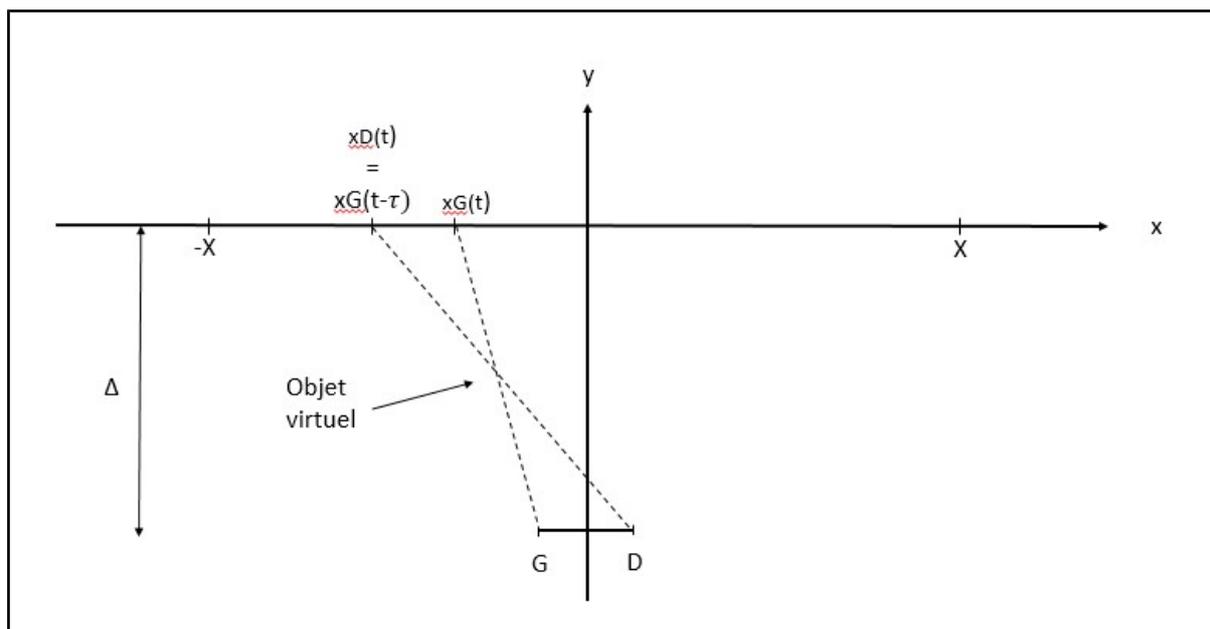


Illustration 1: Schématisation de la triangulation à l'origine de l'effet Pulfrich

Nous avons défini les grandeurs suivantes :

- $GD$  : la distance entre l'œil gauche et l'œil droit, en millimètre .
- $\Delta$  : la distance entre les yeux de l'observateur et l'objet réel, en millimètre.
- $\tau$  : le délai de perception, en seconde.
- $T$  : la période d'une oscillation, en seconde.

Afin de déterminer l'équation du mouvement de l'objet virtuel nous avons posé :

- $x_G(t) = X \cos \left( \frac{2\pi t}{T} \right)$  Cela correspond à la position de l'objet vu par l'œil gauche à l'instant  $t$ .

L'image perçue à un instant  $t$  par l'œil droit est la même que celle perçue par l'œil gauche à l'instant  $t - \tau$ , cela est dû au retard engendré par le polariseur placé sur l'œil droit.

- $x_D(t) = x_G(t - \tau) = X \cos \left( \frac{2\pi(t - \tau)}{T} \right)$

Et les points G et D ont pour coordonnées :

- $G \left( -\frac{DG}{2} ; \Delta \right)$
- $D \left( \frac{DG}{2} ; \Delta \right)$  d'après le schéma ci-dessus

Nous avons ensuite déterminé les vecteurs directeurs des droites  $Gx_G$  et  $Dx_D$ . A partir de ces vecteurs directeurs, nous en avons déduit leur équation cartésienne.

Ensuite, à l'aide de ces deux équations cartésiennes, il est facile de déterminer leur intersection, ce qui correspond à la position de l'objet virtuel.

Ainsi, on obtient les coordonnées suivantes pour la position virtuelle du pendule :

$$x = x_g - \left( \frac{DG}{2} + x_g \right) \cdot \frac{x_g - x_d}{DG + x_g - x_d}$$

$$y = \Delta (x_g - x) \cdot \frac{1}{-\left( \frac{DG}{2} + x_g \right)}$$

Pour finir, à l'aide d'un tableur, nous avons modélisé graphiquement la position de l'image virtuelle en fonction du temps à partir des coordonnées obtenues précédemment. Afin de déterminer les coordonnées, nous avons besoin de fixer la valeur des différents paramètres rentrant en compte dans le calcul.

Dans l'exemple ci-dessous, nous avons fixé les paramètres suivants :

T	10	s
x	210	mm
GD	61	mm
DELTA	1000	mm
Délai de perception	0,02	s

Nous obtenons alors le graphique de la figure 1.

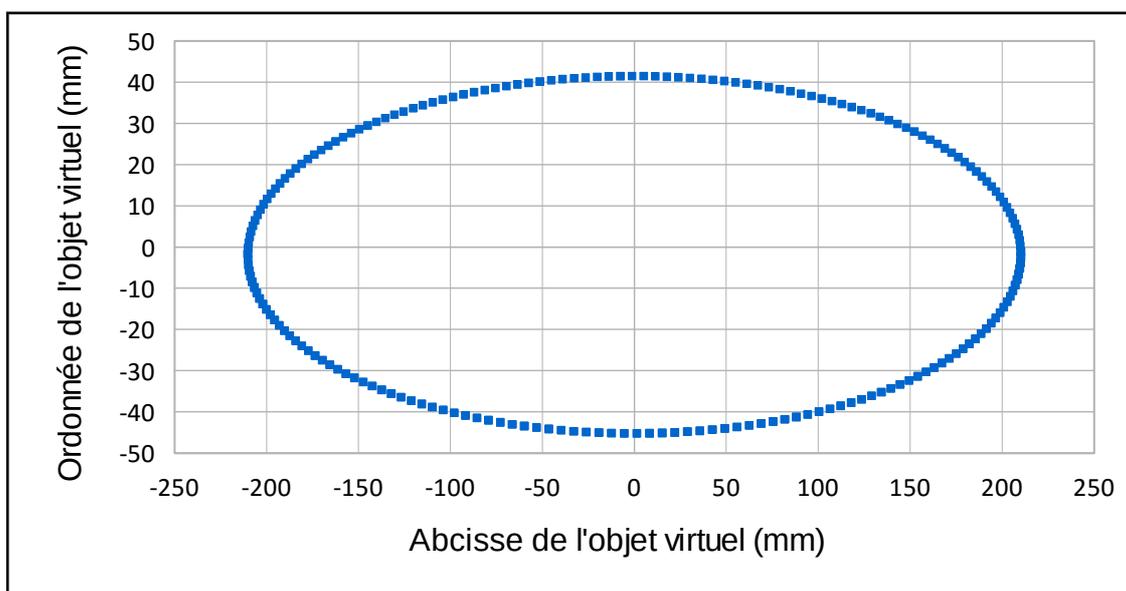


Figure 1: Trajectoire de l'objet virtuel perçu par effet Pulfrich

Après calcul et représentation graphique, nous observons bien une ellipse comme attendu. Cela montre que les équations de coordonnées que nous avons obtenues sont cohérentes.

De plus, cette modélisation nous a permis de constater que le mouvement est bien représenté par une ellipse mais celle-ci est non centrée sur l'origine. Avant de réaliser ces calculs nous n'avions pas remarqué ce décalage. Nous pourrions l'expliquer du fait que lorsque l'objet semble derrière le plan de déplacement réel, l'angle de vue est plus petit. Un angle plus petit entraîne une diminution de la distance entre l'objet virtuel et l'axe de déplacement réel.

Il reste maintenant à déterminer si l'expérience valide bien ce modèle.

### 3.2. Réalisation des montages pour l'étude de l'effet Pulfrich

Après avoir modélisé l'effet Pulfrich mathématiquement, nous avons voulu mettre en place une manipulation nous permettant de le visualiser. Pour vérifier notre modèle, nous avons estimé la distance de l'objet virtuel par rapport à l'axe du pendule. Pour cela nous avons relevé des mesures au point le plus près de nous et au point le plus loin c'est-à-dire lorsque le pendule est à la verticale.

### 3.2.1. *Mise en place du pendule pour la visualisation de l'effet Pulfrich*

Pour représenter au mieux le déplacement plan d'un objet, nous avons utilisé un pendule. Nous avons d'abord essayé d'optimiser le plus possible notre système de pendule.

Au premier essai, nous avons utilisé un pendule « traditionnel » : nous avons attaché une ficelle à une tige en métal, puis accroché une masse au bout de la ficelle. La première masse était un petit écrou. Cependant, lors du lancé de cet écrou, le mouvement n'était pas vraiment rectiligne et décrivait de temps en temps une légère ellipse. En effet, l'écrou n'était pas assez lourd pour stabiliser au mieux le pendule. Nous avons du changer de dispositif car l'ellipse formée par le pendule nous empêchait de bien mesurer l'effet Pulfrich. L'incertitude sur la visualisation de l'effet était trop grande.



*Illustration 2: Premier essai de pendule*

Nous avons alors pris un autre écrou plus gros et avec une masse plus grande. La ficelle était alors mieux tendue, le système était aussi plus stable. Néanmoins, comme l'écrou était plus grand, la surface sur laquelle s'exercent les forces de frottement de l'air était plus importante, ce qui le faisait tourner, et modifiait sa trajectoire. Lors d'un lancé, l'écrou finissait par changer de trajectoire et faire une légère ellipse, ce qui faussait encore une fois la visualisation de l'effet.



*Illustration 3: Pendule définitif*

Nous avons donc décidé de changer la ficelle, car il était trop difficile d'avoir un mouvement précis, et nous l'avons remplacée par une barre en fer. Nous l'avons fixée à notre tige de métal à l'aide d'une vis de façon à ce qu'elle puisse bouger et faire un mouvement de pendule. Cette fois-ci, le mouvement était bien rectiligne et la visualisation de l'effet Pulfrich n'était pas faussée. Nous avons donc gardé ce système pour notre manipulation.

### 3.2.2. *Mise en place du système à polariseurs pour la variation d'éclairement reçue par les yeux*

Afin de pouvoir observer l'effet Pulfrich, nous avons besoin de faire varier l'éclairement reçu par un œil par rapport à l'autre : un œil est nu et devant l'autre nous plaçons deux polariseurs d'orientation variable. En effet, nous souhaitons observer l'influence du degré d'obscurité sur la forme de l'ellipse obtenue. C'est-à-dire, déterminer si les mesures que nous voulons relevées varient en fonction de l'intensité lumineuse perçue par l'œil masqué par le système de polariseurs.

Pour cela nous avons donc utilisé deux polariseurs. En effet, nous savons qu'en fonction de l'angle entre les axes des deux polariseurs, l'intensité lumineuse transmise varie. C'est le principe de la loi de Malus.

Pour réaliser notre montage, nous avons donc découpé les deux verres de lunettes que nous avons, ils se comportent comme deux polariseurs. Nous avons fixé le premier polariseur sur un support. Ensuite nous avons fixé le deuxième polariseur sur un support pivotant, ce qui permet de faire tourner un polariseur par rapport à l'autre. Ce mécanisme permet donc de faire varier l'intensité lumineuse.



*Illustration 4: Système de polariseur*

Les deux polariseurs sont censés vérifier la loi de Malus.

La loi de Malus se décrit comme :  $I = I_0 \cos^2(\theta)$  avec  $I$  l'intensité lumineuse et  $I_0$  l'intensité lumineuse initiale. Grâce au système de polariseurs que nous avons mis en place, nous pouvons quantifier l'intensité lumineuse grâce à la loi de Malus. [Voir annexe 1]

Pour finir, afin de vérifier la pertinence de notre modèle mathématique nous avons réalisé la manipulation permettant d'observer l'effet Pulfrich.

## Manipulation

### **Matériel :**

- 1 pendule.
- 1 polariseur.
- 1 mètre.
- 1 chaise.

### **Protocole :**

- Placer le pendule sur une table et noter sa position.
- Placer une chaise devant la table.
- Mesurer la distance entre le pendule et les yeux de l'observateur assis sur la chaise.
- Placer un mètre sous le pendule.
- Placer le polariseur devant l'œil droit de l'observateur.
- Mettre en oscillation le pendule.
- Relever les mesures observées.



*Illustration 5: Montage pour la visualisation de l'effet Pulfrich*

## **3.3. Résultats et analyses**

Dans cette partie, nous expliquerons comment nous en sommes venus à l'idée que nous pouvions valider le modèle mathématique défini quelques temps plus tôt. A l'aide d'une manipulation, nous allons donc étudier la cohérence des résultats pratiques avec la théorie. Puis nous essaierons de voir si nous pouvons utiliser ce modèle théorique pour déterminer le délai de perception et le mettre en relation avec le degré d'obscurité de l'œil caché. La loi de Malus nous sera alors très utile.

### **3.3.1. Quantification expérimentale de l'effet Pulfrich**

Pour déterminer  $T$ , nous avons mesuré, à l'aide d'un chronomètre, la durée de plusieurs périodes, que nous avons ensuite divisé par le nombre de périodes mesurées pour augmenter la précision de la valeur d'une période. Nous pouvons donc donner une incertitude de 2 ms à cause du moment de décalage entre le déclenchement du chronomètre et le lancement du pendule, et le même décalage pour son arrêt.

La valeur de  $X$  est aussi assez précise puisque nous pouvions mesurer directement la petite règle en fer. Nous pouvons estimer son incertitude à 1 mm près.

La distance séparant les deux yeux  $GD$  varie beaucoup d'une personne à l'autre. De plus, celle-ci n'est pas modifiable. Nous avons donc pris la distance moyenne mondiale trouvée dans nos recherches documentaires. Cette distance ne correspond pas à notre propre distance interoculaire, ce qui provoque naturellement un petit décalage dans nos résultats. Néanmoins, cette mesure ne vient pas de nous, nous n'avons donc pas d'incertitude à donner.

Quant à  $\Delta$ , mesurer la distance entre nos yeux et le pendule est assez difficile car nos yeux ne se situent pas au même niveau que le pendule. Une incertitude sur cette mesure est donc plutôt importante, ce qui expliquera aussi ces petites erreurs de précisions. Nous pouvons donc estimer cette incertitude à 3 cm. En effet, du fait de l'écart de niveau entre les yeux et le pendule, de la grande distance, et notre approximation de l'alignement de la mesure avec le pendule situé en-dessous, l'incertitude est assez grande.

Enfin, les mesures que nous avons faites pendant la manipulation ont aussi de grandes incertitudes parce qu'elles reposent uniquement sur notre propre estimation de l'emplacement de l'objet virtuel au plus proche de nous, et au plus loin. Il est donc très difficile d'avoir des résultats précis. Nous pouvons donc estimer l'incertitude à 1 cm : 5 mm avant le point, et 5 mm après. Cela s'explique avec l'emplacement du mètre qui était légèrement décalé du point le plus loin et plus proche de l'objet virtuel, et avec le fait que l'objet est virtuel, nous n'avons aucune certitude sur l'emplacement exact de l'objet.

### 3.3.2. Comparaison des mesures expérimentales et de la modélisation

Nous devons faire varier le paramètre du délai de perception pour arriver à retrouver plus ou moins nos valeurs extrêmes (lorsque le pendule est le plus proche de nous, et lorsqu'il est le plus loin) sur le graphique affiché par le tableur. Nous avons donc fixé les autres paramètres pour pouvoir faire la manipulation.

T	0,76	s
x	210	mm
GD	61	mm
DELTA	1005	mm

Tableau 1: Paramètres fixés pour la manipulation

Il ne nous restait plus qu'à rentrer un délai de perception et voir si nous pouvions retrouver nos valeurs maximales pour confirmer notre modèle.

Nous avons pu retrouver assez fidèlement nos valeurs à quelques incertitudes près. Donc malgré les importantes incertitudes que nous avons énoncées précédemment, les résultats expérimentaux correspondent à notre modèle mathématique. Nous pouvons alors valider le modèle que nous avons défini.

### 3.3.3. Étude du délai de perception.

Nous voulions ensuite nous intéresser de plus près au délai de perception de l'œil obscurci par nos deux polariseurs, une donnée que nous ne maîtrisons pas pour le moment. Cependant, avec les mesures que nous avons effectuées, nous avons tenté de déterminer le délai de perception, dans chacun de nos cas.

Nous avons donc isolé le degré de perception de nos équations paramétriques. Nous avons obtenu :

$$\tau = \frac{-T}{2\pi} \cdot \arccos\left(\frac{y(GD - xg) - xg\Delta}{X(y - \Delta)}\right) + t$$

Sachant que nous avons les extremums de chaque ellipse, soit quand  $x=0$ , nous pouvons les remplacer dans notre équation précédente. De plus, comme nous avons atténué la lumière arrivant sur l'œil droit, nous avons l'impression que le pendule tourne dans le sens trigonométrique, c'est-à-dire que le pendule semble passer d'abord devant, puis derrière avant de revenir au point de départ. Cela signifie que le pendule passe au plus près de nous à un quart de la période. Le temps pour la valeur négative est donc un quart de la période, soit  $t = 0,19$  s. Il faut également attribuer la valeur de  $x_G$  correspondant au temps précédent.

Pour l'autre mesure, nous procédons de la même façon. Le temps auquel le pendule semble atteindre son point le plus éloigné est au bout de trois quarts de période, autrement dit un quart de période dans l'autre sens soit  $t = -0,19$  s. Comme le mouvement est périodique, nous pouvons prendre le  $x_G$  correspondant au trois quarts de période, soit à  $t = 0,57$  s. Cependant, comme nous étudions le mouvement à  $t = -0,19$  s, il faut prendre l'opposé du résultat obtenu pour retrouver le délai de perception.

Pour les différentes valeurs que nous avons relevées, nous trouvons les résultats présentés dans le tableau 2.

Angle degré	Décalage arrière (en mm)	Décalage avant (en mm)	Délai de perception 2 (en s)	Délai de perception 1 (en s)	Moyenne des deux délais
0	17	-30	0,00060456	0,00101843	0,000811495
20	29	-48	0,00104399	0,00160166	0,001322825
50	42	-51	0,00153242	0,00169693	0,001614675
70	65	-72	0,00242974	0,00234903	0,002389385

Tableau 2: Résultats de l'expérience

Nous pouvons voir que les deux valeurs de délais de perception sont très proches lorsque l'obscurité est assez importante, alors qu'elles sont plus éloignées lorsque l'obscurité est moindre. En effet, l'effet est moins prononcé lorsque la différence de luminosité reçue par les deux yeux est faible. Cela expliquerait ces écarts importants.

Avec ce tableau, nous pourrions tracer le délai de perception en fonction de l'angle d'inclinaison de l'axe des deux polariseurs. Cependant, nous voulions étudier la relation de celui-ci avec le degré d'obscurité de l'œil concerné.

Grâce à la loi de Malus, que nous avons vérifiée plus tôt avec notre système, nous pouvons mettre en relation l'angle d'inclinaison d'un polariseur par rapport à l'autre avec le degré d'atténuation de la lumière.

Pour la loi de Malus, nous avons préféré utiliser l'atténuation de la lumière, plutôt que les valeurs de l'intensité directement. L'atténuation de la lumière correspond au rapport entre la valeur de l'éclairement avec un certain angle et l'éclairement lorsque les axes sont parallèles. Nous avons fait ce choix car les deux polariseurs, ensemble et avec leur axe parallèle, filtrent déjà une partie de la lumière. Nous avons donc mesuré la lumière sans aucun polariseur, puis avec les deux alignés. Nous avons ensuite fait le rapport de ces deux intensités. Ce coefficient devra être multiplié à toutes les atténuations, calculées grâce à l'éclairement théorique suivant les variations d'angle.

Ce système était plus simple pour déterminer l'atténuation en fonction de l'angle que forme les deux axes des polariseurs.

Grâce à cela, nous pouvons reporter les valeurs d'atténuation correspondant aux angles que nous avons fait au moment de la manipulation avec le pendule et les polariseurs. Nous pouvons ajouter le point de coordonnées (0;1) car, quand aucun polariseur n'est présent, le rapport est la valeur maximale mesurée (celle de la lumière non-voilée), ce qui donne 1. Nous traçons alors le délai de perception en fonction de l'atténuation, puis nous pouvons afficher une courbe de tendance.

La courbe est de forme exponentielle, comme le montre la figure 2.

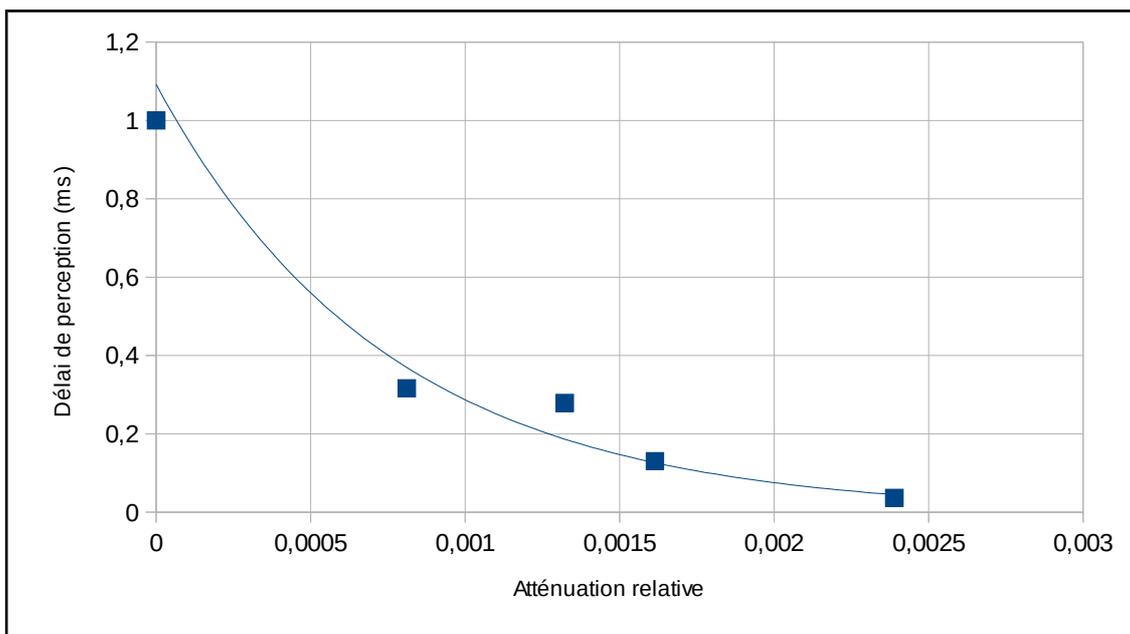


Figure 2: Graphique représentant le délai de perception en fonction de l'atténuation

Afin de voir si nos résultats sont cohérents, nous avons trouvé dans nos recherches documentaires une étude faite par Alfred LIT<sup>[2]</sup> qui date de 1949. Nous pouvons noter qu'une partie est consacrée à l'étude du délai de perception du cerveau humain en relation avec le degré d'obscurité ou encore l'atténuation de la lumière. Leurs manipulations sont donc beaucoup plus précises. Néanmoins, nous pouvons voir que nos résultats sont très similaires aux leurs : l'ordre de grandeur des valeurs du délai de perception est de l'ordre du milliseconde dans les deux cas, et les courbes ont une allure identique.

Nous pouvons donc, dans une certaine mesure, valider nos résultats.

### 3.4. Étude de la sensibilité des paramètres

Pour finir notre étude, il nous a paru intéressant d'étudier la sensibilité des différents paramètres rentrant en compte dans le modèle mathématique que nous avons mis en place. Nous cherchons ainsi à montrer que le décalage entre certaines valeurs obtenues par l'expérience et les valeurs attendues grâce à la modélisation mathématique est dû aux imprécisions que nous avons faites lors de l'expérience. Ces imprécisions ont plus ou moins d'impact sur les résultats, cela dépend de la sensibilité des paramètres qui rentrent en compte dans le calcul.

#### 3.4.1. Étude de la sensibilité de la distance $GD$

Dans un premier temps, il nous a paru intéressant d'étudier l'impact d'une variation de la distance entre l'œil gauche et l'œil droit sur le résultat de notre modélisation.

En effet, il est difficile de mesurer et encore moins d'être précis lors de la mesure de l'écartement des deux yeux. C'est pourquoi, pour tous nos calculs, nous avons pris une valeur moyenne,  $GD = 61 \text{ mm}^{[3]}$ . C'est une valeur moyenne que nous avons trouvée en nous documentant.

Cependant, nous avons été deux à relever les deux valeurs d'ordonnée pour  $x = 0$ . Nous n'avons pas exactement le même écartement entre les deux yeux et il ne correspond pas forcément à la valeur moyenne. Nous allons donc étudier si l'incertitude sur ce paramètre peut en partie être à l'origine de certaines de nos incertitudes.

Pour cela, nous avons fixé tous les paramètres sauf  $GD$  que nous avons fait varier :

T	10	s
x	200	mm
DELTA	1000	mm
Délai de perception	0,02	s

Tableau 3: Paramètres fixés pour l'étude de l'influence de GD sur l'équation

Ensuite, nous avons fait varier la distance GD autour de sa valeur moyenne. Nous avons pris :

- GD = 58 mm.
- GD = 61 mm.
- GD = 63 mm.

Avec ces paramètres, nous obtenons trois trajectoires de l'objet virtuel différentes.

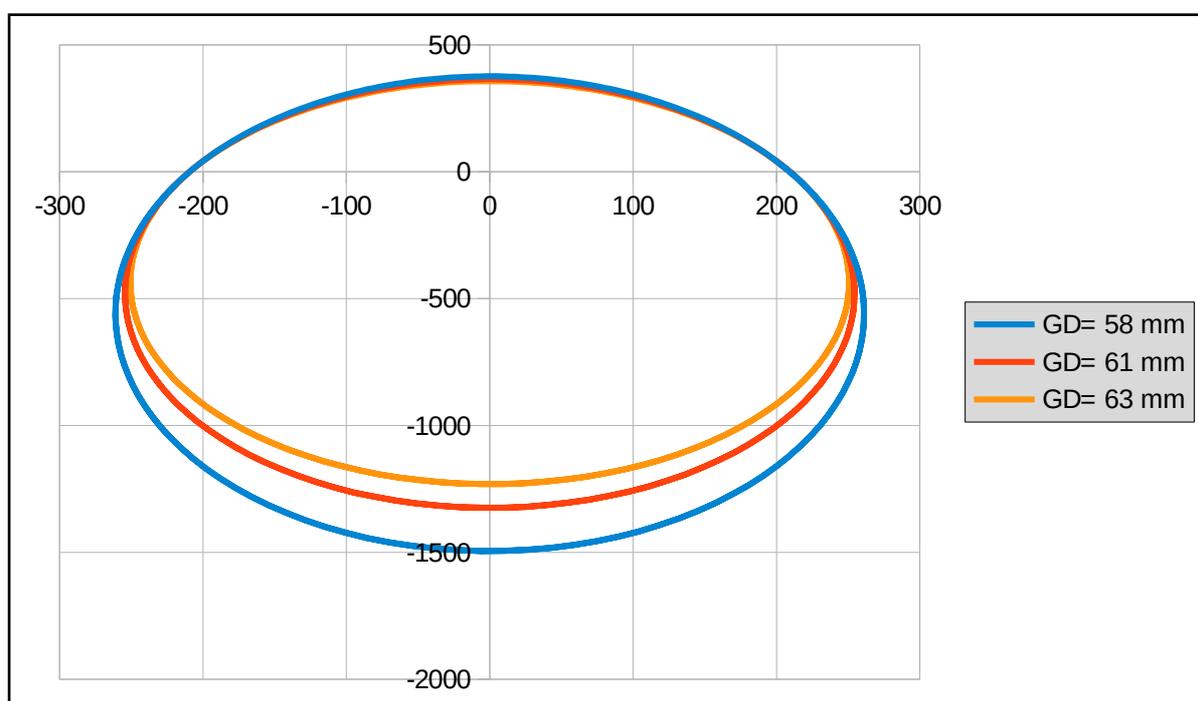


Figure 3: Graphique représentant la trajectoire de l'objet virtuel avec une variation du paramètre GD

Grâce au graphique, on s'aperçoit nettement que la distance entre les deux yeux a une forte influence sur la largeur de l'ellipse. Plus la distance GD est petite plus l'ellipse est large. En effet, plus la distance GD est petite, plus le point virtuel, intersection de ce que voit l'œil droit et l'œil gauche, est grande, ce qui augmente la largeur de l'ellipse.

### 3.4.2. Influence sur la position de l'image virtuelle

A partir d'un relevé de mesure sur le graphique, nous avons constaté qu'une variation de 8 % de la distance GD entraîne une variation de 8,3 % et 7,4 % de la position avant et arrière de l'objet virtuel. On note qu'il y a presque les mêmes incertitudes sur l'image virtuelle avant et arrière.

Ces variations sont non négligeables, d'autant plus que nous ne sommes pas précis dans son estimation. La distance GD est donc un paramètre sensible de notre étude. Il est très probablement en partie à l'origine des incertitudes que nous observons.

Pour l'étude de l'influence des autres paramètres dans notre modèle, voir l'annexe 2.

## 4. MIRASCOPE

Le mirascope est composé de deux miroirs paraboliques. L'illusion d'optique repose sur l'apparition d'un objet à la surface du miroir supérieur alors qu'il est posé sur le miroir inférieur. L'objet semble « flotter » au dessus des miroirs.



Illustration 6: Mirascope fermé

Illustration 7: Mirascope ouvert

Notre objectif est de savoir pourquoi nous visualisons un objet à la surface du miroir supérieur. Pour cela nous avons besoin dans un premier temps de déterminer la distance focale des miroirs pour ensuite comprendre comment l'image est construite grâce au trajet des rayons. Nous avons ensuite tenté de reproduire cet effet avec d'autres miroirs plus grands.

### 4.1. Détermination de la distance focale des miroirs concaves par leur forme parabolique

Pour être capable de déterminer la distance focale des miroirs, il nous faut dans un premier temps connaître leur forme.

#### Le miroir du dessous

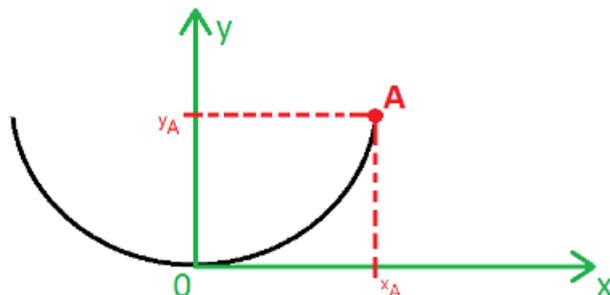


Illustration 8: Schéma explicatif de la méthode de calcul de l'équation du miroir inférieur

Nous savons que l'équation d'une parabole est  $y = ax^2$ .

Or, comme nous pouvons le voir sur l'illustration 8, nous pouvons assimiler la surface du miroir à une parabole. Nous cherchons donc à déterminer la constante  $a$ , pour ensuite connaître la forme du miroir.

Pour cela, on mesure l'abscisse et l'ordonnée d'un point  $A$  en utilisant le même repère que le schéma. Les mesures sont effectuées à la règle sur le miroir. De plus,  $y_A$  correspond à sa hauteur. Il

suffit donc de mesurer la hauteur du miroir pour obtenir l'ordonnée de A. Quant à son abscisse  $x_A$ , elle correspond à la moitié du diamètre du miroir.

Ainsi on connaît  $x_A$  et  $y_A$  et on sait que  $y_A = ax_A^2$ .

On en déduit donc  $a = y_A / x_A^2$ .

On ne prend qu'un seul point car les autres sont difficiles à mesurer.

#### Résultats :

Les mesures sont simples à réaliser mais peuvent être imprécises. Pour être sûrs d'obtenir le résultat le plus juste, nous avons répété les mesures plusieurs fois et ensuite fait la moyenne. Nous avons obtenu les résultats suivants :

$$y_A = 2,52 \text{ cm}$$

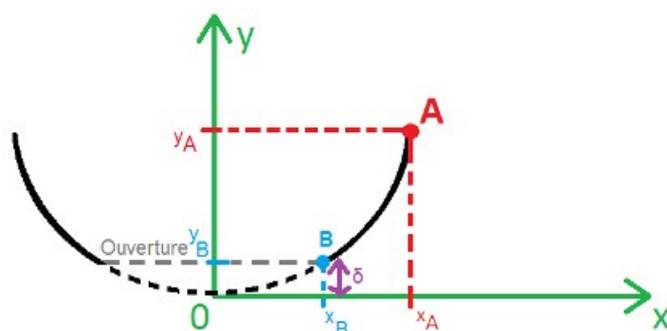
$$\text{Diamètre} = 14,10 \text{ cm}$$

$$\text{Donc } x_A = 7,05 \text{ cm}$$

$$\text{On obtient } a = \frac{2,52}{7,05^2}$$

$$a = 0,05 \text{ cm}^{-1}$$

#### Le miroir du dessus



*Illustration 9: Schéma explicatif de la méthode de calcul de l'équation du miroir supérieur*

Pour ce second miroir, l'équation reste celle d'une parabole d'équation  $y = ax^2$ .

Le miroir supérieur est troué. Cette fois-ci nous avons trouvé la position de deux points différents. Pour trouver  $a$ , on mesure l'abscisse et l'ordonnée des points A et B en utilisant le même repère que sur l'illustration 9. Les mesures sont toujours effectuées à la règle. De plus,  $y_A$  correspond à la hauteur du miroir. Il suffit donc de mesurer la hauteur du miroir pour obtenir l'ordonnée de A. Cependant, à cause du trou, on doit y ajouter la hauteur  $\delta$ . Quant à son abscisse,  $x_A$ , elle correspond au rayon du miroir. On utilise la même technique pour l'abscisse de B, mais en utilisant le diamètre de l'ouverture.

La distance  $\delta$  est inconnue à cause du trou présent à la base du miroir. Par conséquent, en mesurant deux points, on obtient un système à deux équations et deux inconnues.

#### Résultats :

Nous avons procédé de la même façon que l'autre miroir pour obtenir des mesures plus précises. On obtient les résultats suivants :

$$y_A - \delta = 2,52 \text{ cm}$$

$$\text{Diamètre du miroir} = 13,90 \text{ cm}$$

Donc  $x_A = 6,95 \text{ cm}$

Diamètre de l'ouverture = 2,65 cm

Donc  $x_B = 1,33 \text{ cm}$

On obtient le système :  $\{ y_A = 2,52 + \delta = ax_A^2$

$$\{ y_B = \delta = ax_B$$

Ce qui donne  $\delta = 0,0665 \text{ cm}$

$$a = 0,05 \text{ cm}^{-1}$$

On peut donc conclure que d'après nos mesures les deux miroirs ont la même forme. Ils auront donc la même distance focale.

La distance focale d'un miroir sphérique est donnée par la formule  $f = \frac{1}{4a}$ .

On obtient donc pour les deux miroirs :  $f = \frac{1}{4a} = \frac{1}{4 \times 0,05} = 5 \text{ cm}$

Ces mesures ont été faites à la règle, on peut donc dire qu'elles ne sont pas très précises. Il faut rester critique face à ces résultats.

Pour vérifier notre résultat, nous avons aussi déterminé cette distance focale de façon expérimentale.

#### 4.2. Mesure directe de la distance focale

Pour obtenir une valeur expérimentale plus précise de la distance focale, nous avons réalisé deux expériences différentes pour obtenir de meilleurs résultats.

##### Manipulation 1 :

L'objectif de cette manipulation est de déterminer la distance focale de manière expérimentale. Cette première méthode consiste à mesurer la distance entre le centre du miroir et l'image lorsque celle-ci est inversée et de même taille que l'objet.

Le protocole de l'expérience est détaillé en annexe 3.

##### Résultats :

Pour déterminer la distance focale on utilise la relation de conjugaison et la formule du grandissement transversal.

$$\text{Relation de conjugaison : } \frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{1}{f} \quad \text{Grandissement : } \gamma = \frac{-\overline{SA'}}{\overline{SA}}$$

A partir de ces deux formules on obtient la suivante :

$$f = \frac{\overline{SA'}}{1 - \gamma} \quad \text{Ici } \gamma = -1$$

Nous obtenons les résultats suivants :

	Miroir Inférieur		Miroir Supérieur	
	SA'-	SA'+	SA'-	SA'+
1 <sup>er</sup> manip	81mm	88mm	95mm	103mm
2 <sup>ème</sup> manip	89mm	98mm	99mm	105mm
f	44,5mm		50,25mm	

Tableau 4 : Résultats : mesure de distance focale

La valeur issue de la forme parabolique de  $f$  est 50 mm pour les deux miroirs car normalement, d'après nos mesures, ils sont identiques. Cependant avec cette expérience on obtient deux valeurs différentes.

Nous avons donc décidé de trouver une autre méthode pour vérifier nos résultats.

### Manipulation 2 :

Le montage est le même que pour l'expérience précédente, seul le principe change. On cherche maintenant à avoir une image nette, quelque soit la taille. ( Voir protocole en annexe 3)

### Exploitation des résultats :

On utilise à nouveau la relation de conjugaison :  $\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{1}{f}$

Pour faciliter nos mesures, on a mesuré  $\overline{AA'}$  et ensuite calculé  $\overline{SA'}$  grâce à la relation :  $\overline{SA'} = \overline{SA} + \overline{AA'}$

Pour chaque valeur  $\overline{SA}$ , nous avons mesuré six fois  $\overline{AA'}$  car il est très subjectif de savoir quand l'image est nette. Trois personnes ont réalisé ces mesures pour tenter d'être le plus précis possible.

Les valeurs de  $\overline{SA'}$  dans le tableau 5 sont les valeurs moyennes des multiples observations.

	Miroir Inférieur		Miroir Supérieur	
	$\overline{SA}$	$\overline{SA'}$	$\overline{SA}$	$\overline{SA'}$
1 <sup>er</sup> manip	86,82 mm	6,06 mm	86,82 mm	6,36 mm
2 <sup>ème</sup> manip	66,82 mm	6,23 mm	66,82 mm	6,578 mm
3 <sup>ème</sup> manip	56,82 mm	6,153 mm	56,82 mm	6,703 mm
4 <sup>ème</sup> manip	46,82 mm	6,324 mm	46,82 mm	6,92 mm
5 <sup>ème</sup> manip	36,82 mm	6,4783 mm	36,82 mm	7,036 mm
f	55,97 mm		59,76 mm	

Tableau 5: Résultats : mesure de distance focale

Ces valeurs sont encore une fois différentes pour les deux miroirs et différentes de la valeur théorique.

Les résultats expérimentaux obtenus par les deux méthodes différentes présentent presque 1 cm d'écart, ce qui représente 20 % de différence entre les valeurs obtenues. On peut donc conclure que les méthodes mises en œuvre sont imprécises. Cela s'explique en parti par le côté subjectif des mesures. Il n'est pas facile de savoir si une image est nette ou non.

Nous avons considéré pour la suite que les miroirs sont différents. Le premier miroir, c'est à dire celui du haut, a une distance focale  $f_1 = -60$  mm et le deuxième, celui du bas, a une distance focale  $f_2 = 56$  mm.

### 4.3. Trajet des rayons

#### Image de l'objet

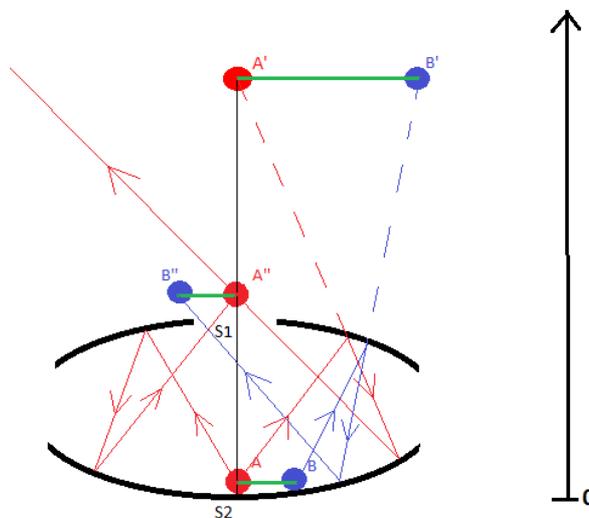


Illustration 10: Trajet des rayons

Pour trouver où se situe l'image de l'objet, on se sert de la relation de conjugaison :  $\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{1}{f}$

$$\rightarrow \overline{SA'} = \frac{f \cdot \overline{SA}}{\overline{SA} - f}$$

D'après l'expérience précédente, on a mesuré  $f_1 = -60$  mm.

De plus,  $\overline{S_1A} = -50,86$  mm.

$$\text{Donc } \overline{S_1A'} = \frac{f_1 \cdot \overline{S_1A}}{\overline{S_1A} - f_1} = \frac{-60 \times -50,86}{-50,86 + 60} = 333,87 \text{ mm.}$$

On a mesuré dans l'expérience précédente  $f_2 = 56$  mm.

De plus,  $\overline{S_2A'} = \overline{S_2S_1} + \overline{S_1A'} = 52,86 + 333,87 = 384,73$  mm.

$$\text{D'où } \overline{S_2A''} = \frac{f_2 \cdot \overline{S_2A'}}{\overline{S_2A'} - f_2} = \frac{56 \times 384,7331}{384,7331 + 56} = 65,53 \text{ mm.}$$

On trouve donc que l'image est légèrement au dessus du mirascope, ce qui correspond à nos observations expérimentales.

#### Grandissement

On connaît la relation  $Y = \frac{-\overline{SA'}}{\overline{SA}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

$$\text{On en déduit donc } \gamma_1 = \frac{-\overline{S_1A'}}{\overline{S_1A}} = \frac{-333,87}{-50,86} = 6,56.$$

Donc  $\overline{A'B'} = \gamma_1 \cdot \overline{AB} = 6,56 \times 10 = 65,64$  mm.

On procède de même pour le second miroir :  $\gamma_2 = \frac{-S_2 A'''}{S_2 A'} = \frac{-65,53}{384,73} = -0,17$ .

D'où  $\overline{A'''B'''} = \gamma_2 \cdot \overline{A'B'} = -0,17 \times 65,64 = -11,18 \text{ mm}$ .

Finalement, on a un grandissement de  $\gamma_T = \frac{\overline{A'''B'''}}{\overline{AB}} = \frac{-11,18}{10} = -1,12$ .

Cela correspond à nos observations : l'objet est inversé et sa taille est quasiment conservée.

#### 4.4. Limites

Nous avons ensuite décidé de nous intéresser aux limites d'un tel dispositif. Pour se faire, nous considérons un objet vertical AB, posé dans le mirascope, les points A et B étant les extrémités de cet objet. Le point A est le point le plus bas de l'objet (comme sur le schéma précédent) et le point B le point le plus haut. Ainsi la longueur  $\overline{AB}$  représente la hauteur de l'objet.

Pour pouvoir traiter tous les cas possibles et trouver des limites, nous prenons la valeur x pour la longueur  $\overline{AB}$ .

Nous avons utilisé un tableur pour calculer d'abord la longueur  $\overline{S_2 A'''}$  en fonction de x. Dès lors nous avons pu trouver une limite puisque nous avons remarqué qu'à partir d'un objet de 47mm de haut, la distance  $\overline{S_2 A'''}$  devenait négative. Cela signifie que l'image n'est plus visible au dessus du mirascope.

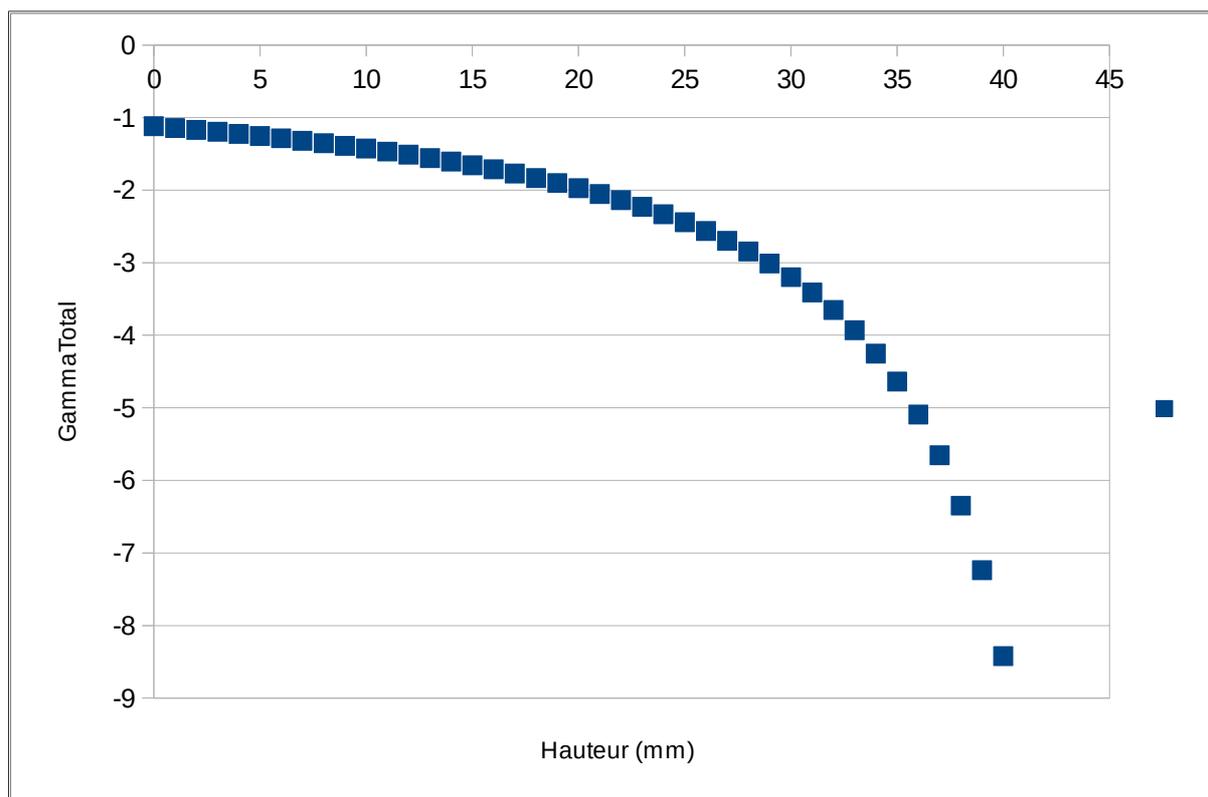


Figure 4: Agrandissement en fonction de la hauteur de l'objet

Ensuite, nous avons utilisé ces résultats pour calculer le grandissement total et avons pu tracer un graphique illustrant l'évolution du grandissement en fonction de x.

Comme nous pouvons le constater, le grandissement est très proche de -1 pour des objets de petite taille mais diminue ensuite de manière exponentielle.

Nous avons choisi d'établir que ce phénomène pouvait garder son titre d'illusion d'optique seulement jusqu'à un grandissement de  $-1,5$ . En effet, nous avons convenu qu'au-delà de cette limite, l'image perçue était beaucoup trop déformée et ne se rapprochait plus suffisamment de l'objet réel pour qu'on ait la sensation de voir l'objet au-dessus du mirascope.

Grâce au tableur, nous avons pu constater qu'un grandissement de  $-1,5$  était obtenu à partir d'une hauteur d'objet de 12mm. C'est donc la limite théorique que nous avons établis.

Expérimentalement, nous avons voulu vérifier ce résultat en faisant entrer une règle graduée dans le mirascope. Petit à petit, nous enfoncions la règle dans le mirascope par le biais d'un petit trou fait dans le miroir du bas. Nous avons ainsi pu mesurer la longueur de la règle entrée lorsqu'il nous semblait avoir atteint la limite de l'illusion. Après avoir fait la moyenne de plusieurs mesures effectuées par plusieurs élèves du groupe, nous avons pu définir la limite de hauteur de l'objet à 17mm.

Cette différence de 5mm entre le résultat expérimental et théorique s'explique facilement par le côté subjectif de la mesure sur la longueur maximale observée. En effet, nous n'avons pas tous la même notion de « limite d'une illusion ». De plus, la limite théorique que nous avons fixé à  $-1,5$  est elle même très subjective et possiblement légèrement différente de la valeur réelle.

#### 4.5. Mirascope géant



*Illustration 11: Mirascope géant*

Après avoir compris le fonctionnement du mirascope ; nous avons essayé de recréer cet effet avec d'autres miroirs plus grands.

On observe bien sur le miroir, l'image de la lampe qui s'est réfléchi sur les deux miroirs successivement.

Le principe du mirascope géant est le même que le simple mirascope mais avec des miroirs beaucoup plus grands. Leur distance focale est de 45cm chacun, donc environ 7 fois plus grande que

pour les miroirs étudiés précédemment. Le miroir supérieur n'est pas percé, il faut donc décaler les deux miroirs pour pouvoir recréer l'illusion d'optique.

Dans un premier temps nous avons établi les relations de conjugaison pour les deux miroirs puis nous avons cherché quels paramètres d'entrée nous permettent d'obtenir une image de même taille que l'objet.

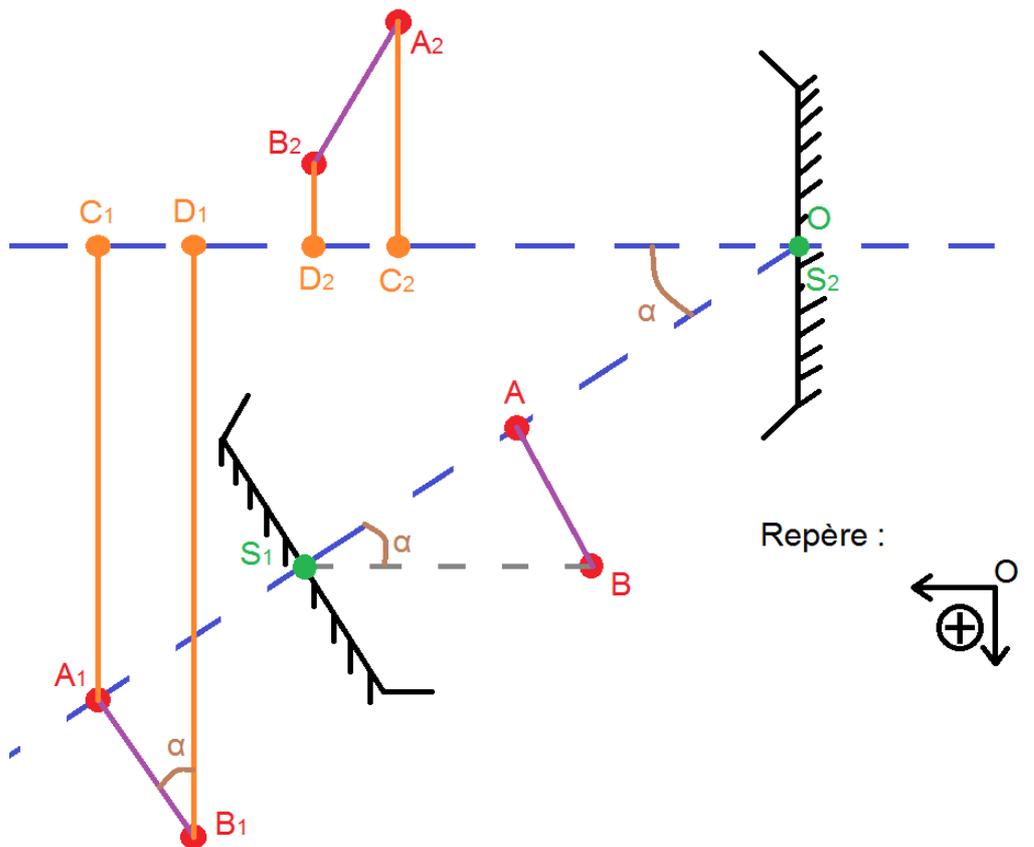


Illustration 12: Schéma explicatif de la détermination de l'emplacement de l'image

#### Miroir 1 :

$$\text{Relation de conjugaison : } \frac{1}{\overline{S1A1}} + \frac{1}{\overline{S1A}} = \frac{1}{f1}$$

Avec la relation de conjugaison, on cherche à déterminer la distance  $\overline{S1A1}$  distance entre le centre du premier miroir S1 et l'image du point A pour ensuite en déduire la taille de l'image objet,  $\overline{A1B1}$ .

$$\text{On obtient donc : } \overline{S1A1} = \frac{f1 \cdot d}{d - f1}$$

On connaît donc la distance entre le miroir 1 et l'image du point A.

Le grandissement,  $\gamma_1 = \frac{-\overline{S1A1}}{\overline{S1A}}$ , permet d'obtenir la taille de l'image par le premier miroir :

$$\overline{A1B1} = \gamma_1 \cdot \overline{AB} \quad \text{avec } \overline{AB} \text{ la taille de l'objet.}$$

#### Miroir 2 :

Maintenant que l'on connaît la position de l'image de l'objet AB par le miroir 1, l'image A1B1 devient l'objet. On cherche donc à déterminer l'image de l'objet A1B1 par le miroir 2.

Comme on peut le voir sur le schéma précédent, les points A1, B1, A2 et B2 ne sont pas sur l'axe optique du deuxième miroir, on ne peut donc pas appliquer directement la relation de conjugaison pour déterminer leur position. Il faut donc créer les points C1, D1, C2 et D2, les projetés orthogonaux des points sur l'axe optique du miroir 2. C1 est le projeté orthogonal du point A1 et D1 celui de B1.

$$\overline{CIA1} = \sin \alpha \cdot \overline{OA1} \quad \text{et} \quad \overline{DIB1} = \sin \alpha \cdot \overline{AIB1}$$

On peut donc appliquer la relation de conjugaison pour les points C2 et D2 :

Soit  $f_2 = 45\text{cm}$ , la distance focale du miroir 2.

$$\overline{S2C2} = \frac{f_2 \cdot \overline{S2C1}}{\overline{S2C1} - f_2} \quad \text{et} \quad \overline{S2D2} = \frac{f_2 \cdot \overline{S2D1}}{\overline{S2D1} - f_2}$$

Avec le théorème de Pythagore, on peut trouver la taille de l'objet A2B2 :

$$\overline{A2B2} = \sqrt{\overline{C2D2}^2 + (\overline{B2D2} - \overline{A2C2})^2}$$

Les distances  $\overline{A2C2}$  sont déterminées avec le théorème de Pythagore et l'angle  $\alpha$ . Mais la distance  $\overline{C2D2}$ ,  $\overline{B2D2}$  est calculée avec le grandissement.

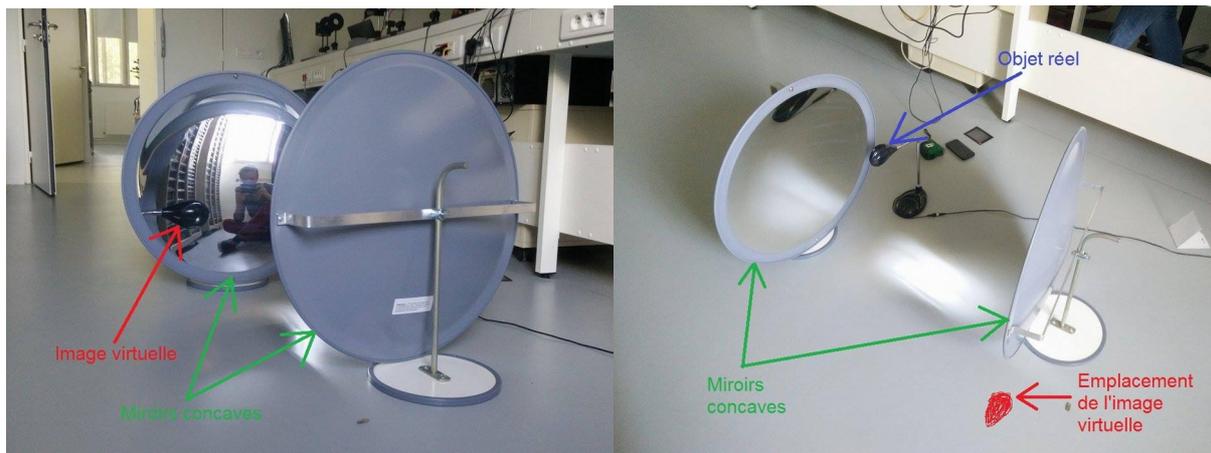
La taille de l'objet après avoir été réfléchi sur les deux miroirs dépend de plusieurs paramètres : de la taille de l'objet, AB, de la distance entre les miroirs, S1S2, de la distance entre l'objet et le premier miroir, S1A et de l'angle entre les miroirs,  $\alpha$ .

Grâce aux relations précédentes nous avons cherché à modifier ces paramètres pour trouver des configurations qui permettent d'obtenir une image en sortie de même taille et inversée. Cependant, quelque soit la configuration, on obtient toujours un grandissement total,  $\gamma_{tot} = \frac{\overline{A2B2}}{\overline{AB}}$ , qui est positif. Cela s'explique par notre choix de référentiel. Même si l'image est inversée, la valeur de  $\overline{AB}$  est positive. Pour remédier à cela, il aurait fallu travailler avec des grandeurs vectorielles. On peut l'observer sur le schéma du montage, la composante selon la verticale ne change pas de signe mais la composante horizontale change de sens. C'est ce changement qui crée l'inversion de l'image.

Nous avons ensuite testé quelques montages expérimentalement pour tenter de recréer un mirascope géant. Nous avons réussi à obtenir deux configurations :

$\overline{AB}$ (cm)	14	14
$\alpha$ (deg)	70	75
$\overline{S1S2}$ (cm)	86	81
$\overline{S1A}$ (cm)	59	59

Tableau 6: Configurations de mirascope géant

**Montage :**

*Illustration 14: Image virtuelle créée par le mirascope géant*      *Illustration 13: Vue du dessus du mirascope géant avec emplacement de l'image virtuelle*

Il est donc possible de créer un mirascope géant. Cependant, comme les miroirs ne sont pas percés, il faut les décaler. L'illusion d'optique est donc moins impressionnante car on a moins l'impression de voir un objet qui « flotte » au dessus des miroirs.

Pour améliorer le dispositif géant, il faudrait pouvoir percer un miroir et ensuite trouver des miroirs qui puissent être rapprochés le plus possible (comme le petit mirascope) pour créer une véritable illusion d'optique.

#### 4.6. Conclusion

En conclusion, nous avons pu étudier deux types de mirascope différents au fonctionnement pourtant similaire. Nous avons appris à comprendre leur fonctionnement et à modéliser l'illusion optique créée par un mirascope de n'importe quelle taille, n'importe quelle distance focale et dans n'importe quelle configuration.

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion, ce projet nous a permis de comprendre le fonctionnement de deux illusions d'optique très différentes. Le mirascope faisant partie de la catégorie des illusions d'optique dues à un phénomène physique et l'effet Pulfrich de la catégorie des illusions d'optique causées par un problème de traitement de l'information par le cerveau. Nous avons pris conscience que notre perception visuelle peut facilement être trompée et qu'il ne vaut donc mieux pas toujours croire ce que l'on voit. Il vaut mieux justement se méfier des apparences.

Nous avons dû apprendre à travailler en équipe, voire même en sous-équipes puisque nous nous sommes séparés en deux groupes, un pour chaque illusion d'optique. En revanche, cela ne nous a pas empêchés de suivre l'avancée de l'autre groupe.

Nous avons aussi pris conscience de l'importance de mettre en place un planning à respecter afin de nous fixer des objectifs concrets et à respecter à chaque séance, mais aussi afin de nous rendre compte de l'avancée ou du potentiel retard du projet.

Expérimentalement, ce fut aussi très enrichissant. Nous étions autonomes, donc libres dans le choix des méthodes et des expériences. Ainsi, nous avons vite compris que ceci représente beaucoup de calculs préliminaires mais surtout de rigueur.

Nous avons dû aussi faire face aux difficultés liées à la subjectivité des mesures. En effet, mesurer l'effet de profondeur créé par l'effet Pulfrich ou encore la taille de l'image renvoyée par le mirascope n'est pas facile. Ceci créant une grande source d'incertitude sur nos mesures, il a été difficile de faire le lien entre théorie et pratique, nous obligeant à refaire les manipulations de nombreuses fois avant de trouver un résultat cohérent.

Cet E.C. nous aura permis d'apprendre à travailler à plusieurs sur un projet de longue durée. Nous avons donc appris à communiquer efficacement entre nous pour partager nos résultats ou mettre en place ensemble l'organisation de notre travail. C'est-à-dire mettre en place le planning mais aussi définir à l'avance les protocoles des différentes manipulations.

Concernant les perspectives pour la poursuite de ce projet, celles-ci sont très nombreuses. Pour le mirascope par exemple, il est possible d'utiliser nos résultats pour les adapter à tout types de mirascopes, troués ou non et de n'importe quelle taille. Ainsi il serait possible de trouver les dimensions et l'emplacement d'une image virtuelle créée par un mirascope en ne connaissant que les caractéristiques des miroirs, et ce en quelques instants grâce au fichier de calcul que nous avons créé. Mais aussi inversement, il serait possible à l'aide de ce même outil de trouver le montage le plus adapté (taille des miroirs, distance focale, distance entre les miroirs, troués ou non) pour créer une image virtuelle d'une taille souhaitée à un emplacement voulu. Pour voir encore plus loin, on pourrait imaginer un dispositif faisant osciller un mirascope afin de mêler les deux illusions étudiées.

Mais l'énoncé initial de notre projet étant « Encore d'autres illusions d'optique », on pourrait aussi s'intéresser à beaucoup d'autres illusions d'optique, car celles-ci sont très nombreuses et variées. On pourrait par exemple étudier les illusions artistiques, les illusions géométriques, les illusions liées à un changement de milieu (comme les mirages), les stéréogrammes ou encore la strioscopie.

## 6. ANNEXES

### 6.1. Index des illustrations

#### Index des illustrations

Illustration 1: Schématisation de la triangulation à l'origine de l'effet Pulfrich.....	8
Illustration 2: Premier essai de pendule.....	11
Illustration 3: Pendule définitif.....	11
Illustration 4: Système de polariseur.....	12
Illustration 5: Montage pour la visualisation de l'effet Pulfrich.....	13
Illustration 6: Mirascope fermé.....	20
Illustration 7: Mirascope ouvert.....	20
Illustration 8: Schéma explicatif de la méthode de calcul de l'équation du miroir inférieur.....	21
Illustration 9: Schéma explicatif de la méthode de calcul de l'équation du miroir supérieur...	22
Illustration 10: Trajet des rayons.....	26
Illustration 11: Mirascope géant.....	29
Illustration 12: Schéma explicatif de la détermination de l'emplacement de l'image.....	30
Illustration 13: Vu du dessus du mirascope géant avec emplacement de l'image virtuelle...	32
Illustration 14: Image virtuelle créée par le mirascope géant.....	32
Illustration 15: Montage pour la détermination de la distance focale.....	44

### 6.2. Index des tableaux

#### Index des tableaux

Tableau 1: Paramètres fixés pour la manipulation.....	12
Tableau 2: Résultats de l'expérience.....	13
Tableau 3: Paramètres fixés pour l'étude de l'influence de GD sur l'équation.....	15
Tableau 4 :Résultats : mesure de distance focale.....	18
Tableau 5: Résultats : mesure de distance focale.....	19
Tableau 6: Configurations de mirascope géant.....	24
Tableau 7: Paramètres fixés pour voir l'influence de la distance oeil-pendule.....	29
Tableau 8: Paramètres fixés pour voir l'influence de la période sur l'équation du mouvement .....	31
Tableau 9: Paramètres fixés pour voir l'influence de l'amplitude X.....	32

### 6.3. Annexe 1 : Vérification de la loi de Malus

Afin de quantifier la variation de l'éclairement reçu par l'oeil avec notre système de polariseurs, nous avons reproduit le montage de la loi de Malus [Référence au TP de P4-2 STPI2]

Voici ci-dessous la liste du matériel nécessaire ainsi que le protocole de la manipulation.

#### Matériel :

- 1 photodiode.
- 1 source lumineuse.
- 1 banc gradué.
- 1 paire de lunettes ou 2 polariseurs dont un pouvant tourner.
- 1 filtre interférentiel de longueur d'onde  $\lambda = 546 \text{ nm}$ .
- 2 lentilles convergentes.
- 1 voltmètre.

#### Protocole :

- Placer la source lumineuse à l'origine du banc.
- A la sortie de la source lumineuse, placer le filtre interférentiel, cela permettant d'avoir une lumière monochromatique.
- Placer une lentille convergente afin de concentrer la lumière.
- Placer le polariseur que nous avons fait.
- Placer la deuxième lentille convergente.
- Placer la photodiode sur le banc, branchée au voltmètre.
- Initialement positionner les deux axes de polariseurs avec un angle de  $0^\circ$ .
- Relever la valeur de la tension indiquée sur le voltmètre.
- Refaire cette manipulation jusqu'à obtenir un angle de  $180^\circ$  entre les deux axes de polariseurs par pas de  $10^\circ$ .

#### Exploitation des résultats :

Après exploitation des résultats, nous obtenons le graphique présenté en figure 5 :

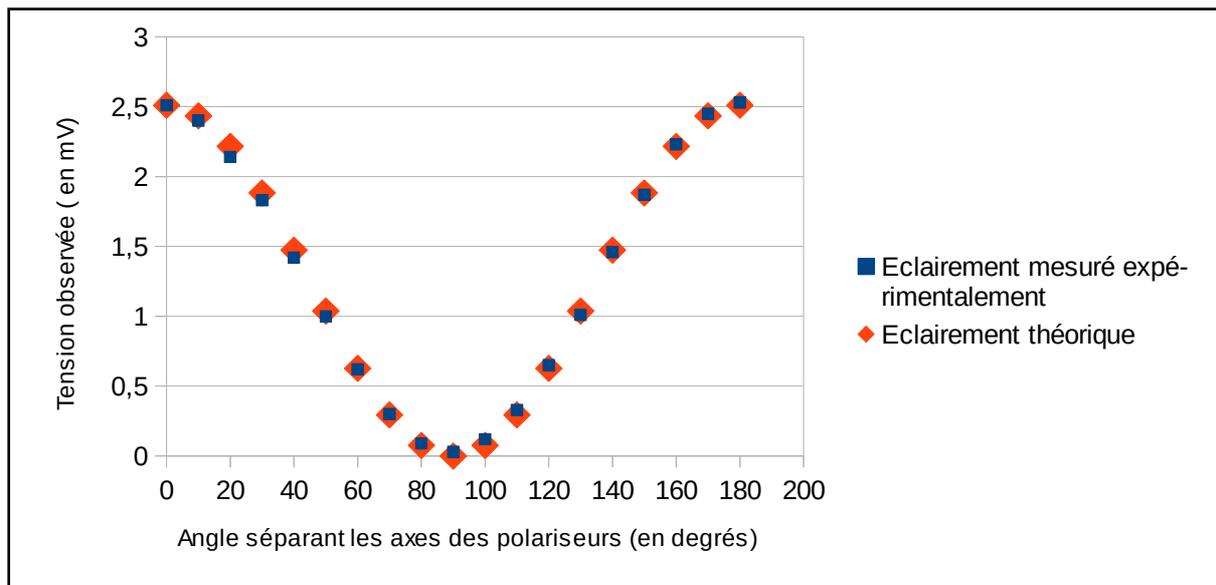


Figure 5: Vérification de la loi de Malus

Les valeurs obtenues expérimentalement sont très proches des valeurs d'éclairement théorique. Nous pouvons donc conclure que la loi de Malus est vérifiée par notre système. Nous pouvons donc l'utiliser pour notre expérience. Cela nous permet de quantifier la différence d'éclairement reçu entre les deux yeux.

#### 6.4. Annexe 2 : Étude de l'influence des autres paramètres de notre équation du mouvement.

##### 2 Étude de la sensibilité de la distance $\Delta$

Dans un second temps, nous avons choisi d'étudier, l'influence de la variation du paramètre  $\Delta$ . Il correspond à la distance entre le pendule et les yeux de l'observateur. C'est un paramètre qui contient également une grande incertitude car nous l'avons mesuré à l'aide d'un mètre lors de la manipulation. Cependant, il est très difficile d'être précis dans la prise de mesure puisque le pendule et les yeux de l'observateur ne sont pas au même niveau. Il est donc important d'évaluer si cette incertitude a un impact important sur le résultat de notre modélisation.

Comme précédemment, nous avons fixé tous les paramètres sauf  $\Delta$  :

T	10	s
x	200	mm
GD	61	mm
Délai de perception	0,2	s

Tableau 7: Paramètres fixés pour voir l'influence de la distance oeil-pendule

Ensuite, nous avons fait varier la distance  $\Delta$ . Nous avons choisi :

- $\Delta = 900\text{mm}$ .
- $\Delta = 1000\text{mm}$ .

- $\Delta = 1100\text{mm}$ .

Avec ces valeurs, nous obtenons les courbes de la figure 6 :

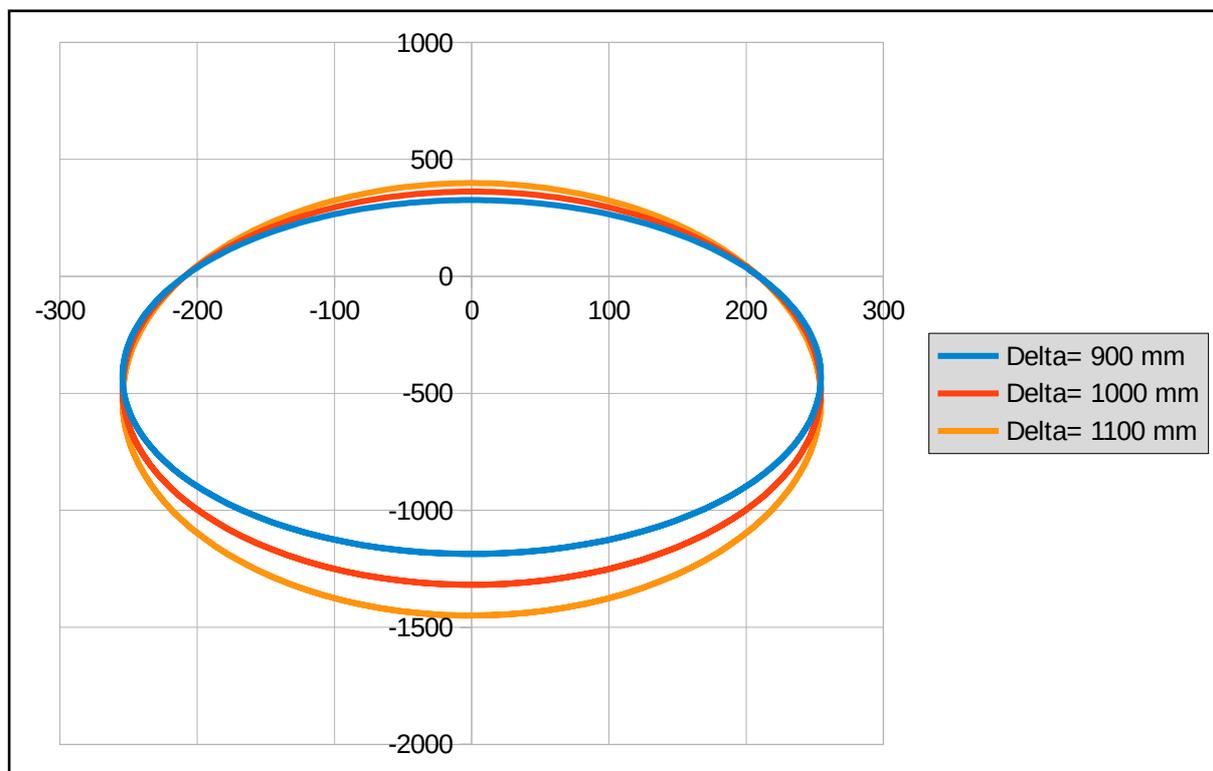


Figure 6: Graphique représentant la trajectoire de l'objet virtuel avec une variation de Delta

A partir du graphique, il apparaît nettement que la variation de la distance  $\Delta$  a une influence significative sur la forme de l'ellipse résultante. Plus la distance entre le pendule et les yeux de l'observateur est grande, plus l'ellipse est large. Cela peut paraître logique car plus la distance séparant nos yeux du pendule est grande, plus la position de l'objet virtuel sera éloigné du pendule lui-même, du à la triangulation entre nos yeux et l'image qu'ils perçoivent. De plus, on s'aperçoit que la distance  $\Delta$  a une influence sur la position de l'image virtuelle aussi bien en avant qu'en arrière du pendule.

#### Influence sur la position de l'image virtuelle :

Grâce au graphique, il apparaît qu'une variation de la distance  $\Delta$  est aussi importante pour l'image virtuelle avant et arrière. En effet, une variation de 18,2 % de  $\Delta$  cause également une variation de 18,2 % de la position. Les deux grandeurs varient donc dans les mêmes proportions.

### 3 Étude de la sensibilité de la période

Ensuite, nous avons décidé d'étudier la sensibilité de la période T. C'est un paramètre sur lequel l'incertitude n'est pas très importante. Cependant, il est tout de même intéressant de savoir si une variation, même faible, de sa valeur peut faire varier de manière significative les résultats de nos calculs.

Afin d'étudier au mieux l'influence de la période, nous avons fixé tous les paramètres sauf  $T$  que nous avons fait varier :

$x$	200	mm
GD	61	mm
DELTA	1000	mm
Délai de perception	0,02	s

Tableau 8: Paramètres fixés pour voir l'influence de la période sur l'équation du mouvement

Nous avons choisi trois valeurs pour la période :

- $T = 9\text{s}$ .
- $T = 10\text{s}$ .
- $T = 11\text{s}$ .

A partir de ces valeurs-ci, nous avons obtenu la figure 7.

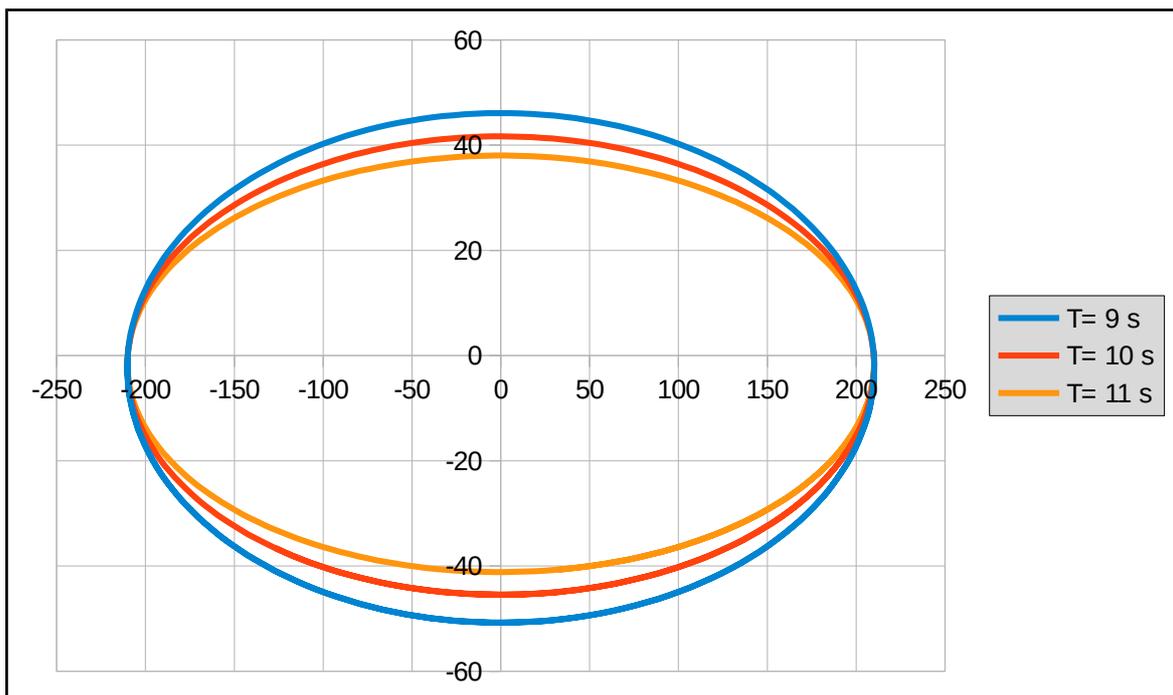


Figure 7: Graphique représentant la trajectoire de l'objet virtuel avec une variation de la période  $T$

A l'aide du graphique, on peut constater que la période a un impact sur la forme de l'ellipse obtenue. En effet, plus la période est petite, plus l'ellipse est large. Nous pouvons expliquer cela par le fait que lorsque la période est faible, la vitesse augmente alors que le délai de perception est constant. L'effet est donc plus prononcé. De plus, une variation de la période a un effet similaire aussi bien sur la position avant et arrière de l'image virtuelle.

On note qu'une variation de 18,2 % de la valeur de la période  $T$ , génère une variation d'environ 18 % aussi bien de la position avant qu'arrière de l'image virtuelle. Son influence est donc à prendre en compte.

#### 4 Étude de la sensibilité de l'amplitude $X$

Nous avons souhaité savoir si une variation d'amplitude a un impact important sur les résultats de nos calculs. Pour cela nous avons fixé les grandeurs suivantes :

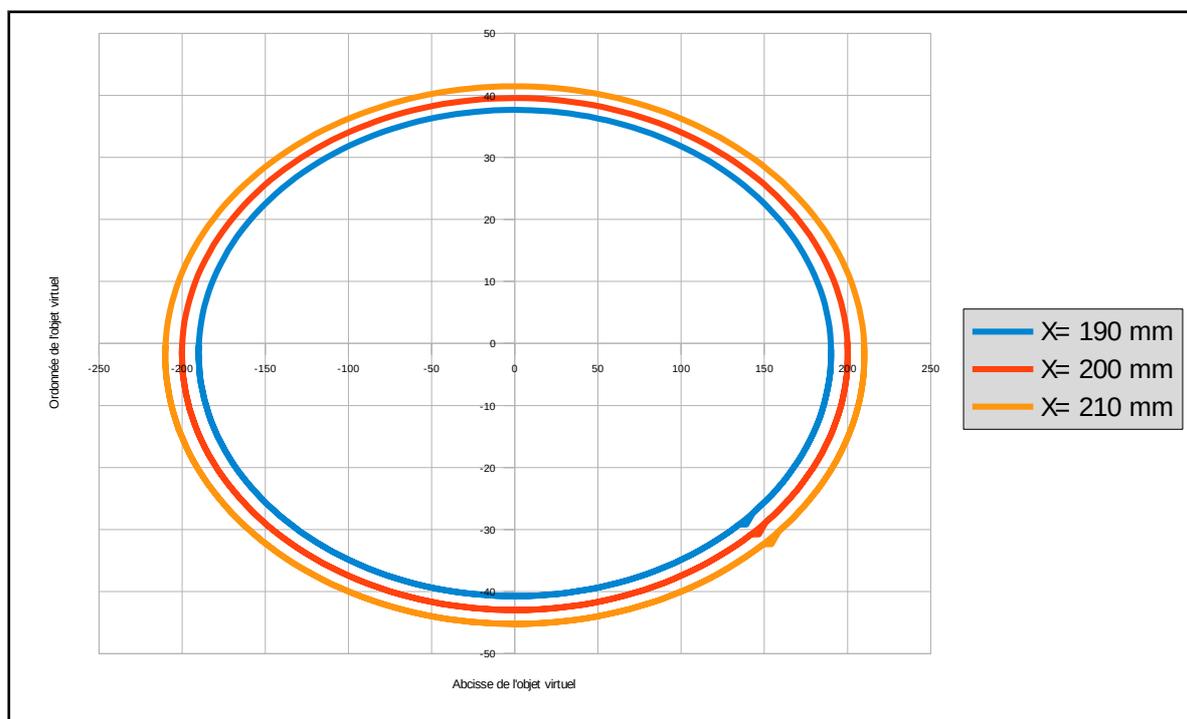
$T$	10	s
$GD$	61	mm
$DELTA$	1000	mm
Délai de perception	0,02	s

*Tableau 9: Paramètres fixés pour voir l'influence de l'amplitude  $X$*

Pour la période, nous avons pris, les grandeurs suivantes :

- $X = 190\text{mm}$ .
- $X = 200\text{mm}$ .
- $X = 210\text{mm}$ .

Nous avons donc obtenu la figure 8.



*Figure 8: Graphique représentant la trajectoire de l'objet virtuel avec une variation de  $X$*

Pour les valeurs de période que l'on a choisi, celles-ci varient de 9,5 %. Dans le même temps, la position de l'objet virtuelle varie d'environ 9,5 %, aussi bien en avant qu'en arrière.

### 5 Influence de la variation de la distance GD couplé avec la variation de $\Delta$

Nous avons observé précédemment que la distance GD et  $\Delta$  ont une influence modérée. Cependant, c'est sur ces deux paramètres que l'incertitude est la plus grande. Il nous a donc paru intéressant de tester leur influence conjointe sur les résultats de nos calculs.

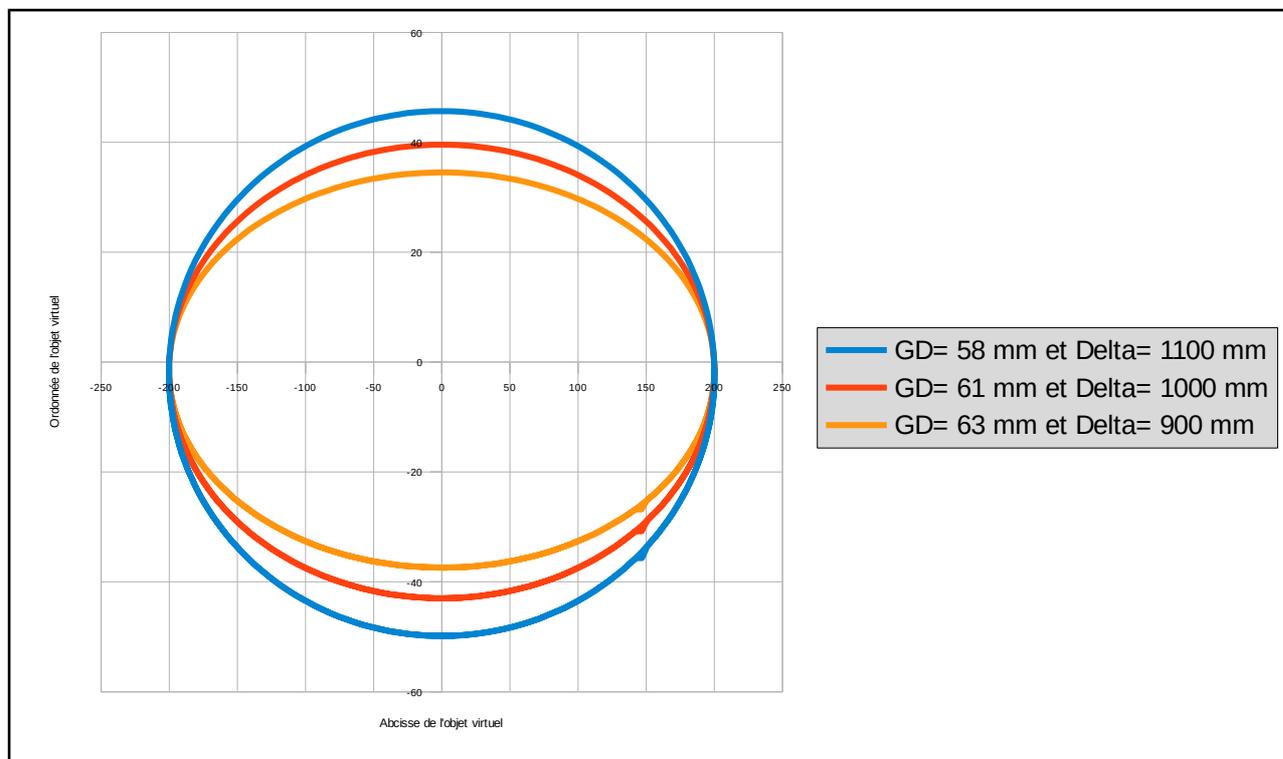


Figure 9: Graphique représentant la trajectoire de l'objet virtuel avec les variations de GD et Delta

Nous avons fixé les mêmes grandeurs que pour les analyses précédentes.

Nous avons obtenu le graphique suivant :

### 6.5. Annexe3 :Protocoles pour déterminer la distance focale

#### Manipulation 1

##### Matériel :

- 1 banc gradué
- 2 miroirs
- 1 mire
- 1 source lumineuse

##### Montage :

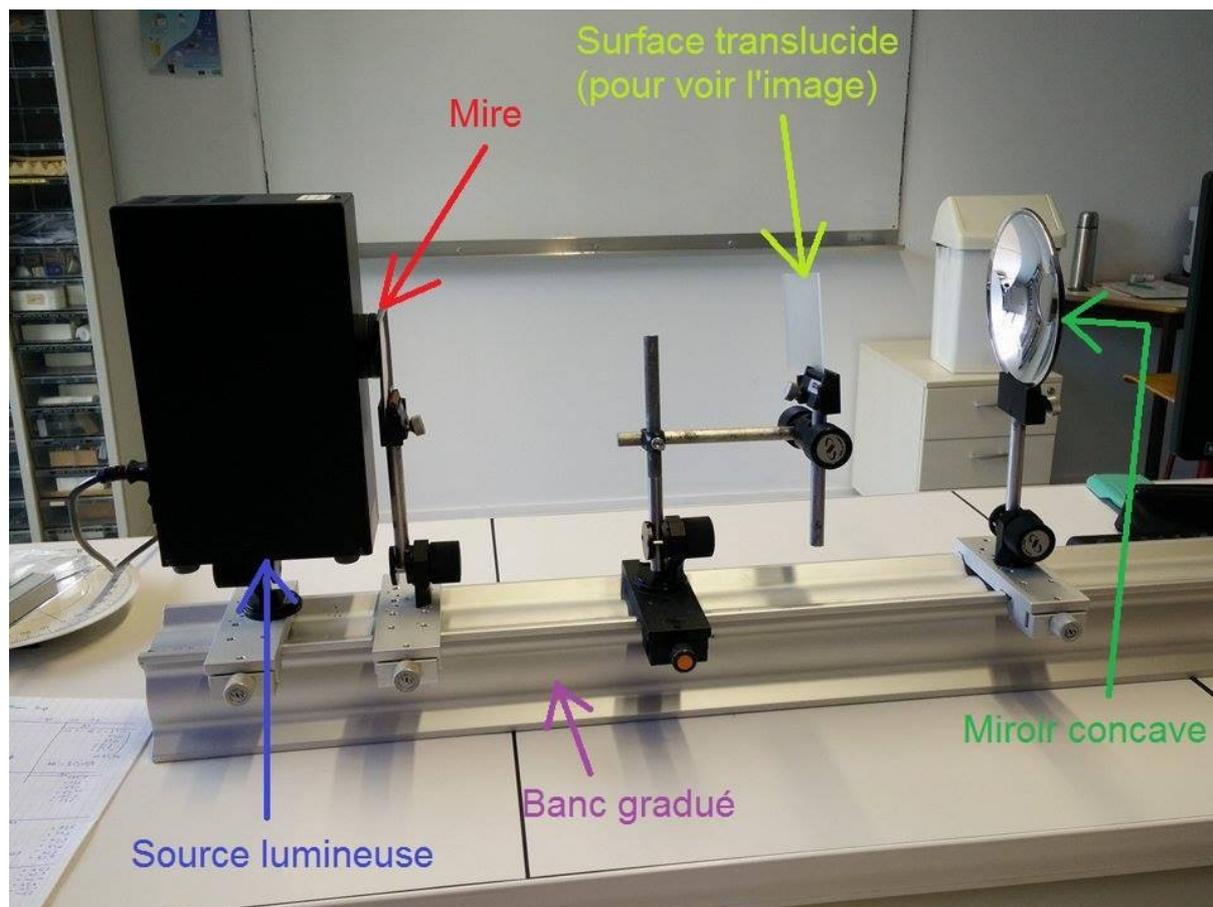


Illustration 15: Montage pour la détermination de la distance focale

#### Protocole :

- Placer la source lumineuse à l'origine du banc, l'objet proche de la source lumineuse et le miroir.
- Déplacer l'écran jusqu'à observer l'image de même taille que l'objet mais inversée.
- Mesurer la distance  $SA'$ , c'est-à-dire la distance entre l'image et le miroir. Pour une meilleure précision nous avons relevé une valeur minimale et une valeur maximale car il n'est pas évident de savoir quand l'image et l'objet sont exactement de même taille.

Pour réaliser cette expérience nous avons rencontré des problèmes, notamment avec la source qui n'était pas assez lumineuse. Nous avons donc dû changer de source pour réaliser notre expérience dans de bonnes conditions.

#### Manipulation 2 :

#### Protocole :

- Placer la source lumineuse à l'origine du banc et la mire proche de la source lumineuse.
- Placer le miroir à une distance connue,  $\overline{SA}$  .
- Déplacer l'écran jusqu'à obtenir une image nette.
- Mesurer la distance  $\overline{AA'}$  .
- Refaire plusieurs fois la même expérience en déplaçant le miroir.

## 6.6. Annexe 4 : Diagramme de Dante

Séance	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Date	26/02/16	04/03/16	11/03/16	18/03/16	25/03/16	01/04/16	22/04/16	29/04/16	13/05/16	20/05/16
<b>1. Mirascope.</b>										
1.1. Historique.	Thibaut									
1.2. Distance focale des miroirs.										
1.2.1. Protocole.	Marie, Oksana, Thibaut									
1.2.2. Manipulation.		Marie, Oksana	Marie, Oksana, Thibaut	Marie, Oksana, Thibaut	Marie, Oksana, Thibaut					
1.3. Equation de la forme parabolique Des miroirs.										
1.3.1. Mesures.	Marie, Oksana, Thibaut									
1.3.2. Equation de la parabole.	Marie, Oksana, Thibaut									
1.4. Forme sphérique la plus proche du Miroir.					Marie, Oksana, Thibaut					
1.5. Relations de conjugaison. Position de l'image virtuelle à travers le mirascope.						Marie, Oksana, Thibaut	Oksana, Thibaut			
1.6. Calcul de grossissement.						Marie, Oksana, Thibaut	Oksana, Thibaut			
1.7. Dimensions limites de l'objet.							Oksana, Thibaut	Marie, Oksana, Thibaut		
1.8. Etude d'un mirascope « géant ».									Marie, Oksana, Thibaut	
<b>2. Effet de Pulfrich.</b>										
2.1. Historique.	Thibaut									
2.2. Equation de la trajectoire de l'image D'un objet se déplaçant horizontalement.	Noémie, Théo									
2.3. Manipulation pour visualiser l'effet Pulfrich.				Noémie, Théo						
2.3.1. Intensité de l'effet en fonction du degré D'obscurité.								Noémie, Théo		
2.3.2. Mesure de l'angle entre deux polariseurs.			Noémie, Théo							
2.3.3. Validation de la loi de Malus							Théo			
2.3.3. Protocole		Noémie, Théo								
2.3.3. Délai de perception en fonction de L'obscurité.										Noémie, Théo
2.4. Position de l'objet virtuel (dessin).		Noémie, Théo								
2.5. Etude de la sensibilité des paramètres sur La trajectoire de l'objet virtuel.		Thibaut								Noémie, Théo

## 6.7. Bibliographie

Effet Pulfrich :

[1] <http://www.nature.com/eye/journal/v21/n12/full/6702459a.html> (consulté le 26/03/16)

[2] The American Journal of Psychology by Alfred LIT, Columbia University, April 1949 (consulté le 20/05/16)

[3] <http://dictionnaire.academie-medecine.fr/?q=distance%20interoculaire> (consulté le 26/03/16)

<http://cdelacourphysique.chez.com/TP/TP%20Miroirs%20spheriques%20correction.pdf> : protocole distance focale (consulté le 26/02/2016)

Déterminer distance focale théorique : consulté le 11/03/2016

<http://debart.pagesperso-orange.fr/1s/parabole.html#foyer>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Parabole>

<http://www.mathcurve.com/courbes2d/parabole/parabole.shtml>

Le mirascope :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Mirascope> (consulté le 26/02/16)