PROJET FOUCAULT

PAR : LUCIANI MERY, QUENTIN GOMES, ALYS ARNOUD ET MARTIN LECLERC

PROFESSEUR : MR PICHOUD

Elisabeth LEPIERRE

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION : PRINCIPE DE LA METHODE DU MIROIR TOURNANT 3
PROBLEMATIQUE 4
PREMIERE PARTIE : MONTAGE OPTIQUE (par Luciani) 5
CHOIX DE LA SOURCE 5
METHODE SPHERIQUE 6
Le montage 6
Calculs d'ordres de grandeurs 6
METHODE PLANE 7
Le nouveau montage 7
Les dimensions du montage 7
La lentille 8
DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION (par Alys) 10
SUPPORT DE LENTILLES ET MIROIRS 10
Cahier des charges 10
Conservatoire des arts et métiers 10
Conception 3D 10
Impression 3D 10
MIROIR TOURNANT 3D 11
Cahier des charges 11
Conservatoire des arts et métiers 11
Conception 3D 11
Impression 3D 11
USINAGE 12
Côtes 12
L'atelier de productique du LPO Charles Coeffin 12
TROISIEME PARTIE : MOTORISATION ET PILOTAGE (par Martin et Quentin) 13
MOTORISATION (par Martin) 13
Méthode utilisée à l'époque 13
Choix du moteur brushless 13
Choix de l'ESC 13
Choix de la batterie 14
Connexions 14
PILOTAGE (par Martin) 14
CONTROLE DE LA VITESSE (par Quentin) 15
Principe du tachymètre 15
Fréquencemètre 16
Tests 17
QUATRIEME PARTIE : MESURES ET RESULTATS 18
ETALONNAGE DE L'ECRAN 18
ESTIMATION GROSSIERE DE C 18
MESURE DE C 19
Photographies du spot lumineux 19
Détermination de la position du centre S' du spot lumineux 19
Tracé de la position du centre S' en fonction de la fréquence de rotation du miroir 19
Calcul de la célérité de la lumière dans l'air 19
Estimation de l'incertitude Δc sur la valeur de la célérité 20
Conclusion 20
ANNEXES A LA DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION 3D 21

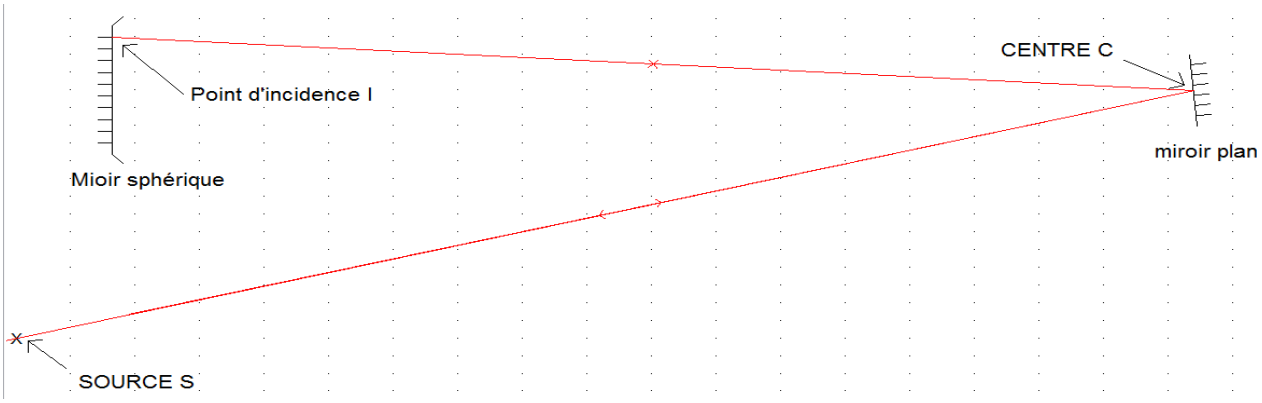
INTRODUCTION : PRINCIPE DE LA METHODE DU MIROIR TOURNANT

Notre principale motivation était de savoir si nous étions capables de relever le défi de mesurer cette grandeur physique fondamentale qu'est la vitesse de la lumière dans notre laboratoire du club de sciences.

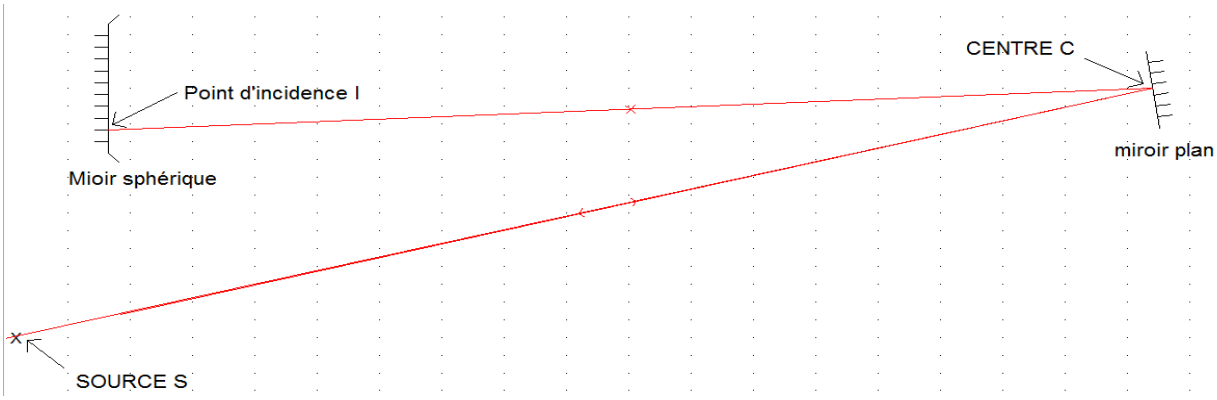
En effet, la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est désormais définie par le bureau des poids et mesures depuis 1983 et nos professeurs nous la présentent comme une grandeur physique fondamentale qu'on ne peut pas dépasser. Et nous sommes bien obligés de l'admettre !

Cependant, avant 1983, de nombreux physiciens se sont penchés sur sa mesure et nous étions curieux de savoir comment, à l'époque de Foucault, il était possible d'accéder à une vitesse aussi élevée.

L'idée de Foucault consistait à éclairer avec une source lumineuse S un miroir plan placé au centre de courbure C d'un miroir sphérique. Le miroir plan est orienté de manière à ce que la lumière se réfléchisse sur le miroir sphérique. Les rayons qui se réfléchissent sur le miroir sphérique vont revenir suivant la même direction puisqu'ils se confondent avec la normale au point d'incidence I.

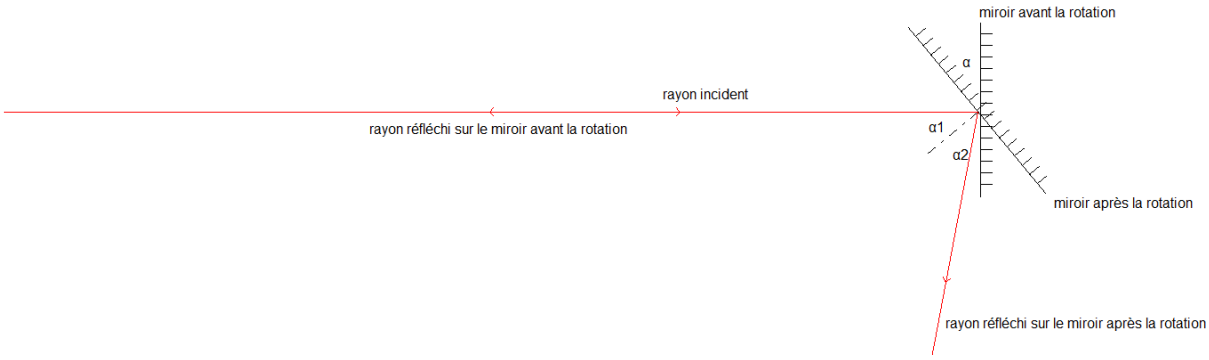


Et ce quelle que soit l'orientation du miroir plan, comme le montre la simulation ci-dessous obtenue grâce au logiciel « OPTGEO » sur laquelle le miroir plan a légèrement tourné dans le sens trigonométrique autour d'un axe perpendiculaire au plan de la feuille passant par son centre.



Donc, si le miroir plan entre lentement en rotation, tous les rayons issus de S qui se réfléchissent sur le miroir sphérique vont revenir au point S.
Mais, si le miroir plan tourne suffisamment vite, celui-ci aura légèrement tourné d'un angle α pendant la durée d'aller-retour de la lumière entre le miroir plan et le miroir sphérique car la vitesse de la lumière n'est pas infinie.

Comme le montre le schéma ci-dessous, lorsqu'un miroir s'incline d'un angle α, les rayons réfléchis pivotent d'un angle 2α :



En effet, les angles α et α1 sont égaux car complémentaires et α1 = α2 d'après la loi de Descartes relative à la réflexion.
Le faisceau retour sera donc légèrement décalé par rapport à la source S.
La mesure de ce décalage permet de remonter à la célérité c de la lumière dans l'air en connaissant la vitesse de rotation du miroir et le rayon de courbure 0C du miroir sphérique. Cette mesure sera d'autant meilleure que l'angle α sera grand et donc que la distance entre le miroir plan et le miroir sphérique sera importante.
En effet, en notant O le centre du miroir sphérique, lorsque le miroir plan a tourné d'un angle α, la lumière a parcouru la distance 2OC pendant une durée Δt. Soit c = 2OC/Δt. Par définition, la fréquence N de rotation du miroir plan correspond au nombre de tours effectué par celui-ci en une seconde. Nous pouvons donc écrire : $\Delta t \times N \times 2\pi = \alpha$.
Finalement : $c = 4\pi \times OC \times N/\alpha$

Enfin, ça c'est la théorie… Si vous voulez savoir ce que cela donne en pratique, lisez la suite.

PROBLEMATIQUE

Notre problématique est désormais la suivante : peut-on reproduire l'expérience historique du miroir tournant de Foucault dans notre laboratoire du club de sciences avec le matériel de notre lycée afin d'en faire profiter l'ensemble de la communauté scolaire ?

Les questions auxquelles nous nous sommes confrontées sont les suivantes : quel montage optique utiliser ? Comment concevoir, piloter et mesurer la vitesse d'un miroir tournant à grande vitesse ?

Ce projet est innovant car il permet d'allier l'ancien et le moderne. Reproduire une expérience historique en utilisant des technologies actuelles va nous permettre de comprendre les difficultés expérimentales rencontrés par tout scientifique quelle que soit son époque.

PREMIERE PARTIE : MONTAGE OPTIQUE (par Luciani)

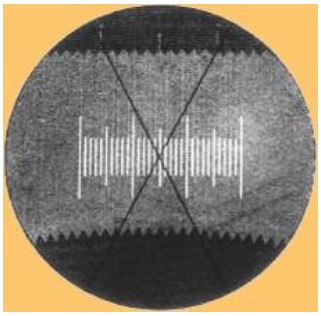
A) CHOIX DE LA SOURCE

Laser He-Ne 2mW

A son époque, Foucault utilisait un Héliostat pour éclairer le miroir tournant. C'était un dispositif à miroirs qui renvoie la lumière du Soleil, quelle que soit sa position dans une direction donnée. Nous décidons de le remplacer par un laser à cause de sa grande directivité.

Héliostat

Foucault utilisait une mire transparente éclairée par l'héliostat dont il projetait l'image grâce à une lentille convergente sur le miroir sphérique. L'image retour de cette image était observée à travers un microscope. La position de la mire lorsque le miroir est au repos était repérée au préalable par une croix. Nous proposons de remplacer la mire par un spot laser projetée sur papier millimétré.



Mire et croix

Papier mm sur tuyau PVC

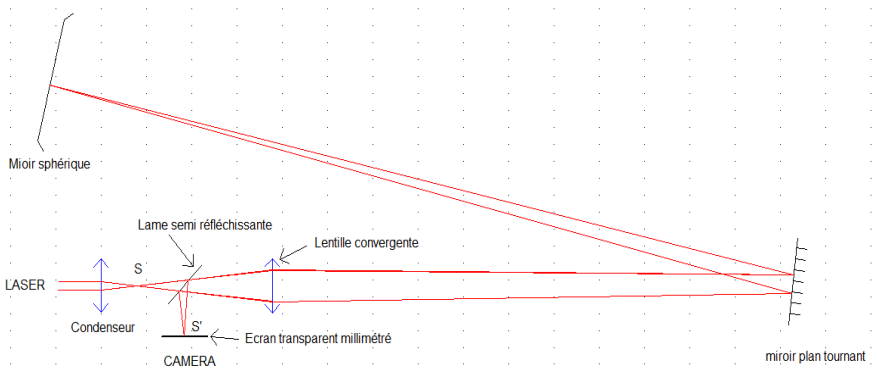
Caméra dans tuyau pvc

Ensemble raccordé par un manchon

Comme il est dangereux de regarder directement la source laser, nous utiliserons une caméra. Si nous voulons pouvoir effectuer nos mesures avec un bon contraste, nous devons protéger notre écran de la lumière extérieure. Nous utiliserons un cercle de papier mm collé sur un bout de tuyau de pvc. Nous glissons notre webcam dans un autre bout de tuyau pvc et nous raccordons les deux avec un manchon.

B) METHODE SPHERIQUE

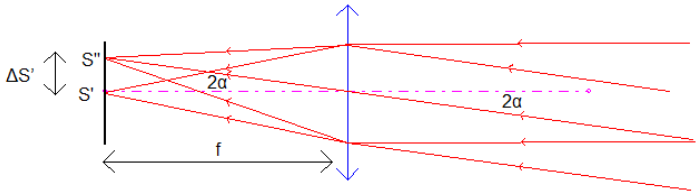
1) Le montage



L'image de la source S se forme sur le miroir sphérique grâce à une lentille convergente de focale 300 mm. Tout comme Foucault, nous utilisons une lame semi réfléchissante. Il s'agit d'une lame transparente traitée pour ne laisser passer que 50% de la lumière incidente et en réfléchir les 50 autres %. Ainsi, le faisceau retour ne sera pas superposé avec le faisceau incident.

2) Calculs d'ordres de grandeurs

Nous avons vu dans la première partie que $c = 4\pi\ OCxN/\alpha$. En notant L la distance entre le miroir plan tournant et le miroir sphérique, on peut écrire : $c = 4\pi\ LN/\alpha$.
La plus grande dimension de la salle que nous occupons pour le club de sciences est de l'ordre de 5m. Nous pouvons raisonner sans tenir compte de la lame semi-réfléchissante car celle-ci a seulement pour effet de modifier la direction d'observation du point S'.
En première approximation, nous considérons que le miroir sphérique est suffisamment éloigné de la lentille convergente donc que le point S' se trouve au foyer de la lentille convergente.
D'après le schéma ci-dessous, nous pouvons écrire : $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$ (angle petit)$\approx \Delta S'/f$

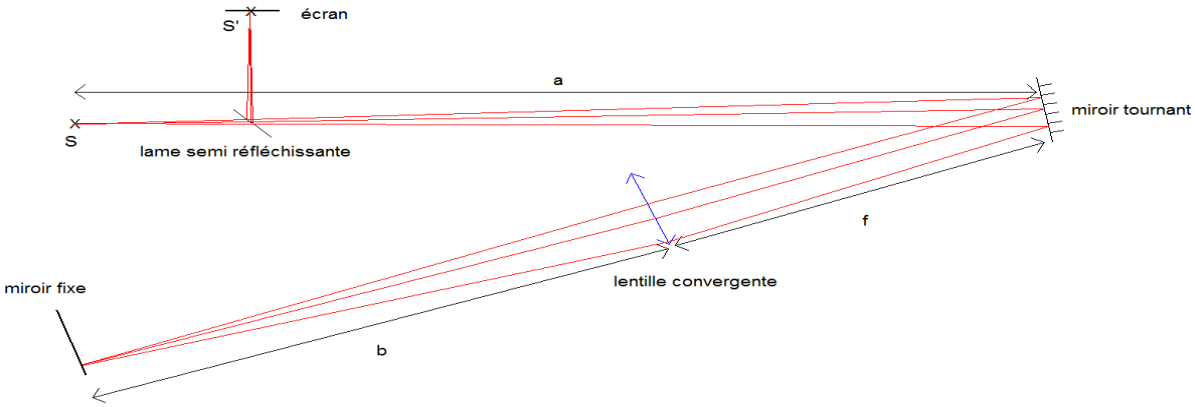


Alors $c = 8\pi\ LNf/\Delta S'$ et $\Delta S' = 8\pi\ LNf/c$

A l'époque de Foucault, le miroir tournait à 400 tours/seconde. Les dimensions de notre salle étant de l'ordre de 5 m et la lentille convergente de focale 300 mm, nous obtenons un décalage de $\Delta S' \approx 8x3{,}14x5x400x0{,}300/(3x10^8) \approx 5x10^{-5}$m soit 50 µm.
A moins de travailler dans une salle plus grande, il nous paraît difficile de mesurer un tel décalage.

C) METHODE PLANE

1) Le nouveau montage



En 1878, le physicien A. Michelson a eu l'idée de remplacer le miroir sphérique par un miroir plan fixe. Pour que la lumière réfléchie par ce miroir fixe revienne toujours dans la même direction quelle que soit l'orientation du miroir tournant, il plaça le centre du miroir tournant au foyer d'une lentille convergente de façon à ce que l'image de la source se forme sur le miroir fixe

Le faisceau principal évolue entre la lentille et le miroir fixe parallèlement à l'axe optique de la lentille étant donné que le miroir tournant est dans le foyer de la lentille. Sur le miroir fixe, perpendiculaire à l'axe optique, le faisceau principal se réfléchit sur lui-même et revient par le même chemin au miroir tournant, indépendamment de sa position.

<u>Remarque</u> : compte tenu des dimensions du montage, nous n'utiliserons pas de condenseur dans cette partie car une trop grande partie de la lumière issue de S ne serait pas réfléchie par le miroir tournant à cause de la divergence du faisceau.

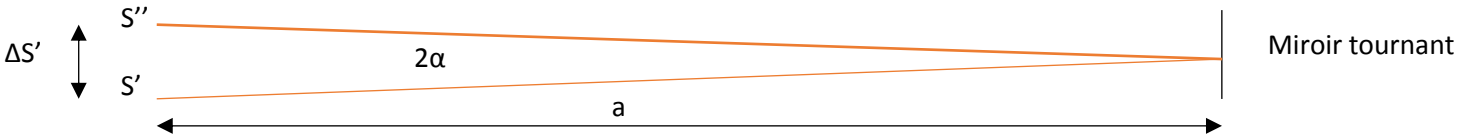
2) Les dimensions du montage

Pour ce montage, la lumière parcourt la distance 2(f+b) pendant que le miroir tournant effectue une rotation d'un angle α pendant la durée Δt d'aller-retour de la lumière entre le miroir tournant et le miroir fixe.

Donc, c = 2(f+b)/Δt.

Comme α=ΔtxNx2π , alors c = 4π (f+b)N/α

Avec maintenant tan2α≈2α (angle petit)≈ΔS'/a.



Donc c = 8π (f+b)aN/ ΔS'

En appliquant la relation de conjugaison des lentilles : $\frac{1}{a+f}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$

On montre que : (f+b)a=f(2a+f), alors c = 8π f(2a+f)N/ ΔS'

Un déplacement ΔS' le plus grand possible exige donc une vitesse de rotation N la plus grande possible, une distance focale *f* la plus grande possible et une distance *a* la plus grande possible.

La distance *a* peut en principe être choisie au gré de l'expérimentateur. Par contre, il faut s'accommoder de pertes d'intensité issues de la divergence du faisceau laser et d'un grand travail d'ajustage. Le dispositif schématisé ci-dessous représente un compromis pour lequel le laser et le miroir final sont côte à côte, donc $a = f + b$.

Par application de la relation de conjugaison des lentilles, on trouve :

a = $(1 + \sqrt{2})f$

La distance *a* entre le laser et le miroir tournant correspond donc à la longueur totale du montage.

3) La lentille

a) Quelle lentille choisir ?

Nous devons choisir une lentille de grande distance focale.

De plus, l'image de S étant générée tant que le faisceau venant du miroir tournant est situé dans l'angle d'ouverture de la lentille, lorsque le miroir entre en rotation, la luminosité de l'image de S sera par conséquent d'autant plus forte que la largeur utilisable de la lentille est grande. Il faudra donc choisir une lentille de grand diamètre.
Au lycée, nous ne disposons que de lentilles de diamètre 40 mm.

Voici la liste des focales dont nous disposons au lycée ainsi que leurs vergences :

f(mm)	333	300	250	200	150	125	100	50	-333	-300	-200	-100	-50
V(δ)	3	3,33	4	5	6,67	8	10	20	-3	-3,33	-5	-10	-20

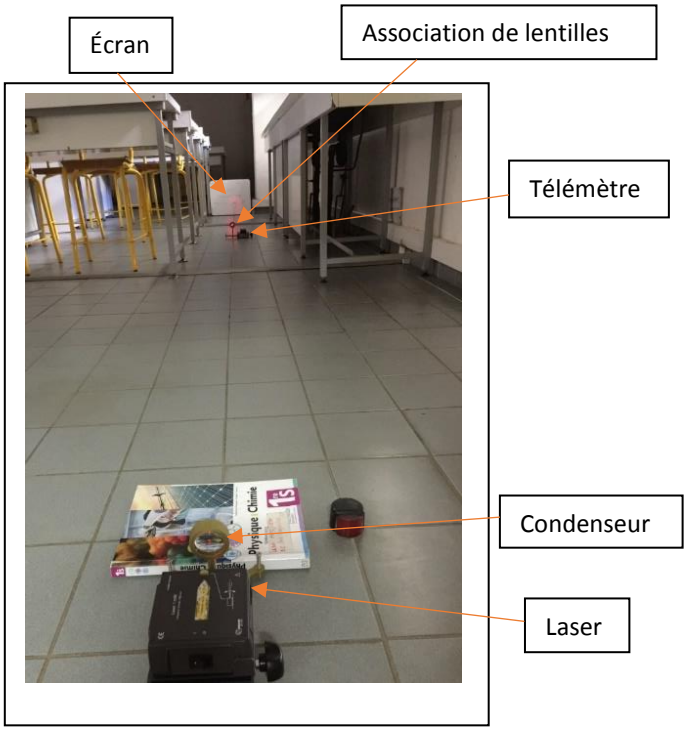
La lentille de plus grande focale dont nous disposons est de 333 mm soit a = $(1 + \sqrt{2}) \times 0{,}333 = 80{,}4\ cm$
Pour une vitesse de rotation de 400 tours/s, ce qui est déjà important,
ΔS' = 8f(2a+f)xNxΠ /c = 8x0,333x(2x0,804+0,333)x400x3,14/(3x10^8)≈ 0,02 mm. Une fois encore, la mesure de ce décalage nous semble délicate. A moins d'augmenter la distance focale de la lentille…

b) Comment obtenir une distance focale plus grande ?

Notre idée sera d'utiliser une combinaison de deux lentilles afin d'augmenter la distance focale et obtenir ainsi un déplacement ΔS' plus grand.
En effet, lorsque l'on accole deux lentilles minces de vergences V1 et V2, la vergence V de l'ensemble est de :
V = V1 + V2, si on considère confondus leurs centres optiques.
Nous allons donc utiliser la relation d'addition des vergences en combinant une lentille convergente avec une lentille divergente afin d'obtenir un système optique convergent de plus petite vergence possible.
Nous constatons qu'il est théoriquement possible d'obtenir un système de vergence 0,33 δ soit une focale de 3m environ, en associant une lentille convergente de 300 mm avec une lentille divergente de -333 mm.
Avec cette association, nous obtenons un déplacement ΔS' = 1,76 mm pour une vitesse de rotation du miroir de 400 Hz.

c) Mesure de la distance focale réelle

En plaçant notre combinaison de lentilles face au soleil, nous constatons que la distance focale de l'ensemble est bien inférieure à 3m. Nous l'estimons très grossièrement à 2m.
En effet, les lentilles que nous utilisons possèdent une épaisseur et la distance e entre leur centre n'est donc pas nulle.
Dans ce cas, il faut utiliser la relation de Gullstrand pour calculer la vergence de l'ensemble :
V = V1 + V2 – eV1V2
A cause des incertitudes sur les valeurs des vergences des lentilles fournies par le fabriquant et surtout l'incertitude sur la valeur de e, nous choisissons de mesurer la vergence de l'ensemble.



Pour cela, nous plaçons un condenseur (lentille de focale courte de 50 mm) devant un laser afin d'obtenir une source S la plus ponctuelle possible.
Nous plaçons notre combinaison de lentilles à une distance x connue de S mesurée au télémètre laser de l'ordre du double de la distance focale de la combinaison. Nous cherchons la position x' de l'image S' de S sur un écran.
Nous en déduisons f d'après la relation de conjugaison des lentilles
Les résultats sont les suivants :

	A	B	C	D
1		x(m)	x'(m)	f(m)
2		3,00	5,22	1,91
3		3,20	4,60	1,89
4		3,40	4,38	1,91
5		3,60	4,10	1,92
6		3,80	3,80	1,90
7		4,00	3,53	1,88
8		4,20	3,45	1,89
9		4,40	3,38	1,91
10		4,60	3,30	1,92
11		4,80	3,13	1,89
12				
13	moyenne			1,90
14	écart type			0,01
15	incertitude type			0,00
16	incertitude élargie 95%			0,01
17				

Soit f = (1,90 ± 0,01) m à 95%

Ce qui conduit à un déplacement ΔS' = 0,70 mm pour une vitesse de rotation du miroir de 400 Hz et à un montage dont les dimensions sont :
a = $(1+\sqrt{2}) \times 1{,}90 = 4{,}59\ m$

DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION (par Alys : voir l'annexe pour le détail de cette partie)

A) SUPPORTS DE LENTILLES ET MIROIRS

1) Cahier des charges

Luciani m'a demandé de lui imprimer des pieds et des supports avec les directives suivantes :

Pieds réglables en hauteur et inclinaison.
Diamètre 4 cm.
Fermoir amovible.
Epaisseur des miroirs et lentilles 2mm.
Hauteur du centre à 10 cm.
Un support pour miroir.
Un support pour lame semi-réfléchissante.
Un support pouvant contenir 2 lentilles accolées.

2) Conservatoire des arts et métiers

Je suis d'abord allé voir à quoi ressemblaient les pieds utilisés par Foucault à l'époque pour m'en inspirer. J'ai donc pris contact avec le conservatoire national du musée des arts et métiers (CNAM) qui m'a envoyé quelques photos.

3) Conception 3D

Support pour miroir et lame.

Puis j'ai passé quelques heures avec le logiciel SOLIDWORKS afin de réaliser les pièces.

4) Impression 3D

Enfin, j'ai procédé à l'impression.

Lentille convergente

Lame séparatrice

Miroir fixe

B) MIROIR TOURNANT 3D

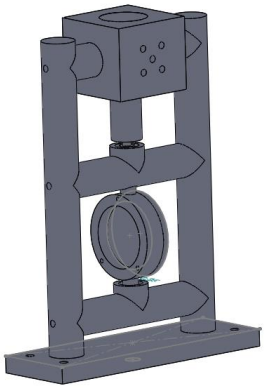
1) Cahier des charges

Pour la conception du support du miroir tournant, les contraintes sont les suivantes :
Pieds réglables en hauteur et inclinaison.
Diamètre du miroir 4 cm.
Diamètre du moteur 37 mm.
Longueur du moteur 4 cm.
Axe du moteur 4mm.
Longueur de l'axe 12 mm.
Hauteur du centre du miroir : 10 cm.

2) Conservatoire des arts et métier

Là encore, avant de commencer à travailler, je me suis inspiré du miroir tournant utilisé par Foucault à l'époque.

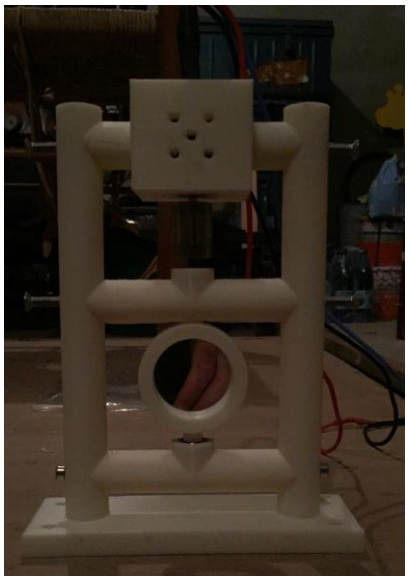
3) Conception 3D



J'ai opté pour un support de miroir dont les axes sont guidés par deux roulements à bille. Le support sera donc porté par les guides des roulements et non par l'axe du moteur. Le moteur sera relié au support du miroir par un accouplement flexible pour éviter que les vibrations endommagent les roulements. La pièce la plus délicate à réaliser est le support de miroir car l'ensemble « miroir-support-fermoir » doit être parfaitement équilibré pour éviter les vibrations. Inutile de dire que je n'ai pas compté mes heures entre le temps passé sous SOLIDWORKS et sur les forums internet. Mais le résultat en valait la peine !

4) Impression 3D

Le prototype final vous sera présenté lors de la finale et il fonctionne !

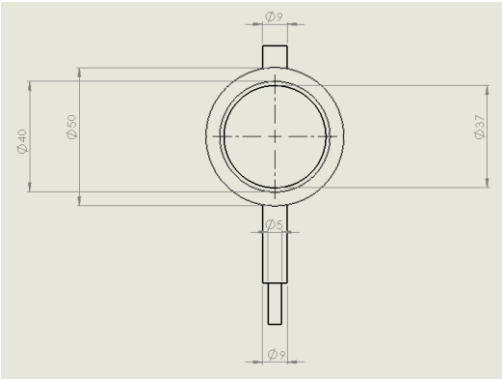


C) USINAGE

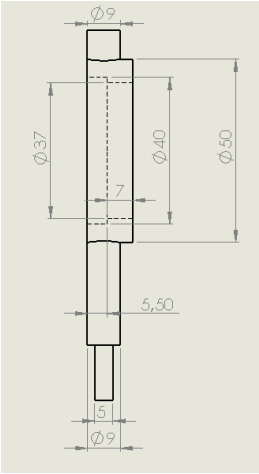
Même si le prototype imprimé répond aux attentes de Luciani, il ne serait pas prudent de l'utiliser de manière intensive car les vitesses de rotation étant élevées, les vibrations risquent de devenir destructrice pour le plastique utilisé (ABS). Le risque de projection de matière n'étant pas nulle, je ne pouvais pas livrer mon miroir tournant en l'état. Je décide donc de me rapprocher d'un atelier afin de faire usiner mes pièces. Notre professeur de physique nous a mis en relation avec un ancien professeur de productique pour lui faire part de notre projet. Celui-ci a tout de suite été enthousiasmé par notre idée et nous a demandé de lui fournir les côtes de nos différentes pièces afin de les usiner avec nous. Cette expérience fût extrêmement enrichissante humainement et intellectuellement. Il a fallu apporter des modifications en fonction des contraintes que nous indiquait le professeur d'atelier. C'était vraiment passionnant. Le détail de ce travail se trouve en annexe.

1) Côtes

Voici un exemple de côtes que nous avons fourni.



Côtes support miroir tournant de face

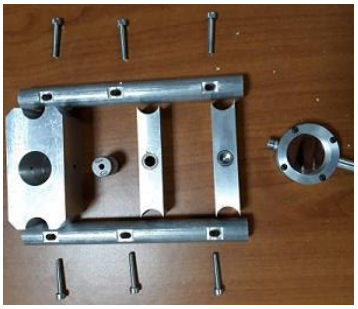


Côtes support miroir tournant de côté

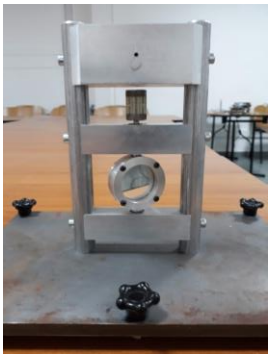
2) L'atelier de productique du LPO Charles COEFFIN

Fraiseuse

Tour



Miroir tournant démonté



Miroir tournant assemblé

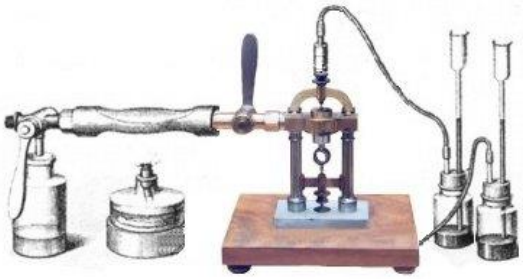
TROISIEME PARTIE : MOTORISATION ET PILOTAGE (par Martin et Quentin)

A) MOTORISATION (par Martin)

1) Méthode utilisée à l'époque

A l'époque, la rotation est assurée par :

- une turbine mise au point par Gustave Froment
- une soufflerie à air comprimé mise au point par Aristide Cavaillé-Coll



Turbine

Soufflerie

2) Choix du moteur brushless

Le moteur brushless ou « sans balais » en un moteur triphasé utilisé notamment en modélisme. Il est piloté par un courant alternatif triphasé dont la fréquence variera en fonction de la vitesse de rotation souhaitée.

Nous avons choisi un moteur de la marque « XPOWER » de 3540 KV. Le KV est la vitesse de rotation maximale du moteur à vide par volt. Le constructeur recommande d'utiliser une batterie LIPO 4S (voir plus loin le choix de la batterie) ce qui correspond à une tension de 14,8V. La fréquence théorique N de rotation à vide maximale sera donc égale à :
N = 3540 x 14,8 / 60 = 873 tours/seconde.

Le courant maximale à ne pas dépasser étant de 50 A, cela va conditionner notre choix d'ESC.

3) Choix de l'ESC

L'ESC ou « Electronic Speed Controler » est un circuit électronique permettant de contrôler la vitesse du moteur. Il peut générer un courant alternatif triphasé dont la fréquence variera en fonction de la vitesse de rotation souhaitée.

Comme le recommande le fabriquant, nous avons choisi un contrôleur pouvant supporter un courant maximale de 60A, supérieur à celui que peut supporter le moteur.
Le BEC (Batterie Eliminator Circuit) est un régulateur de tension. Nous verrons plus loin son utilité.

4) Choix de la batterie

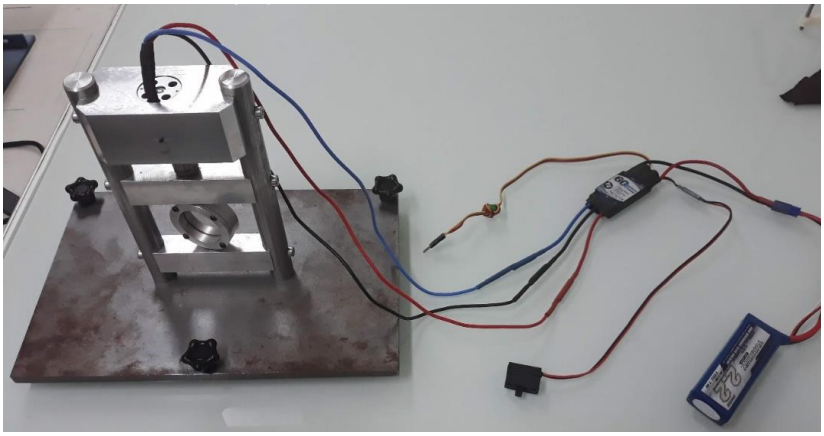
Nous utilisons une batterie LIPO (lithium polymère) 2S ou 4S (S pour cellule). Une cellule délivre une tension de 3,7 V. Il faut être très prudent avec ses batteries, notamment lors de leur charge.

LIPO 2S

LIPO 4S

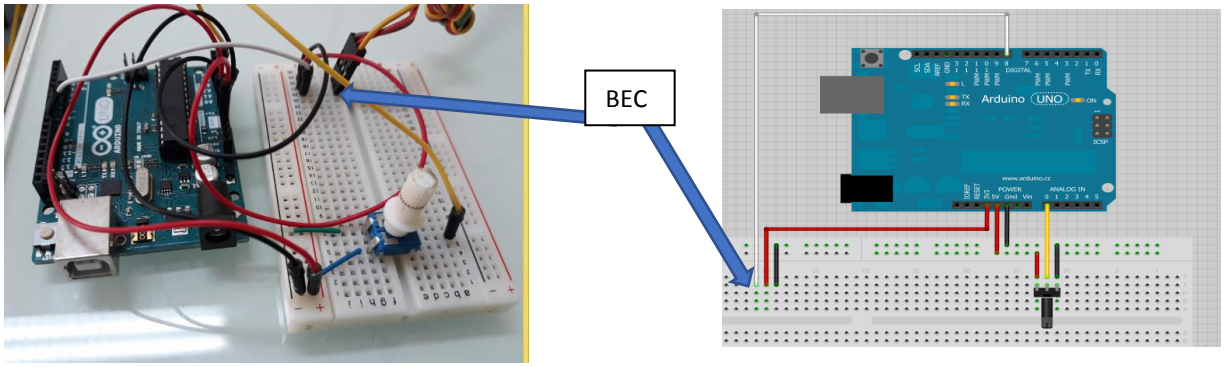
5) Connexions

Après quelques soudures, l'ensemble est connecté !



B) PILOTAGE (par Martin)

Nous avons fait le choix de piloter le moteur via le BEC de l'ESC. Nous avons relié deux des bornes de ce dernier à l'alimentation d'une carte ARDUINO, la troisième étant relié au PIN D8.



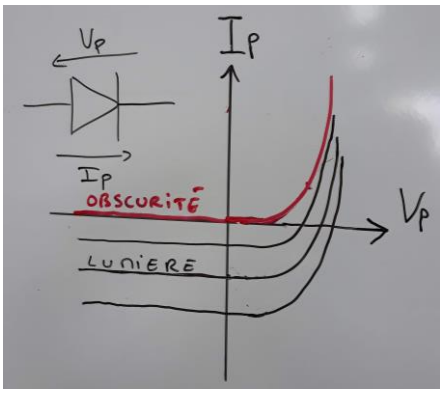
Le programme est le suivant : le pilotage se fait grâce à un potentiomètre relié au PIN A0. Le signal électrique est numérisé par le CAN du microcontrôleur puis convertie (« maping ») en signal lue par l'ESC.

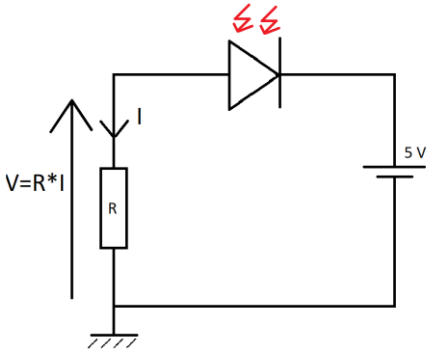
```
#include <Servo.h> // Appel de la library Servo.h
int valeur = 0; // Variable potentiomètre
Servo esc ; // Créé une variable de type Servo et on lui attribue comme nom : esc

void setup() {
  esc.attach(8); // On attribue la pin 8 à la variable esc
  esc.writeMicroseconds(1000); // On attribue la valeur min à l'esc

}

void loop() {
  valeur = analogRead(A0);// on lit la tension A0
  int valeuresc = map (valeur ,0 , 1023, 1000, 2000); // on "mappe" la valeur numérisée
  esc.writeMicroseconds(valeuresc); // On attribue la variable mappé à l'esc
```

C) CONTROLE DE LA VITESSE (par Quentin)

a) Principe du tachymètre

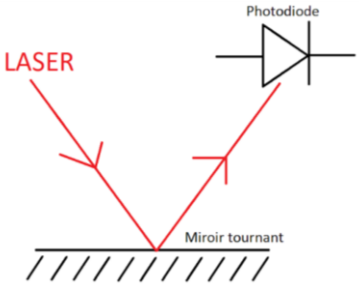
Le principe est le suivant : une photodiode polarisée en inverse délivre un courant sortant de son anode lorsque celle-ci est éclairée.

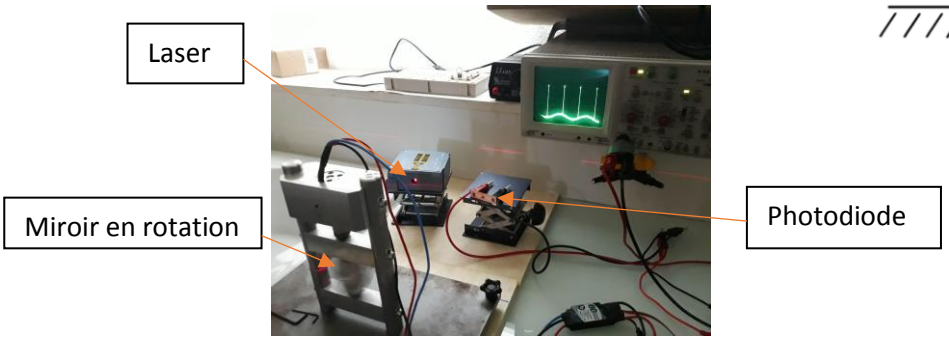




En reliant la photodiode à une résistance, on obtient une tension électrique à ses bornes proportionnelle au courant délivrée d'après la loi d'Ohm.

On éclaire le miroir tournant avec un laser et on l'oriente de manière à ce que le faisceau réfléchi éclaire la photodiode à chaque tour.



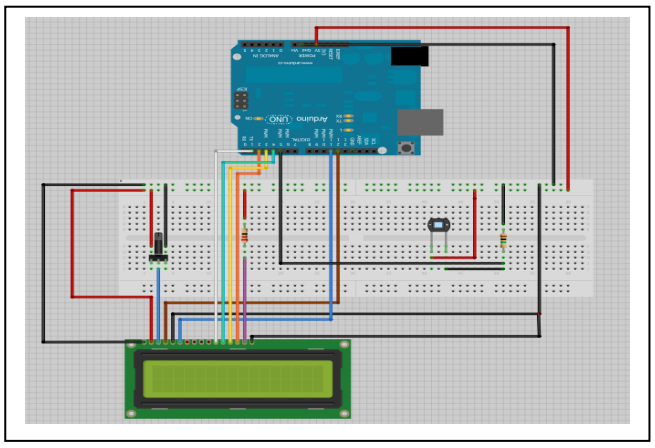


On observe, grâce à un oscilloscope, la tension électrique aux bornes de la résistance lorsque le miroir est en rotation.

La mesure de la période du signal nous permet d'accéder à sa fréquence et donc à la vitesse de rotation du miroir mais ce n'est pas très pratique.

b) Fréquencemètre

Pour pouvoir obtenir directement la fréquence de rotation du miroir, nous lisons la tension aux bornes de la résistance sur le TIMER de la PIN 5 du microcontrôleur. Ce TIMER 16 bits sera incrémenté sur des fronts montants pendant une seconde puis remis à zéro. La valeur de l'incrémentation qui correspond à la fréquence de rotation du moteur sera affichée sur un écran LCD comme le montre le schéma ci-contre réalisé avec le logiciel FRITZING.



Rappel : la fréquence d'un signal périodique est le nombre de fois que ce signal se répète par seconde.

L'idée de ce programme est d'utiliser deux « timers » :
Le premier « timer « (registre 16 bits relié à la borne D5 de la carte) est configuré en mode « capture ». Il va compter les passages du faisceau laser devant la diode. L'idée étant d'afficher la valeur du « timer 1 » sur l'écran LCD toutes les secondes, ce qui correspond à la fréquence, puis de le remettre à zéro.
Le second « timer » sera configuré en mode générateur d'interruptions périodiques. C'est-à-dire que l'on va interrompre le programme périodiquement. On utilise pour cela l'horloge de la carte (16 MHz) à laquelle on applique un facteur de division (prescaler=1024) et on déclenche une interruption au bout de 256 tops d'horloge ce qui fait : $256 \times 1024/(16 \times 10^6) \simeq 1/60$ secondes.

On appelle à ce moment une fonction qui incrémente une variable ni (nombre d'interruptions) et lorsque ni atteint la valeur de 60 (c'est-à-dire toutes les secondes), on affiche la valeur contenue dans le « timer 1 ».

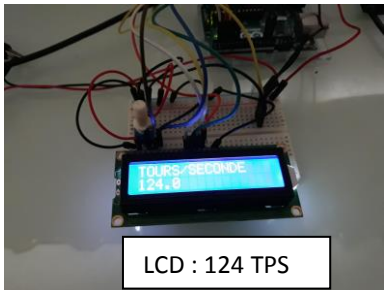
Ci-dessous, le programme détaillé :

```
#include <LiquidCrystal.h> // librairie lcd
LiquidCrystal lcd(12, 11, 1,4, 3, 2);// broches utilisées pour communiquer

char inputPin = 5; // entrée T1 pour Timer1 tension aux bornes de la résistance
volatile uint16_t count; //variable 16 bits qui contiendra le nombre de flashs lumineux par seconde
volatile uint16_t ni; // compteur d'interruptions
uint16_t ninter = 60; // nombre d'interruptions pour un comptage

void start_count() {

// Timer 2 : génération d'interruptions périodiques (genere des impulsions toutes les 1/60 seconde)

// Timer en mode CTC (clear timer on compare), qui consiste à remettre à zéro le registre du compteur 8 bits (TCNT2)lorsqu'il
//atteint la valeur du registre OCR2A. On choisit OCR2A=0xFF, ce qui signifie que la période d'interruption est égale à 256 tops d'horloge. L'horloge
//du compteur est l'horloge de la carte (16 MHz), à laquelle une division est appliquée (prescaler). On choisit le facteur de division le plus élevé
// (1024), ce qui fait uen fréquence d'horloge de 16/1024 MHz.

  TCCR2A |= (1 << WGM21); //  mode CTC
  OCR2A = 0xFF; // fréquence d'interruption 16 MHz /1024/256
  TIMSK2 = 1 << TOIE2; // mode débordement du Timer 2 (la fonction ISR(TIMER2_OVF_vect) sera appellée à chaque débordement du timer soit tout les 1/60 seconde
  TCNT2 = 0;// mise à 0 du registre
  ni = 0; // mise à 0 du compteur d'interruptions

   // Timer 1 : compteur d'impulsions

 // configuration en mode capture

  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;

  TCNT1 = 0;// mise à 0 du compteur 1

  count = 0;// mise à 0 de la variable count

  sei(); // activation des interruptions
  TCCR2B |= (1 << CS12) | (1 << CS11) | (1 << CS10); // prescaler = 1024
  TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS11) | (1 << CS10); // Horloge externe sur front montant
}
```

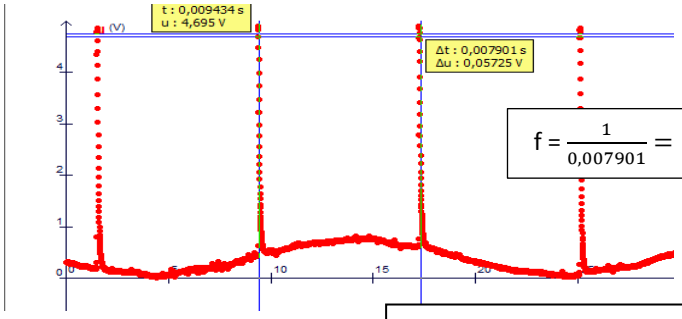
```
// Voici la fonction appelée lors de l'interruption déclenchée par le débordement du timer 2. Lorsque le nombre d'interruptions atteint ninter, on
// enregistre le nombre d'impulsions comptées dans count puis on remet le compteur d'impulsions à zéro.


ISR(TIMER2_OVF_vect) { // Fonction d'interruption déclenchée lors du débordement du timer 2
   ni++; // incrémentation de ni

// on stocke la valeur du compteur dans count lorsque ni=60 soit toutes les secondes et on remet le compteur à 0

   if (ni==ninter) {
     ni = 0;
     count = TCNT1;
     TCNT1 = 0;

   }
}

// La fonction setup déclenche le comptage

void setup() {

 lcd.begin(16,2); // on utilise un écran LCD 16 caractères 2 lignes pour afficher la fréquence
 pinMode(inputPin,INPUT); //on définit le pin 5 comme entrant

  start_count();// déclenche le comptage

  }

// la fonction loop affiche la valeur de la fréquence sur l'écran LCD toutes les secondes

  void loop() {

  delay(100);// on attend un peu avant de lancer une boucle

  float freq = count; // on stocke la valeur de count dans une variable lisible par le LCD

  lcd.setCursor(0,0);// mise à la ligne du curseur LCD
  lcd.print("TOURS/SECONDE");// écriture de l'unité
  lcd.setCursor(0,1); // mise à la ligne du curseur LCD
  lcd.print(freq,1);// écriture de la fréquence
 }
```

c) Tests

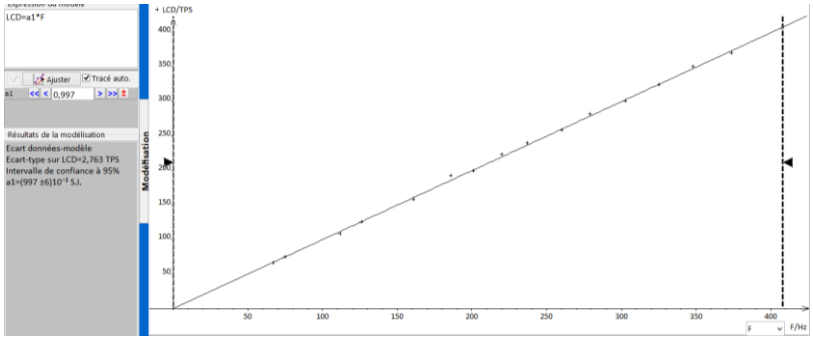
Nous avons voulu tester la fiabilité de notre tachymètre sur la plage de fréquence que nous allons utiliser. C'est-à-dire de 0 à 400 Hz. Pour cela, nous avons relié les bornes de la résistance à une carte d'acquisition et nous avons mesuré la fréquence du signal obtenu pour différentes vitesses de rotation du miroir.



LCD : 124 TPS



$$f = \frac{1}{0{,}007901} = 127\ Hz$$

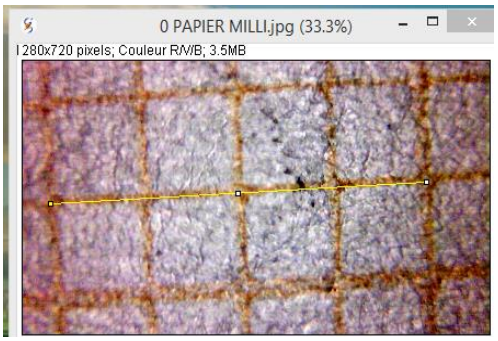


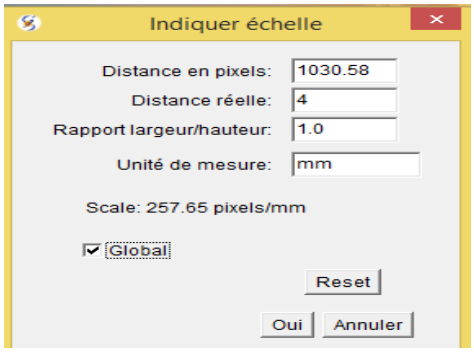
Nous avons ensuite tracé la courbe de la valeur lue sur l'écran LCD (TPS : tours/s) en fonction de la fréquence mesurée.
Le coefficient directeur de cette fonction linéaire étant très proche de l'unité (incertitude relative de 0,6%), nous pouvons donc conclure sur la fiabilité de la valeur affichée sur notre tachymètre.
Remarque : les fluctuations de la vitesse de rotation du miroir entraînent une fluctuation de la valeur lue de quelques Hz ce qui devra être pris en compte dans nos mesures.

QUATRIEME PARTIE : MESURES ET RESULTATS

A) ETALONNAGE DE L'ECRAN

On photographie l'écran avec un éclairage blanc et on étalonne l'image avec le logiciel SALSAJ.



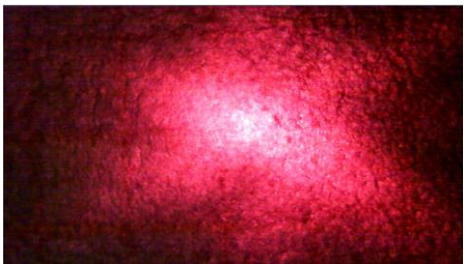


B) ESTIMATION GROSSIERE DE C

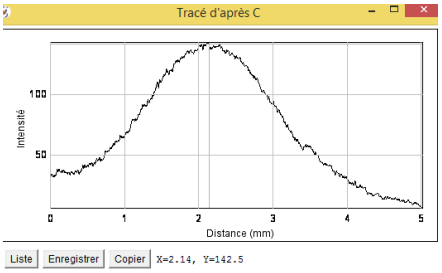
On réalise deux photographies du spot pour deux sens de rotation du miroir différents et on réalise une coupe à deux dimensions avec le logiciel SALSAJ.

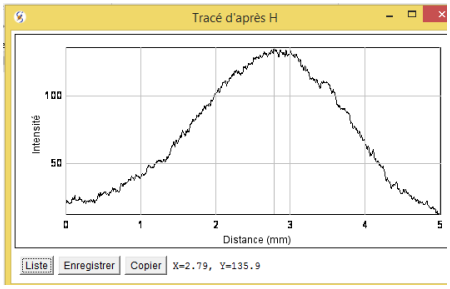
Spot à –214Hz

Spot à 205Hz



Coupes avec SALSAJ





On observe bien un déplacement de la position du spot lumineux.

On détermine la variation de la position du spot lumineux : $\Delta S' = 2{,}79 - 2{,}14 = 0{,}65$ mm

On calcul la célérité de la lumière dans l'air avec $c = 8\pi f(2a+f)N/\Delta S'$

$c = 8\pi \times 1{,}90 \times (2\times4{,}59+1{,}90)\times(205+214)/(0{,}65\times10^{-3}) = 3{,}41 \times 10^{8}$ m/s

Ecart relatif avec la valeur théorique de 300 000 km/s = 14 %

Nous pouvons dire que l'ordre de grandeur est correct mais nous allons voir comment améliorer cette mesure.

C) MESURE DE C

1) Photographies du spot lumineux

Nous avons réalisé plusieurs photographies du spot lumineux pour différentes fréquences :

2) Détermination de la position S' du centre du spot lumineux

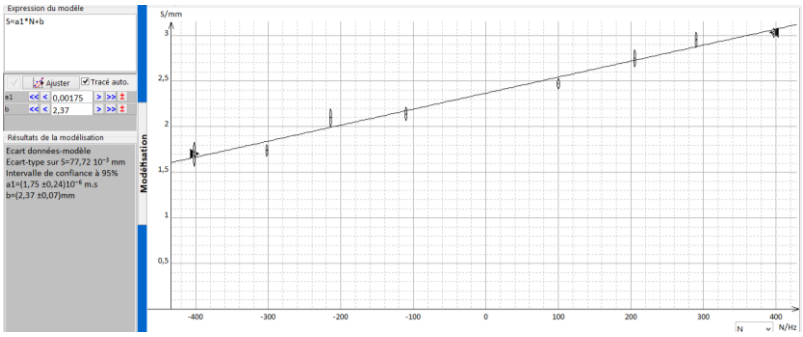
Nous avons ensuite effectué les différentes coupes lumineuses avec la logiciel SALSAJ afin de déterminer la position S' du centre des différents spots lumineux. Nous avons ensuite rentré nos résultats dans le tableur REGRESSI.

i	S	u(S)	N	u(N)
	mm	mm	Hz	Hz
0	1,700	0,13	-402	1,4
1	1,740	0,066	-302	1,4
2	2,100	0,098	-214	1,4
3	2,140	0,072	-110	1,4
4	2,470	0,060	100,0	1,4
5	2,750	0,095	205,0	1,4
6	2,950	0,083	290,0	1,4
7	3,030	0,051	397,0	1,4

Remarque : pour déterminer l'incertitude type de la position S' du spot, nous avons estimé un encadrement de sa position (S'max-S'min) que nous avons divisé par $2\sqrt{3}$.
L'incertitude sur la lecture de la fréquence est estimée par rapport aux légères fluctuations de l'affichage de l'écran LCD pendant la mesure : $\frac{5}{2\sqrt{3}} = 1{,}4Hz$

3) Tracé de la position du centre S' en fonction de la fréquence de rotation du miroir

Puis nous traçons la courbe de la position S' du centre du spot en fonction de la fréquence de rotation du miroir.



Après modélisation, nous obtenons une relation affine : S' = kxN + S'_0
Nous en déduisons la position S'_0 du centre du spot lorsque le miroir est à l'arrêt : 2,37 mm et le coefficient
k = (1,75 $\pm$ 0,24) x 10^{-6} m.s

4) Calcul de la célérité de la lumière dans l'air

A partir de la relation c = 8π f(2a+f)N/ ΔS', nous en déduisons :

S' = 8π f(2a+f)N/c + S'_0 donc 8π f(2a+f)/c = k et c = 8π f(2a+f)/k

Ce qui donne : c = 8πx1,90x(2x4,59+1,90)/ (1,75x10^{-6}) = 302 000 km/s

Soit un écart relatif de 0,7 % par rapport à la valeur théorique.

5) Estimation de l'incertitude Δc sur la valeur de la célérité

Nous pouvons écrire que :

$$\left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 = \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(2a+f)}{2a+f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2$$

$\frac{\Delta f}{f} = \frac{0{,}01}{1{,}90} = 5{,}26 \times 10^{-3}$ (voir C.3.c PARTIE 2)

$\frac{\Delta(2a+f)}{2a+f} = \frac{\sqrt{2(\Delta a)^2+(\Delta f)^2}}{2a+f} = \frac{\sqrt{2(0{,}01)^2+(0{,}01)^2}}{2\times 4{,}58+1{,}90} = 1{,}57 \times 10^{-3}$ (On estime à 1 cm l'incertitude sur la mesure de la distance a même si le fabriquant du télémètre nous annonce 2 mm)

$\frac{\Delta k}{k} = \frac{0{,}24}{1{,}75} = 1{,}37 \times 10^{-1}$

On voit qu'on peut négliger les incertitudes sur les distances f et a par rapport à k.

Soit $\frac{\Delta c}{c} \approx \frac{\Delta k}{k}$= et Δc $\simeq \frac{\Delta k}{k} \times c = 41\,000\ km/s$

Donc $c = (302\,000 \pm 41\,000) m/s$ avec une probabilité de 95%

Et une incertitude relative de : $\frac{\Delta c}{c} = 14\%$

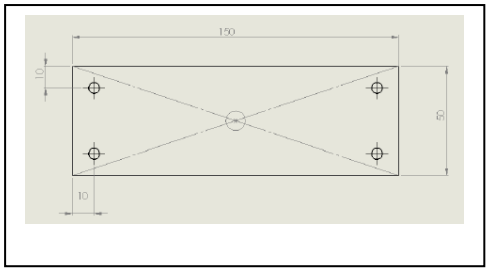
Conclusion

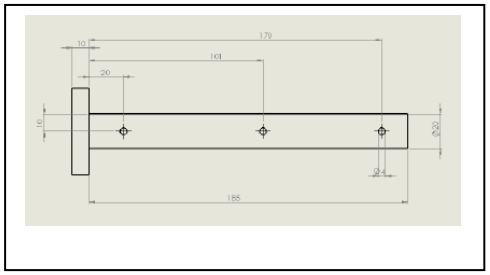
Pour conclure, nous pouvons dire que ce projet a été très enrichissant et nous a beaucoup apporté. Nous avons appris à travailler en équipe. Nous nous sommes confrontés à de réelles difficultés expérimentales. Nous nous sommes parfois sentis dans la peau de ce génial physicien qu'était Léon Foucault lorsqu'il essayait de mettre en œuvre son expérience et avons pu réaliser à quel point il faut être persévérant afin d'obtenir des mesures exploitables.

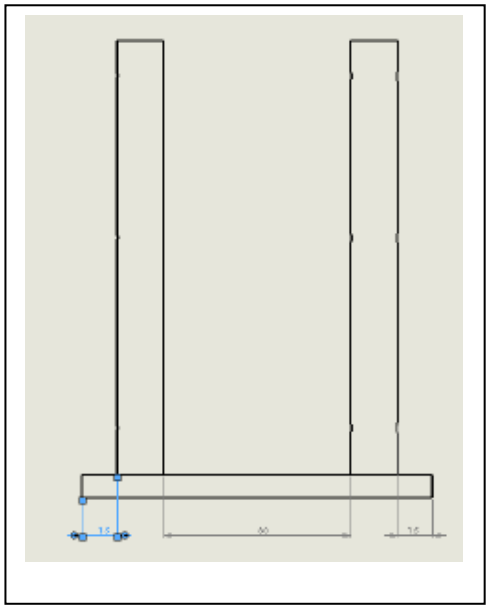
Comme perspectives, nous envisageons de fabriquer un récipient transparent suffisamment long pouvant contenir de l'eau afin de mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau comme Foucault l'avait fait à l'époque afin de valider la théorie ondulatoire de propagation de la lumière.

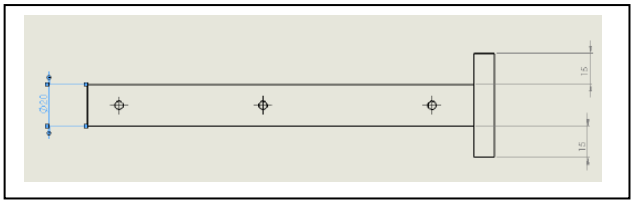
ANNEXES A LA DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION 3D

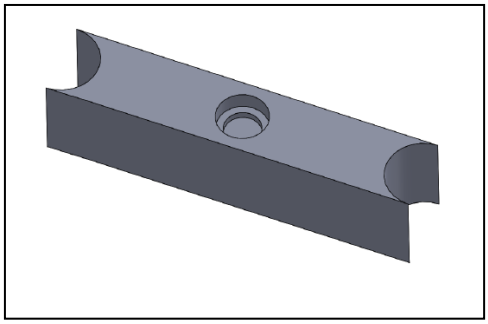
SOCLE MIROIR TOURNANT

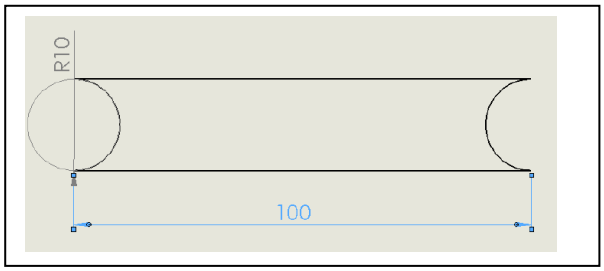


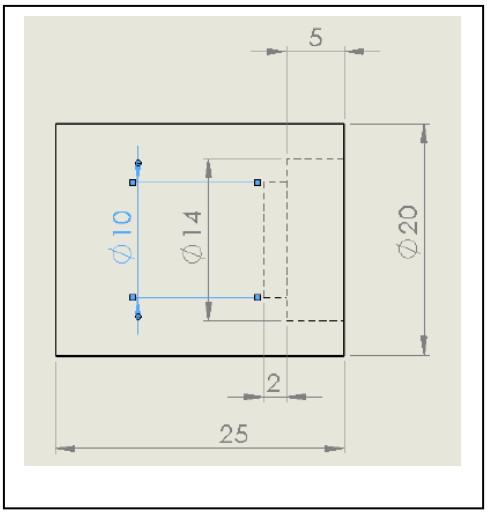


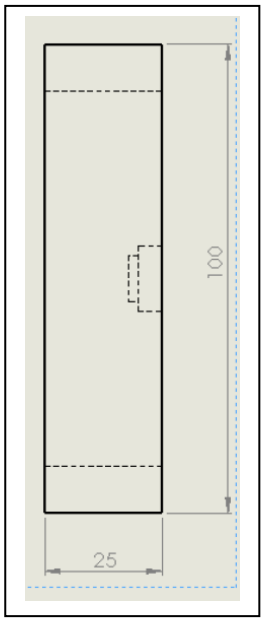


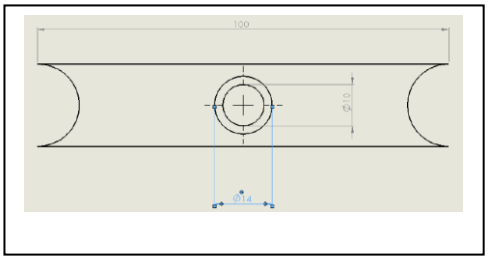


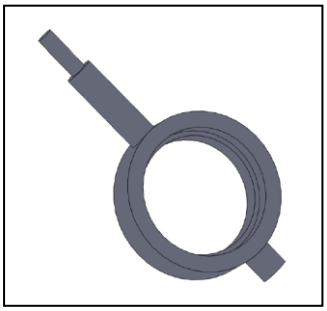


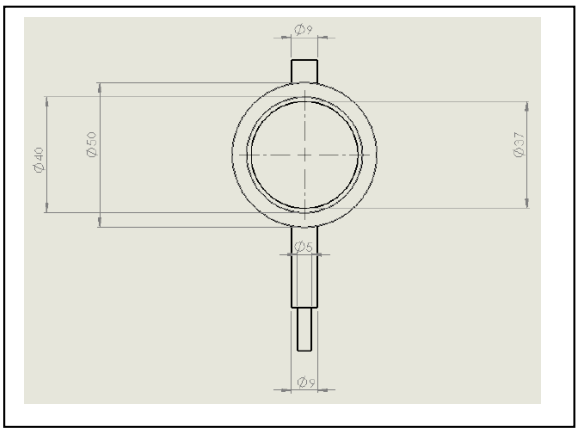

R10
100

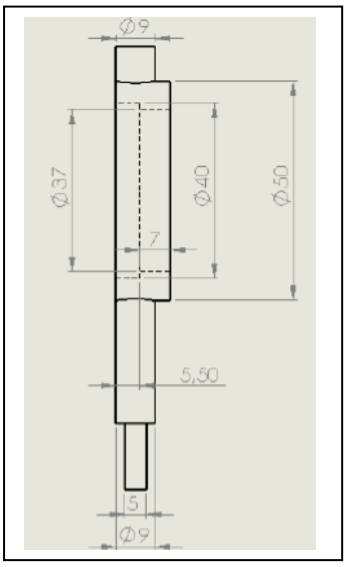

5
Ø10
Ø14
Ø20
2
25

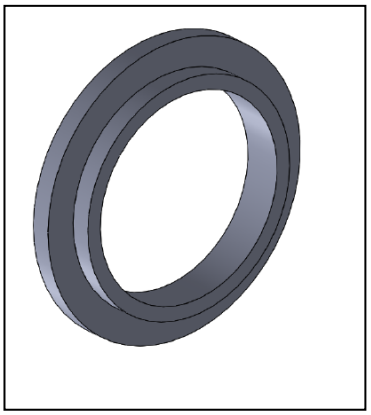

100
25

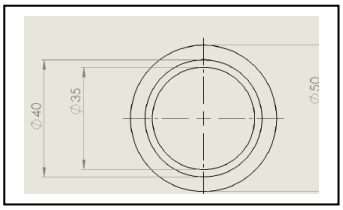


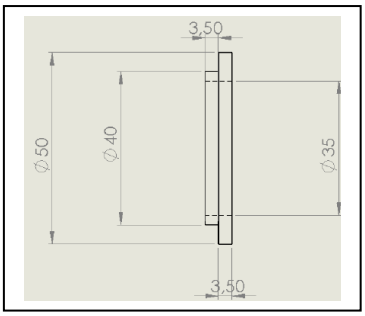



Ø9
Ø40
Ø50
Ø37
Ø5
Ø9

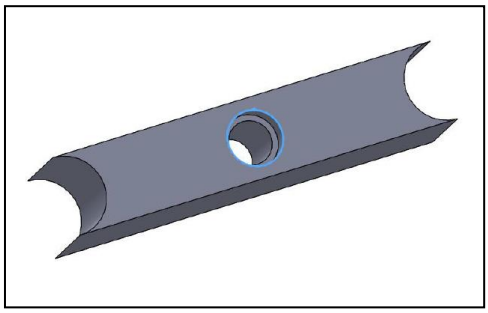

Ø9
Ø37
Ø40
Ø50
7
5,50
5
Ø9

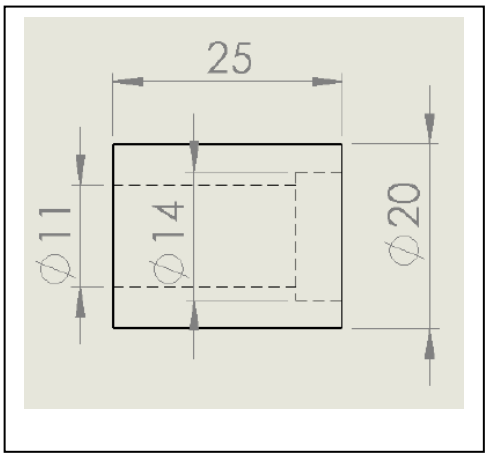


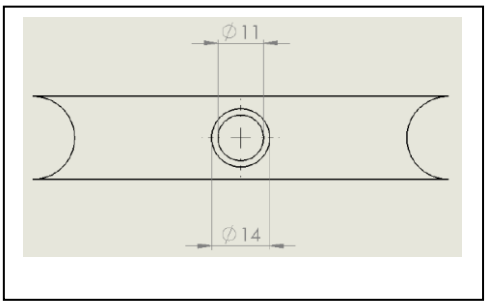
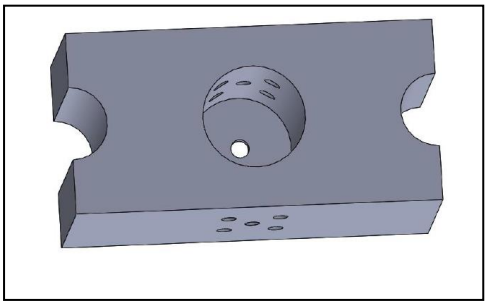
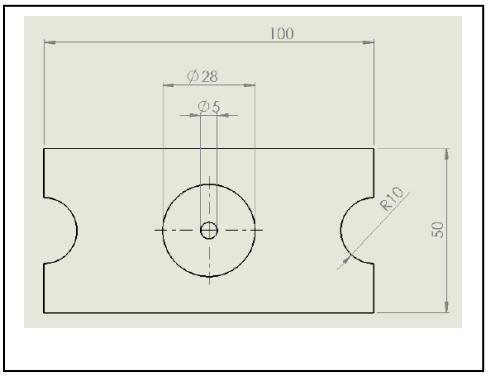
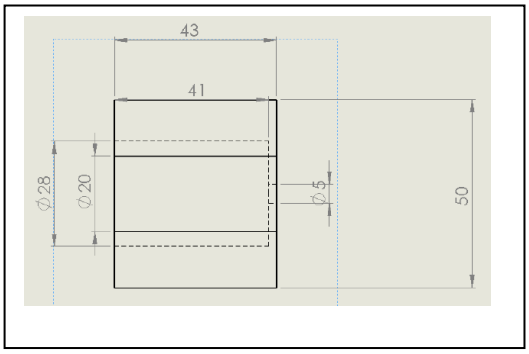
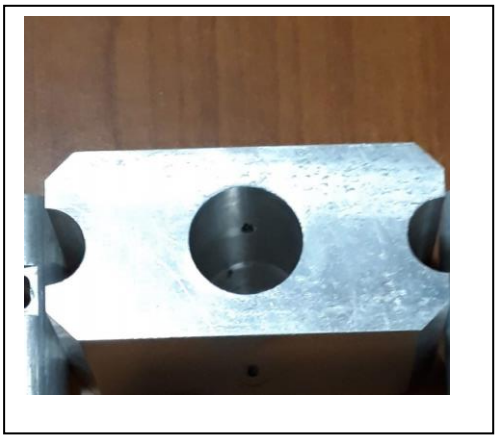

Ø40
Ø35
Ø50


3,50
Ø50
Ø40
Ø35
3,50

GUIDE MIROIR HAUT







GUIDE MOTEUR