

**Christelle JUNKER 408**  
**Kerem YAZICI 404**

**Volée 2021-2022**  
**Maitre accompagnant : Boris ISCHI**

# **DE HUBBLE À OBOL**

## **CONSTRUCTION ET MOTORISATION D'UN TÉLESCOPE RÉFLECTEUR**



**Création technique**

**Collège de Candolle**



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>2.</b>	<b>PLANS ET PROCESSUS DE CONSTRUCTION .....</b>	<b>- 5 -</b>
2.1.	Idée de base .....	- 5 -
2.2.	Planification et CAO .....	- 5 -
2.3.	Optique .....	- 6 -
2.3.1.	Type de télescope .....	- 6 -
2.3.2.	Miroir principal .....	- 7 -
2.3.3.	Miroir secondaire .....	- 9 -
2.3.4.	Oculaire .....	- 10 -
2.3.5.	Définition de la position des pièces optiques du télescope .....	- 12 -
2.4.	Fixation .....	- 13 -
2.4.1.	Support du miroir principal : le barillet .....	- 13 -
2.4.2.	Support du miroir secondaire : l'araignée .....	- 15 -
2.4.3.	Support des objectifs : le porte oculaire .....	- 16 -
2.5.	Pointer les objets célestes : le chercheur .....	- 17 -
2.6.	Monture .....	- 18 -
2.6.1.	Centre de gravité .....	- 19 -
2.6.2.	Roulements .....	- 20 -
<b>3.</b>	<b>PROGRAMME .....</b>	<b>- 22 -</b>
3.1.	Système de coordonnées .....	- 22 -
3.2.	Position des Astres .....	- 22 -
3.2.1.	PyEphem .....	- 22 -
3.2.2.	Mémoire .....	- 23 -
3.2.3.	Calcul de la « distance à parcourir » .....	- 23 -
3.3.	Alignement .....	- 24 -
3.3.1.	Position, Date et heure, altitude .....	- 24 -
3.3.2.	Calibration .....	- 25 -
3.4.	GOTO .....	- 25 -
3.5.	Suivi en temps réel .....	- 25 -
<b>4.</b>	<b>MOTORISATION .....</b>	<b>- 26 -</b>
4.1.	Moteurs utilisés .....	- 26 -
4.2.	Contrôle (cerveau) .....	- 27 -
4.3.	Code .....	- 28 -
4.4.	Alimentation .....	- 28 -
4.5.	Transmission .....	- 28 -
4.5.1.	Avantage mécanique .....	- 28 -
4.5.2.	Courroies .....	- 29 -
4.5.3.	Modélisation et impression 3D .....	- 30 -
<b>5.</b>	<b>CONSTRUCTION .....</b>	<b>- 32 -</b>
5.1.	Plans .....	- 32 -
5.2.	Matériaux et outils .....	- 32 -
5.3.	Monture .....	- 33 -

5.4.	Cage .....	- 34 -
5.5.	Assemblage .....	- 34 -
5.6.	Moyens de calibrations .....	- 35 -
5.7.	Réglage des instruments .....	- 36 -
5.8.	Électronique .....	- 37 -
<b>6.</b>	<b>UTILISATION .....</b>	<b>- 38 -</b>
6.1.	Informations générales .....	- 38 -
6.2.	Interactions et interface utilisateur .....	- 38 -
6.3.	Autres modes .....	- 38 -
6.4.	Ajustements .....	- 39 -
<b>7.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>- 40 -</b>
7.1.	Attentes et résultat .....	- 40 -
7.2.	Pour une prochaine fois : la photographie .....	- 40 -
7.3.	Bilan personnel .....	- 41 -
7.4.	Remerciements .....	- 41 -
<b>8.</b>	<b>SOURCES .....</b>	<b>- 42 -</b>
8.1.	Biblio- et webographie .....	- 42 -
8.2.	Logiciels utilisés .....	- 43 -
8.3.	Illustrations .....	- 43 -
<b>9.</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>- 46 -</b>
9.1.	Fiche de dépense .....	- 46 -
9.2.	Code source .....	- 46 -
9.3.	Fichiers 3D et plans .....	- 46 -

# 1. INTRODUCTION

Du vélo au télescope, l'histoire d'un parcours en duo

Depuis 6 ans, nous cheminons ensemble sur différents projets ou autres activités. La complicité qui nous lie se nourrit de nos passions communes. Nous avons découvert ensemble certains sports ou certains pays. Et nous nous sommes même lancés dans la restauration de vieux vélos. Ceci a concrétisé notre intérêt commun pour le bricolage et notre envie de créer, de construire de nos propres mains. C'est sur cette toile de fond que vient s'inscrire notre travail de maturité.

Alors, quand il a fallu imaginer un travail de recherche, l'envie de travailler ensemble s'est d'emblée imposée. Nous voulions une thématique qui puisse nous porter et, surtout, nous passionner toute une année. La crainte de nous ennuyer ou de ne nous perdre dans l'exploration d'un sujet en compulsant une montagne d'ouvrages nous envahissait ! Nous avons besoin d'agiter nos neurones autant que nos mains. Nous avons besoin de comprendre autant que de créer. Nous avons besoin de mobiliser un ensemble de connaissances vues au cours de ces 4 années de collège. Nous avons aussi besoin de nous lancer un défi de taille qui nous projette dans notre futur.

Et comme nous sommes tous deux rêveurs, la tête perdue dans les étoiles, nous avons décidé de les explorer ! Alors pourquoi ne pas construire un télescope ! Objet complexe par excellence qui a vu autour de son berceau des génies comme Lippershey, Metius, Galilée ou Kepler. Objet de fascination qui nous révèle des mondes inconnus. Objet optique qui aujourd'hui devient informatique. Voilà un défi tout trouvé !

Mais alors, comment faire, comment des amateurs peuvent t'ils construire un télescope de A à Z ?

Ce TM raconte comment nous avons cheminé, de la conceptualisation à la réalisation. Ce travail se divise en deux volets intimement liés. Le premier décrit la fabrication qui prend en compte les contraintes physiques à considérer, tout autant que les enjeux techniques que nous avons dû résoudre. Notre télescope raconte ainsi les différents choix que nous avons posés au fil de nos réflexions, de nos échanges et de la réalité de notre budget. La deuxième partie développe l'écriture d'un programme qui permet de pointer n'importe quelle étoile ou planète de notre système solaire.

## 2. PLANS ET PROCESSUS DE CONSTRUCTION

### 2.1. IDÉE DE BASE

Le télescope devait être réalisable avec des outils de base ; nous avons accès à une perceuse-visseuse, une scie sauteuse et une défonceuse. De plus, nous savions dès le départ que, n'ayant que des outils à main, la précision serait un problème ; il était donc très important que le télescope soit ajustable après l'assemblage. Nous nous sommes donc tournés vers un design modulable et facile à calibrer, avec peu de pièces fixes en privilégiant un système de maintien par vis. Ce choix nous permettait de privilégier la flexibilité tout en autorisant une plus grande marge au niveau des imprécisions. Cependant, la fabrication s'en trouve complexifiée.

Notre travail se décompose en deux parties. Tout d'abord la conception et la construction du télescope, puis sa motorisation pour permettre un pointage automatisé des étoiles.

### 2.2. PLANIFICATION ET CAO



FIGURE 1 - RENDU DU 1E PROTOTYPE

Avant de se lancer dans la construction d'un projet manuel conséquent, il faut avoir une idée précise de ce que nous souhaitons réaliser : il faut avant tout concevoir ce télescope. La planification constitue donc une étape très importante. Non seulement cela assure que les différentes pièces fonctionneront d'une manière cohérente entre elles mais cela nous fournit aussi une marche à suivre, un ordre précis de construction pour que le télescope puisse être ultérieurement assemblé.

Nous avons tout d'abord entrepris un important travail de recherche et de documentation pour définir comment s'y prendre et surtout pour comprendre le fonctionnement général d'un télescope. Nous avons consulté différents livres et blogs de construction pour préciser la vision de notre projet. En ce qui concerne la conception, deux options se sont offertes à nous : 1) dessiner les plans, dans leurs grandes lignes sur papier, et les préciser au fur et à mesure de la construction ou 2) dessiner et « construire » le télescope dans son intégralité sur ordinateur, à l'aide d'un logiciel de *conception assisté par ordinateur* (CAO). Cette dernière option nous

a semblé plus judicieuse car elle nous permettait de voir à l'avance l'apparence finale du projet et d'expérimenter avec plusieurs designs sans devoir recommencer à chaque fois. La modélisation du télescope en 3D nous a surtout permis au niveau de notre duo de mieux nous comprendre. Il est bien plus facile d'expliquer notre vision d'une pièce tridimensionnelle modélisée que l'on peut agrandir, faire pivoter qu'une pièce dessinée. De par nos précédentes entreprises, nous savons que la communication et la compréhension sont deux points primordiaux pour mener à bien un projet.

La modélisation a entièrement été réalisée sur le logiciel *Fusion 360* (Autodesk<sup>1</sup>), un puissant logiciel de CAO, créé pour des professionnels, qui offre de nombreuses possibilités de modélisation utilisant des mesures précises. Nous avons dessiné nos propres plans et n'avons pas repris de *designs* préexistants. Certaines des pièces sont des idées originales. Les fichiers 3D sont en [annexes](#).

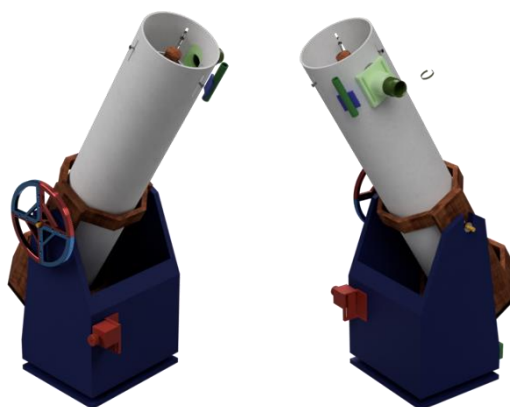


FIGURE 2 - RENDU FINAL

## 2.3. OPTIQUE

### 2.3.1. TYPE DE TÉLESCOPE

La première étape de la conception a été de choisir le type de télescope. Parmi les nombreux modèles disponibles, trois sont parmi les plus utilisés pour des constructions amateurs : les télescopes à réflexion, à réfraction, et catadioptrique<sup>2</sup> (voir fig.3). Pour nos moyens, le télescope à réflexion, ou télescope « newtonien », était le plus facile à construire ainsi que le plus adapté au type de monture (cf. [2.6 Monture](#)).

---

1 AUTODESK, 2013. Fusion 360 [logiciel]. Autodesk. Version 2.0.10806. Disponible à l'adresse : <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

2 BERRY, Richard, 1985, Build Your Own Telescope. Scribner. ISBN 13: 9780684184760

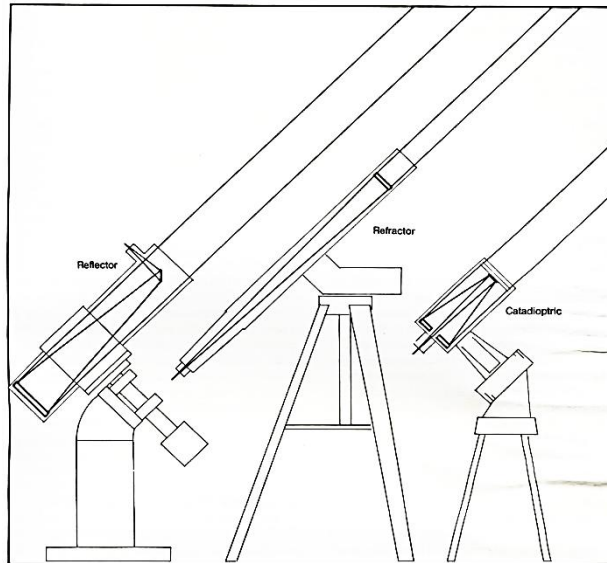


FIGURE 3 - DIFFÉRENTS TYPES DE TÉLESCOPE

Le télescope newtonien utilise deux miroirs : un miroir dit primaire, qui est de forme parabolique, et un miroir secondaire plus petit et incliné de 45 degrés par rapport au plan. Le premier miroir va collecter la lumière et grâce à sa forme parabolique, concentrer les rayons lumineux en un seul point. Le second miroir va dévier la lumière de manière perpendiculaire vers le côté du tube, où est placé l'oculaire.

Un télescope est dit « réflecteur », lorsque la lumière est concentrée par un miroir, au contraire des télescopes « réfracteurs », qui utilisent des lentilles à cet effet.

Le « réflecteur » implique une longueur de tube assez importante ce qui rend le transport difficile, mais la mobilité n'est pas un critère important pour nous. C'est plutôt la facilité de construction et la grande documentation disponible, qui en font un choix idéal de télescope.

Pour le *design* général, nous nous sommes basés sur les nombreuses images de télescope proposées par Richard BERRY dans son livre *Build Your Own Telescope*<sup>3</sup> (1985), ainsi que sur le modèle qui se trouve au collège.

### 2.3.2. MIROIR PRINCIPAL

Le télescope newtonien utilise un miroir parabolique, placé au fond du tube, pour agrandir l'image. Celui-ci, à la manière d'une lentille, concentre les rayons lumineux en un point, appelé « foyer ». La précision de ce foyer est extrêmement importante ; plus les rayons convergent en un point unique, plus l'image obtenue sera nette. C'est notamment pour cette raison que les miroirs utilisés en astronomie sont paraboliques, et non sphériques, car ces derniers ne renvoient pas les rayons en un seul point.

La distance entre le centre du miroir et le foyer dépend de la courbure de la parabole, et est égale à  $1/4a$  ( $a$  étant le premier coefficient du polynôme de la fonction parabolique définissant la courbure du miroir). En optique, la distance focale

---

<sup>3</sup> BERRY, Richard, 1985, *Build Your Own Telescope*. Scribner. ISBN 13 : 9780684184760



est indiquée par le ratio entre le diamètre du miroir et la distance qui le sépare du foyer. Notre miroir a un diamètre de 203mm et une focale de f/5. Les rayons se croisent donc à 1015 mm du centre du miroir. Cette mesure nous sera importante lorsqu'il s'agira de placer le miroir secondaire ainsi que l'oculaire. <sup>4</sup>

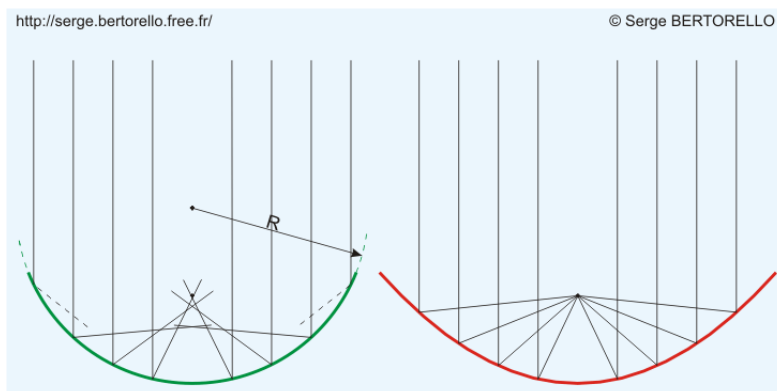


FIGURE 4 - ILLUSTRATION DU FOYER D'UN MIROIR SPHÉRIQUE (GAUCHE) ET PARABOLIQUE (DROITE)

En plus de leurs propriétés géométriques, les miroirs utilisés en astronomie diffèrent des miroirs classiques (« de salle de bain ») par leur construction. Les miroirs conventionnels sont argentés sur leur face arrière, ce qui les rend plus résistants aux rayures car la partie réfléchissante n'est pas accessible. Cependant, les rayons lumineux sont réfractés dans le verre, ce qui cause des doublons de l'image. Sur les miroirs d'observation astronomique, c'est l'avant du verre qui, après avoir été minutieusement poli, est recouvert d'une fine couche d'argent ou d'aluminium, éliminant ainsi les problèmes optiques cités précédemment.<sup>5</sup>

La fabrication artisanale de ce type de miroir est extrêmement complexe et requiert beaucoup de temps et d'expérience, ce qui sort du cadre de ce travail de maturité. De ce fait, internet reste l'endroit le plus évident pour se les procurer ; nous avons acheté nos deux miroirs sur le site <https://www.pierro-astro.com/>, le miroir parabolique étant de la marque Kepler GSO (réf. K030).

<sup>4</sup> BERRY, Richard, 1985, Build Your Own Telescope. Scribner. ISBN 13 : 9780684184760

<sup>5</sup> DELLAGIOVANNA, Nicolas, Fabrication d'un télescope d'astronomie amateur à moindre coût.

### 2.3.3. MIROIR SECONDAIRE

Le miroir secondaire du télescope newtonien est un miroir plat, de forme elliptique, qui est placé à 45° par rapport au miroir principal. De ce fait, il renvoie les rayons du



FIGURE 5 - MIROIR SECONDAIRE

miroir principal vers le côté du tube en projetant les rayons vers l'oculaire (voir schéma fig. 5). Vu de 45°, il a la forme d'un cercle, sa longueur vaut donc  $\sqrt{2}$  fois sa largeur.<sup>6</sup>

Placé dans l'axe du miroir principal, le miroir secondaire obstrue donc l'arrivée de la lumière. Il est par conséquent essentiel qu'il ne soit ni trop grand, pour laisser passer un maximum de lumière, ni trop petit pour pouvoir retranscrire l'image capturée par le miroir principal dans son entièreté. Nous avons choisi un petit axe de 50 mm, pour avoir une certaine marge. Le miroir est maintenu au centre du tube par un support référé sous le terme technique d'araignée.

Nous avons calculé la valeur  $a$  du petit axe de notre miroir grâce à cette formule<sup>7</sup> :

$$a = \frac{(D - d) * p}{f} + d$$

- $D$  correspond au diamètre du miroir principal
- $f$  à la longueur focale du miroir principal
- La distance  $p$  du foyer à l'axe optique du miroir principal
- Le diamètre  $d$  du champ que l'on désire couvrir en pleine lumière

---

<sup>6</sup> BERRY, Richard, 1985, Build Your Own Telescope. Scribner. ISBN 13: 9780684184760

<sup>7</sup> BERTORELLO, Serge, Dimensions du miroir plan d'un télescope de Newton, <http://serge.bertorello.free.fr/calculs/dimplan.html>

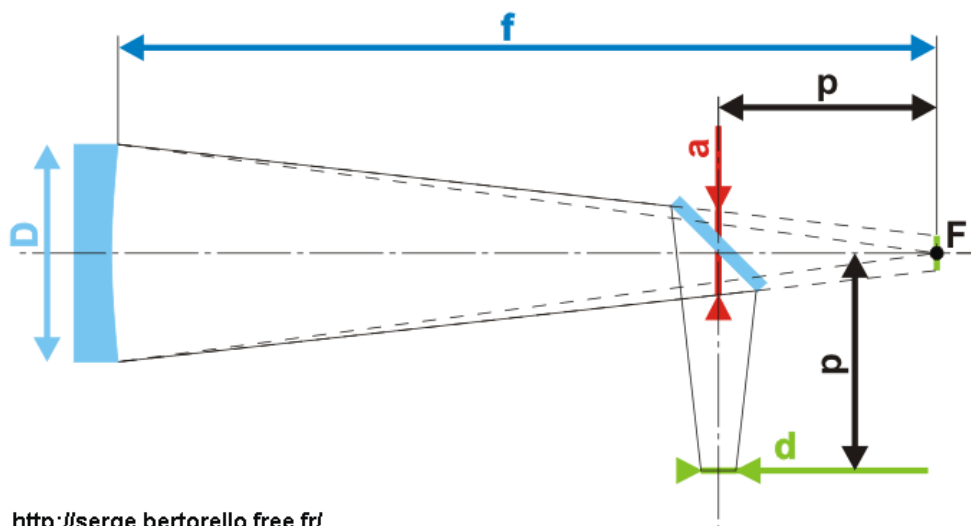


FIGURE 6 - SCHÉMA OPTIQUE

#### 2.3.4. OCULAIRE<sup>8</sup>

Un oculaire est une pièce optique composée de plusieurs lentilles qui est maintenu par le porte-oculaire. Nous pouvons grossièrement comparer sa fonction à celle d'une loupe. Il permet d'obtenir différents grossissements suivant la focale utilisée. Son rôle est prépondérant, puisqu'il détermine en grande partie la qualité finale des images célestes.

La focale constitue le paramètre fondamental d'un oculaire. Sa valeur est exprimée en millimètres. Le grossissement dépend de la focale ; plus la focale est petite, plus le grossissement sera grand.

Pour calculer le grossissement obtenu d'un objet, il suffit de diviser la longueur focale du télescope par celle de l'oculaire. Illustrons ce calcul avec nos données : la focale de notre télescope est de 1015 mm et celle de notre oculaire de 16 mm. Si nous divisons la longueur de la focale du télescope par celle de l'oculaire, nous obtenons un grossissement d'un objet équivalent approximativement à 63 fois sa taille. Ce grossissement permet par exemple de voir le relief lunaire ou d'apercevoir les anneaux de Saturne.

Un fort grossissement sera préférable si nous souhaitons observer des petits détails comme, les cratères de la lune. À contrario un grossissement plus faible sera idéal si nous souhaitons observer des objets célestes étendus, comme les galaxies et les nébuleuses.

Ainsi plus le grossissement est grand, plus l'image observée à travers le télescope sera zoomée. Cependant, il existe des grossissement maximaux et minimaux. Cela ne servira à rien de trop grossir une image car au-delà d'une limite, l'objet céleste

<sup>8</sup> STELVISION, *Oculaires : comment constituer sa gamme idéale ?*  
<https://www.stelvision.com/astro/oculaires-constituer-sa-gamme-ideale/>

regardé ne dévoilera aucun détail supplémentaire et la qualité de l'image risquerait en plus d'être détériorée. En effet, la quantité de lumière que le miroir principal est capable de capter est limitée et se trouve déterminée par son diamètre (en astronomie et en photo : son « ouverture »). À un grossissement trop élevé, la luminosité de l'image serait donc trop faible. Cette limite est donnée par le diamètre du miroir primaire en millimètres et correspond approximativement au double de sa mesure. À noter que ce grossissement maximum reste théorique, car la qualité des images dépend aussi de la qualité du ciel (turbulences atmosphériques, pollution, pollution lumineuse, nuages, etc...). En pratique ce grossissement maximum oscille plutôt entre une et une fois et demie le diamètre du miroir. Par exemple, avec notre miroir de 203 mm de diamètre, il ne faut pas grossir plus de 305 fois ( $1.5 \times 203$ ). Avec ce grossissement, il est possible de voir en détails les stries de Jupiter et les anneaux de Saturne se discernent avec précision.



FIGURE 7 - EXEMPLES DE GROSSISSEMENTS

À contrario, il existe aussi un grossissement théorique minimal qui dépend cette fois-ci de l'œil humain, plus précisément du diamètre de nos pupilles. Ce grossissement minimal est associé au concept de la *pupille de sortie*. Elle correspond au diamètre du cylindre lumineux renvoyé par le télescope, soit l'ensemble des rayons lumineux qui sortent de l'oculaire. Comme le diamètre de la pupille humaine varie entre 5 mm et 7 mm suivant l'âge de la personne, la *pupille de sortie* ne doit pas dépasser cette dernière valeur afin que notre œil puisse capter la totalité de la lumière renvoyée par le télescope. Le grossissement minimal de notre instrument peut être ainsi calculé en divisant le diamètre de notre instrument par 6 (diamètre moyen pour la pupille de sortie). Pour notre télescope nous devons ainsi garder un grossissement supérieur à 33 fois ( $203/6$ ).

Ensuite nous avons le champ de vision, soit la portion du champ visuel couvert par l'instrument. Pour un grossissement similaire, certains oculaires montrent un objet dans sa totalité (grand angle), alors que d'autres se centrent sur une partie. Les oculaires classiques possèdent un champ de  $40^\circ$  à  $50^\circ$ , les plus élaborés peuvent aller au-delà de  $100^\circ$ . L'œil humain couvre naturellement un champ de  $120^\circ$ , c'est pourquoi les oculaires grands angles sont en général préférés.

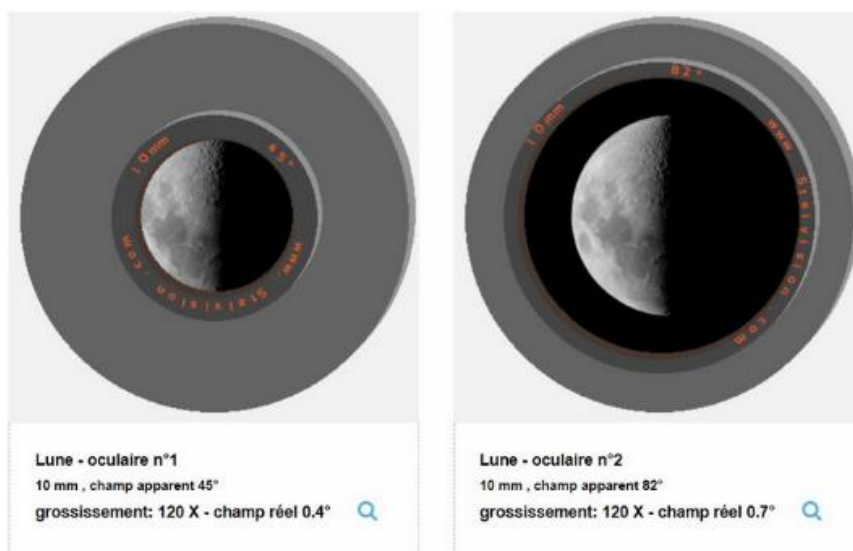


FIGURE 8 - MÊME FOCALE AVEC CHAMP DE VISION DIFFÉRENT

En attendant de pouvoir en acheter, nous avons emprunté les oculaires du télescope du collège, que nous avons fixés au tube à l'aide d'un [porte-oculaire](#) modélisé et imprimé en 3D par nos soins. Le porte-oculaire comporte un système de mise au point nous permettant d'ajuster la distance séparant l'oculaire du miroir secondaire pour garantir la netteté de l'image. Celle-ci nécessite en effet que les rayons se croisent avec précision dans l'oculaire.

### 2.3.5. DÉFINITION DE LA POSITION DES PIÈCES OPTIQUES DU TÉLESCOPE

Les différentes formules et recommandations ci-dessus nous ont permis de définir avec précision la disposition des instruments optiques en fonction de la distance focale du miroir principal. Rappelons que le placement du miroir secondaire dépend donc non seulement de la focale, mais aussi du diamètre du tube, et de l'ajustement disponible dans le porte-oculaire.

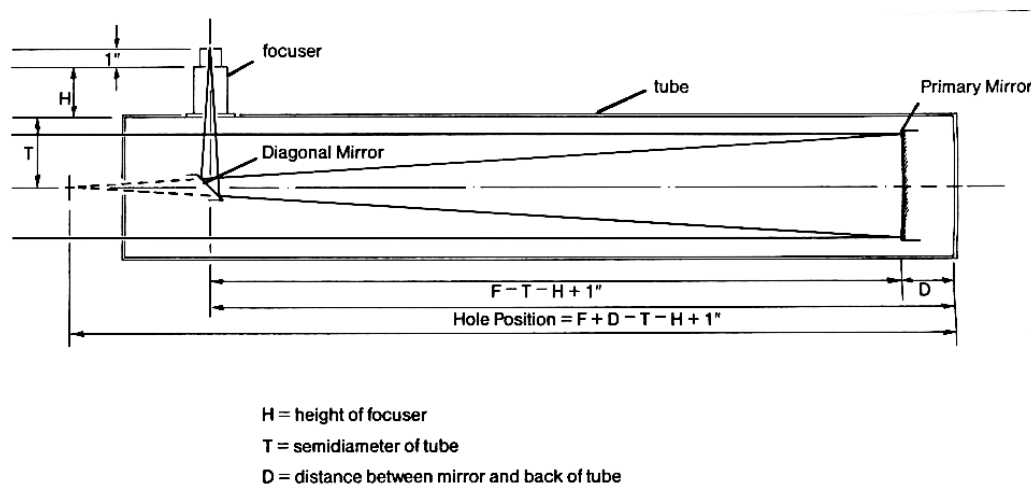


FIGURE 9 - SCHÉMA DU POSITIONNEMENT DES INSTRUMENTS OPTIQUES

Notre miroir possède un diamètre de 203 mm et un ratio focale/diamètre de 5. Les rayons se croisent donc à 1015 mm du centre du miroir. Les formules suivantes permettent de définir les emplacements des divers instruments optiques<sup>9</sup> :

$$D_{focale} = D_{p-s} + R_{tube} + H_{porte\_oculaire}$$

Pour notre télescope, le miroir secondaire est placé à 835 mm du miroir principal et l'oculaire est à 180 mm du miroir secondaire (avec une marge de mise au point de 70 mm). Le porte-oculaire est placé à la même hauteur que le miroir secondaire.

## 2.4. FIXATION

### 2.4.1. SUPPORT DU MIROIR PRINCIPAL : LE BARILLET

Le barillet permet de maintenir et d'orienter le miroir. Il se constitue d'une base qui réceptionne le miroir et d'un système d'ajustement qui permet son orientation.

La fixation du miroir principal doit répondre à une double contrainte : la première, liée aux paramètres de déformation du miroir sous l'effet de son propre poids<sup>10</sup>, la seconde, aux micro-vibrations issues autant des mouvements terrestres que du trafic routier avoisinant qui viendraient immanquablement détériorer la netteté de l'image des objets célestes.

La base de notre support pour le miroir principal se compose donc d'un plateau en bois rond dont le diamètre est légèrement supérieur à celui du miroir. Sur les bords du plateau sont positionnées trois cales permettant de maintenir le miroir en le tenant uniquement sur ses bords afin de le maintenir sans le bloquer pour éviter toute dilatation des composants due aux variations de température. Sur chaque cale, une pièce est fixée afin de verrouiller le miroir et d'empêcher d'éventuels mouvements verticaux.



FIGURE 10 - BARILLET

---

<sup>9</sup> BERRY, Richard, 1985, Build Your Own Telescope. Scribner. ISBN 13 : 9780684184760

<sup>10</sup> Déformations de l'ordre du nanomètre

Pour limiter les effets des inévitables micro-vibrations, le miroir n'est pas posé directement sur le plateau mais est maintenu par un système d'amortisseur. Sur le plan de la physique, la stabilité d'un support est optimisée par un report de poids triangulaire sous forme de trépied. Nous avons ainsi disposé trois triangles de bois, démultipliés par trois points d'appui. Cette stratégie permet de gagner en stabilité et un support en mousse a été utilisé comme amortisseur. Nous avons utilisé le logiciel *Gui Plop*<sup>11</sup>, de David LEWIS, pour déterminer l'emplacement optimal de ces points d'appui.

À ces neuf points de contact, nous avons ajouté un dixième au centre du miroir. Celui permet de mieux répartir le poids du miroir et de limiter les déformations éventuelles en offrant un support central. Si le miroir devait se déformer sous l'effet de son propre poids, ce changement de courbure viendrait altérer la netteté de l'image de réflexion, ce qui, à de forts grossissements, détériorerait l'observation des objets célestes.

En plus maintien du miroir principal, le barillet assure également la fonction de collimation. La collimation consiste à orienter l'assiette du miroir dans différentes directions afin d'assurer que les rayons lumineux convergent vers le miroir secondaire (réglage de l'axe optique). Pour se faire, nous avons posé notre plateau en bois sur trois vis fixées sur un deuxième plateau. En modifiant la hauteur des pointes de chacune des trois vis, le plateau du miroir s'incline en conséquence. Ceci permet à la fois un réglage en trois dimensions de l'orientation du miroir tout en assurant sa stabilité.

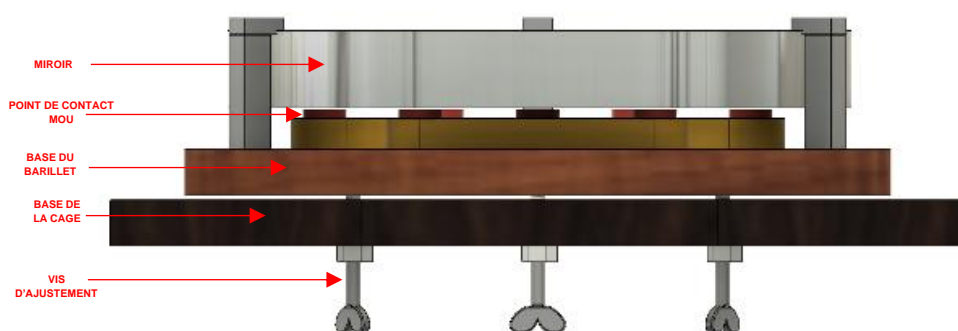


FIGURE 11 - SCHÉMA DU BARILLET (CAO)

---

<sup>11</sup> LEWIS, David, 2012, *Gui Plop* [logiciel]. Version 3.0.6. [Disponible à l'adresse : <https://en.freedownloadmanager.org/Windows-PC/Gui-Plop-FREE.html>]



#### 2.4.2. SUPPORT DU MIROIR SECONDAIRE : L'ARAIGNÉE

Pour fixer le miroir secondaire, nous avons utilisé un rondin en bois, sur lequel est positionné le miroir. Ce support sera par la suite fixé au tube extérieur à l'aide de l'araignée, un dispositif composé de trois tiges filetées.

Comme mentionné ci-dessus, le miroir secondaire doit être orienté selon un angle de  $45^\circ$  par rapport au miroir principal afin d'envoyer les rayons lumineux vers l'oculaire. Le tube central doit ainsi avoir à une de ses extrémités une coupe inclinée à  $45^\circ$  sur laquelle viendra se fixer ce deuxième miroir. Pour obtenir cette découpe précise, nous avons utilisé une scie à onglet, qui est recommandée pour les coupes d'angles.



FIGURE 12 - SUPPORT DU MIROIR SECONDAIRE (CAO)

L'araignée sert à maintenir le miroir secondaire au centre du tube et à l'orienter. Pour la réaliser, nous avons utilisé des tiges filetées que nous avons collées au support. Elles doivent être équidistantes et donc espacées par un angle de  $120^\circ$ . Nous avons découpé de fines fentes verticales dans le tube. Ceci nous permet de déplacer verticalement l'araignée pour régler parfaitement l'espacement des deux miroirs et ainsi s'assurer d'avoir la bonne distance focale.

Le choix des tiges filetées est stratégique car il permet non seulement de régler la distance focale mais aussi de centrer et d'incliner légèrement, si besoin, le miroir. Ce dispositif nous permet ainsi un positionnement précis du miroir secondaire, ce qui limite au maximum les éventuelles imprécisions résultants de la fabrication et de l'assemblage des différentes parties. De plus, les tiges filetées sont un bon compromis entre finesse et rigidité. En effet, il faut que l'araignée soit la plus fine possible pour éviter l'obstruction de l'objectif du télescope mais doit en même temps être assez solide pour éviter tout tremblements du miroir.

Pour finaliser la construction de notre support, il nous reste à coller le miroir sur la surface coupée à  $45^\circ$ . Il faut cependant agir avec ménagement et prendre en compte quelques paramètres, comme avec le miroir principal. Il est important de laisser circuler l'air entre le miroir et son support pour éviter tout problème mécanique lié aux inévitables variations de température et à la différence de coefficient de dilatation entre les différents matériaux utilisés. Comme ce miroir est plat, nous avons



simplement disposé deux fines planchettes de bois de quelques millimètres entre les deux composants créant ainsi un espace vide permettant à l'air de circuler.

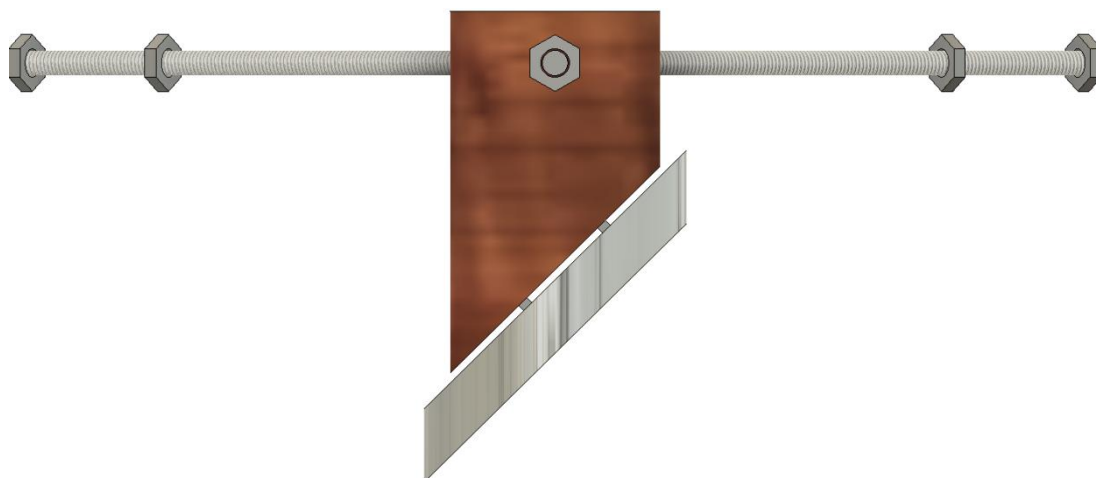


FIGURE 13 - SUPPORT DU MIROIR SECONDAIRE (CAO)

#### 2.4.3. SUPPORT DES OBJECTIFS : LE PORTE OCULAIRE

Comme nous l'avons vu, le porte-oculaire est le dispositif qui permet de fixer les différents oculaires au télescope, de régler la distance focale et de faire la mise au point de l'image. Nous aurions pu acheter un porte-oculaire pour nous éviter toute contrainte conceptuelle ou mécanique, mais le budget pour un porte-oculaire de qualité et le défi nous ont convaincus de le construire nous-mêmes.

Nous devons donc répondre à trois enjeux : 1) assurer un bon alignement avec le miroir secondaire, 2) permettre un changement pratique et surtout rapide d'oculaires en fonction des coefficients de grossissement nécessaires, et 3) autoriser la mise au point de la netteté. Nous l'avons en premier temps conceptualisé sur *Fusion 360*, puis nous l'avons fait imprimer en 3D au SEM grâce à la coopération de Monsieur Bertrand EMERY. Le porte-oculaire se compose d'une base sur laquelle vient se fixer un tube.

Pour aligner facilement le porte-oculaire avec le miroir secondaire, nous avons imaginé un système de coulissage. Nous avons placé deux fentes sur la base du porte-oculaire. Il suffit de faire coulisser deux vis le long de ces fentes pour obtenir l'alignement nécessaire. Un boulon muni d'une rondelle de protection permet de stabiliser chaque vis.

Pour fixer les oculaires, nous avons disposé trois petites vis de blocage sur le cylindre intérieur. Ceci nous permet de changer rapidement et facilement d'objectif.

Finalement, pour permettre une mise au point rapide et précise, nous avons imaginé un système à pas de vis. Ce mécanisme nous permet ainsi un réglage plus précis de la distance entre l'oculaire et le miroir secondaire.

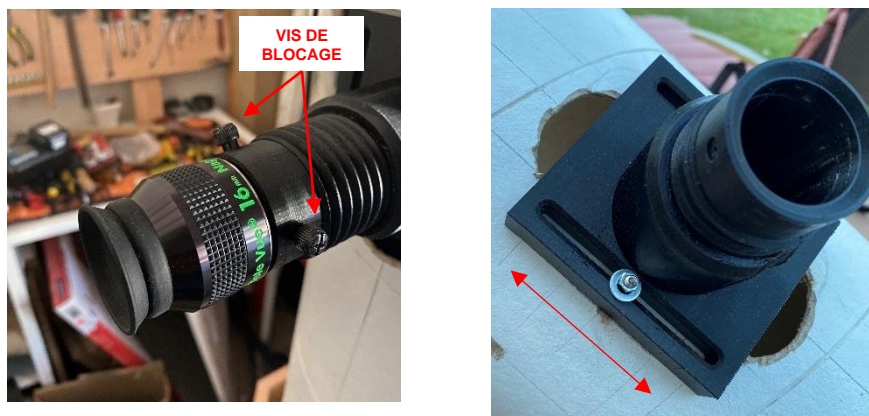


FIGURE 14 - PORTE OCULAIRE

## 2.5. POINTER LES OBJETS CÉLESTES : LE CHERCHEUR

Pour pointer précisément des objets dans le ciel, il nous faut un chercheur. Sans cet accessoire indispensable, tout amateur peinerait à se repérer parmi les milliers de points lumineux habillant le ciel. C'est pourquoi la grande majorité des télescopes en sont équipés.

Nous avons opté pour un chercheur dit « point rouge ». Il ne modifie pas l'image du ciel, mais projette un petit point rouge sur une vitre, ce qui permet de voir en transparence, quel astre nous voulons pointer. Le pointage se fait de manière très intuitive et lorsqu'il est bien réglé, le marqueur indique le centre du champ de vision du télescope.<sup>12</sup>



FIGURE 15 - CHERCHEUR MONTÉ AU TELESCOPE

Nous avons disposé le chercheur de l'autre côté du tube à la même hauteur que le porte-oculaire. Cet emplacement s'avère optimal en particulier pour notre duo puisqu'il nous permet simultanément de centrer pour l'un et de regarder dans l'objectif pour l'autre. Lorsque le grossissement optique est important, le moindre effleurement du dispositif risque en effet de faire sortir l'objet céleste du champ de vision du télescope. A l'instar d'un bras de levier, le déplacement du dispositif entraîne un déplacement visuel proportionnel au coefficient optique. Lorsque l'objet

<sup>12</sup> WEBASTRO, auteur inconnu, 3 octobre 2017. <https://www.webastro.net/noctua/les-différents-matériels/chercheurs-et-pointeurs-réglages-et-utilisation-r50/>

céleste est soudain perdu, cette disposition permet à celui qui assure le pointage de le retrouver facilement sans entraîner d'autres perturbations.

## 2.6. MONTURE

Le télescope est constitué de deux parties, aussi importantes l'une que l'autre ; le tube qui comprend l'optique et qui peut être comparé à une longue vue, et la monture, qui permet de pointer ce qui nous intéresse et assure la stabilité de l'ensemble. Il existe deux types de montures, azimutale (ou horizontal) et équatoriale, qui ont chacune leurs points forts et leurs limitations.

La monture équatoriale organise les mouvements sur la base de l'axe de l'étoile polaire. Une fois l'axe de la latitude (axe horizontal) et de l'azimut (axe vertical) définis sur cette étoile de référence, un système de rotation permet un déplacement fluide et continu qui. Si le télescope est automatisé, ne nécessite qu'un seul moteur. Elle est ainsi particulièrement adaptée pour le suivi des étoiles en compensant le mouvement de rotation de la terre grâce à des fins ajustements. Si elle est efficace, elle n'est pas facile d'utilisation pour un amateur puisqu'elle nécessite un ensemble de préréglages définis avant de pointer l'objet céleste. Elle est surtout particulièrement difficile à réaliser sur le plan technique. De petites imperfections risquent de la rendre très vite inutilisable. Surtout, il ne permet que le suivi d'un astre que l'utilisateur pointe, mais ne peut pas être dirigé automatiquement.<sup>13</sup>

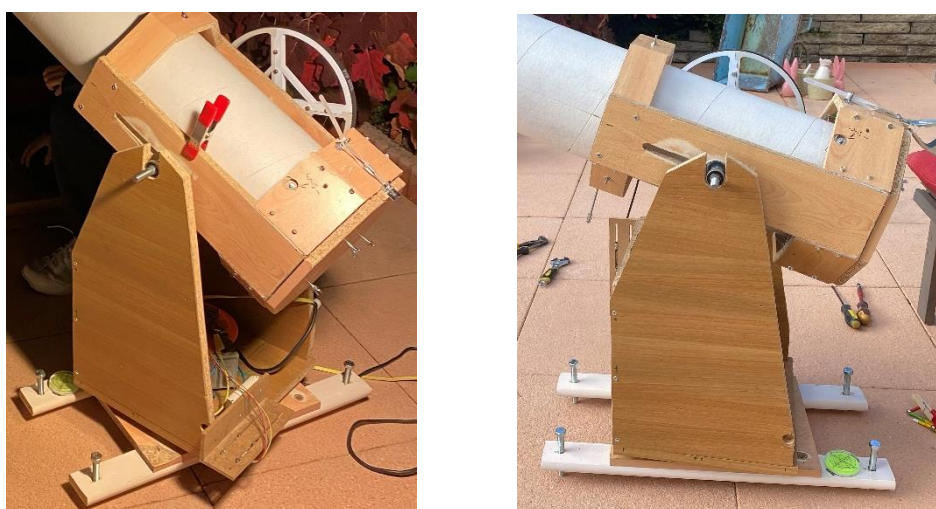


FIGURE 16 - DIFFÉRENTES VUES DE NOTRE MONTURE

La monture azimutale organise le pointage des objets célestes en décomposant le mouvement en fonction des deux axes que sont la latitude et l'azimut. Le tube est ainsi déplacé d'un certain nombre de pas suivant la latitude puis d'un certain nombre de pas suivant l'azimut, comme en escalier. Si le télescope est automatisé, il nécessite deux moteurs l'un gérant la latitude et l'autre l'azimut. Si sa manipulation pour le suivi d'étoiles est un peu plus complexe, sa construction est au contraire

---

<sup>13</sup> Il existe des montures équatoriales qui peuvent pointer un astre automatiquement, mais elles sont très complexes et rares.

beaucoup plus simple puisque le mouvement se décompose toujours selon la grille latitude-azimut.

Nous avons opté pour une monture azimutale en raison de sa simplicité de conception et d'utilisation. Cette configuration permet de d'orienter facilement le télescope et de pointer efficacement différents objets célestes.<sup>14</sup>

Parmi les différentes montures azimutales, le système Dobson est particulièrement répandu. Il est souvent privilégié par les amateurs, notamment pour sa stabilité, sa facilité et son faible coût de construction. Son principal désavantage reste sa structure imposante qui le rend difficile à transporter.

### 2.6.1. CENTRE DE GRAVITÉ

Il est primordial de placer l'axe de rotation sur le centre de gravité du télescope, afin d'éviter que celui-ci ne bouge sous l'effet de son propre poids.

Nous avons initialement imaginé un système à rails. Quatre tubes auraient été placés à gauche et à droite du tube. Sur ces tubes aurait été fixé l'axe de rotation. Sa position aurait été modifiée à l'aide d'un système d'étaux, les mâchoires de l'étau étant serrées à l'aide d'un boulon et d'un écrou.



FIGURE 17 - SYSTÈME D'ÉTAUX

Nous avons rapidement abandonné cette idée car elle était trop complexe à mettre en place, diminuait la rigidité de la structure et nécessitait une très grande précision dans l'alignement des deux rails.

---

<sup>14</sup> Wikipédia, Monture azimutale, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Monture\\_azimutale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Monture_azimutale)

La solution finale se rapproche du concept précédent, à la différence que nous n'utilisons pas des rails, mais une fente dans laquelle glisse l'axe. L'axe étant fileté, il nous est possible d'en fixer la position à l'aide de deux écrous.



FIGURE 18 - CAGE AVEC AXE MONTÉ

Ceci permet de fixer le centre de gravité en deux temps : tout d'abord de façon approximative en couissant les vis le long des fentes puis d'assurer les derniers ajustements à l'aide d'aimants et de pinces à linge. Ainsi, nous gagnons en rapidité d'ajustements autant qu'en précision.

## 2.6.2. ROULEMENTS

Pour orienter notre télescope, nous avons disposé deux petits roulements à billes sur l'axe vertical et une butée à billes de 120 mm sur l'axe azimutal. Nous avons acheté ces roulements sur le site <https://www.123roulement.com>.



FIGURE 19 - BUTÉE À BILLE (AXE VERTICAL) DANS SON SOCLE

Lors de la conception, nous pensions initialement que les frottements seraient une contrainte majeure pour la motorisation. En effet avec le poids conséquent de toutes les différentes parties du télescope, nous sommes partis du principe qu'il faudrait les limiter au maximum pour faciliter tant la rotation du télescope que celle des moteurs. C'est pour éviter au mieux cette contrainte que nous nous sommes largement documentés sur les principes de roulement à billes.

Cette hypothèse ne s'est finalement pas confirmée avec le type de roulement choisi. La qualité du modèle acheté limite au maximum les frottements ce qui assure une fluidité de déplacement à notre télescope. En fait, notre télescope tourne presque



trop bien ce qui parfois rend difficile son équilibrage. L'enjeu est ici de trouver un juste milieu entre frottements et mouvement, c'est-à-dire ne pas avoir trop de frottements pour permettre une rotation fluide du télescope mais en avoir tout de même assez pour éviter tout mouvement indésiré.

Pour optimiser le fonctionnement de notre télescope tout en privilégiant sa stabilité, nous avons tendu au maximum les courroies de transmission (cf. [4.5 Transmission](#)), configuré les moteurs de sorte à limiter le mouvement du tube, et nous avons mis de la graisse pour vélo de manière à réduire l'efficacité des roulements. Ces petits ajustements sont venus aider le fonctionnement même si la solution trouvée gagnerait encore à être perfectionnée. Finalement, nous avons choisi de n'utiliser le télescope qu'avec les moteurs, qui servent de frein car ils restreignent la rotation une fois sous tension.

## 3. PROGRAMME

### 3.1. SYSTÈME DE COORDONNÉES

Il existe plusieurs systèmes de coordonnées pour repérer les astres dans le ciel. Pour l'observation amateur, les deux plus utilisées sont l'horizontal, et l'équatorial. Ces deux systèmes utilisent un repère de coordonnées sphériques, c'est-à-dire que la position d'un objet est donnée par deux angles et un éloignement par rapport à l'origine. Dans le cas du système horizontal que nous utilisons, l'éloignement est constant, l'angle d'élévation, mesuré par rapport à l'horizon, s'appelle « l'*altitude* » et est compris entre 0° et 90°, et la longitude, mesurée par rapport au nord, est « l'*azimut* » et est comprise entre 0° et 359°.

Nous avons évoqué plus haut l'existence de montures équatoriales. Celles-ci, comme leur nom l'indique, ont pour référence l'équateur, donc le plan de rotation de la terre ; avec ce type de monture, il est logique d'utiliser un système équatorial. Cette idée s'applique également aux montures azimutales (ou horizontales) comme le Dobson ; notre monture a pour référence l'horizon, donc il est logique d'utiliser le système horizontal.

Avec ce système, l'inclinaison du télescope par rapport au sol correspond à l'altitude, et son orientation par rapport au nord à l'azimut. Si on utilise des moteurs pour contrôler sa rotation sur ces deux axes, il nous sera possible de pointer automatiquement n'importe quel point dans le ciel.

### 3.2. POSITION DES ASTRES

#### 3.2.1. PYEPHEM

Pour calculer la position des astres, nous utilisons Python et la librairie astronomique *PyEphem*. *PyEphem* est un module développé par Brandon Craig Rhodes, qui facilite le calcul de la position d'objets astronomiques sur le langage Python. Il se base lui-même sur la librairie *XEphem*.<sup>15</sup> Nous l'avons choisi d'une part car il est en utilisation libre, et d'autre part car la syntaxe est assez claire et compréhensible.

```
>>> geneva = ephem.Observer()
>>> geneva.lat = "46.207417"
>>> geneva.lon = "6.156022"
>>> geneva.date = ephem.now()
>>> mars.compute(geneva)
>>> print mars.az, mars.alt
37:55:48.9 -14:23:11.8
```

---

<sup>15</sup> RHODES, Brandon, *PyEphem*, <https://rhodessmill.org/pyephem/index.html>

Grace à ce module, il est très facile de déterminer l'altitude et l'azimut d'un astre ; *PyEphem* se charge de faire les calculs pour nous. Nous n'avons qu'à entrer les coordonnées de l'observateur (ou de choisir un lieu parmi une liste prédéfinie) et à préciser l'astre qui nous intéresse.<sup>16</sup> *PyEphem* dispose d'une liste d'objets dont on peut connaître les caractéristiques, mais cette liste peut être allongée via un « catalogue », sorte de document qui contient les éléments nécessaires au calcul de la position d'un objet donné. L'implémentation d'un catalogue est une amélioration que nous souhaiterions effectuer prochainement.

Après avoir obtenu la position de l'astre, le programme vérifie si l'altitude est bien positive, c'est-à-dire que l'astre est au-dessus de l'horizon et donc bien visible. Si ce n'est pas le cas, le calcul est ignoré et nous sommes invités à entrer un nouvel astre.

### 3.2.2. MÉMOIRE

La position calculée par *PyEphem* est stockée sous forme de `float` (nombre à virgule) dans un fichier CSV (*Comma-separated values*). Le CSV est un protocole qui permet de stocker sur un fichier texte des valeurs de la même façon que sur un tableau Excel, mais il possède l'avantage d'être lisible et modifiable par tout type d'ordinateur, sans nécessairement avoir de logiciel tableur. De plus, il existe un module Python (le module CSV) qui permet la communication entre le code et ce fichier. L'exemple suivant est un fichier texte qui contient l'altitude (ligne 1) et l'azimut (ligne 2) de la Lune vue depuis Genève le 1<sup>e</sup> janvier 2000 à minuit selon le protocole CSV :

```
-31.05241004251996
69.38651891013636
```

### 3.2.3. CALCUL DE LA « DISTANCE À PARCOURIR »

*PyEphem* nous permet de connaître l'altitude et l'azimut à un instant  $t$ , mais cela n'est pour nous pas suffisant. En effet, nous devons orienter le télescope, et pour cela, nous devons indiquer aux moteurs la rotation à effectuer. Ainsi, nous avons besoin de garder en mémoire la position actuelle des moteurs (position de l'astre au temps  $t_0$ ), et calculer la différence par rapport à la position souhaitée (position de l'astre au temps  $t_1$ ).

Pour l'altitude, qui est limitée entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , le calcul est facile : il suffit de soustraire l'ancienne position (A) à la nouvelle (B).

```
def to_travel_alt(A, B):
    return (B-A)
```

En revanche, trouver la différence pour l'azimut est plus compliqué ; du fait que celui-ci va de  $0^\circ$  à  $359^\circ$ , il est possible de se retrouver dans une situation où « on passe par 0 », c'est-à-dire que A se trouve entre  $270^\circ$  et  $259^\circ$ , et B entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  (ou inversement). La méthode précédente (B-A, « `sol1` ») ne nous donnerait donc

---

<sup>16</sup> NAIR, Prasanth, *Astrometry in python with PyEphem*,  
<https://asimpleweblog.wordpress.com/2010/07/04/astrometry-in-python-with-pyephem/>



pas le chemin le plus court. Dans cette situation, nous devons calculer les différences entre A et 0°, et B et 0°, puis les additionner (« sol2 »). Mais cette solution serait inefficace si A et B ne se trouvent pas dans des moitiés opposées du cercle trigonométrique, et nous tomberions dans la même situation qu'avant, avec le programme qui nous indique le chemin le plus long. La solution est de déterminer sol1 et sol2, et d'en choisir la plus courte à l'aide Instructions conditionnelles. Ensuite, pour connaître la direction dans laquelle tourner (selon le sens trigonométrique), nous effectuons les tests suivants, et en fonction du résultat, multiplions sol par  $\pm 1$ .

```
def to_travel_az(A, B):
    sol1= abs(A-B)
    sol2= 360-max(A, B) + min(A, B)
    sol= min(sol1, sol2)
    if sol1<sol2:
        if A<=B:
            pass
        else:
            sol*=-1
    else:
        if A<=B:
            sol*=-1
        else:
            pass
    return(sol)
```

Notons qu'il existe d'autres façons de calculer cette différence (via des vecteurs notamment), mais celle-ci nous est venue en premier.

### 3.3. ALIGNEMENT

#### 3.3.1. POSITION, DATE ET HEURE, ALTITUDE

Comme le soleil qui ne se trouve pas à la même position pour un observateur à Genève ou à Sidney, le ciel nocturne dépend de l'emplacement de l'observateur. Il faut donc qu'on précise les coordonnées géographiques du télescope au lancement du programme de suivi. *PyEphem* dispose d'une liste de villes dont la position est préprogrammée. Par chance, Genève y figure, mais il est évidemment possible d'entrer l'emplacement manuellement.

Enfin, la date et l'heure influent sur le ciel nocturne, tout simplement parce que la Terre tourne autour du soleil et sur elle-même, et que donc la partie du ciel que nous voyons de nuit change aussi.

Il est également possible de spécifier la pression atmosphérique, qui provoque une distorsion de la lumière qui influent sur la position apparentes des astres dans le ciel, mais par souci de simplicité, nous l'ignorons ; le grossissement de notre télescope ne requiert pas une telle précision.

### 3.3.2. CALIBRATION

La calibration du télescope se fait sur deux plans ; d'une part, il faut indiquer au cerveau l'orientation du télescope par rapport aux points cardinaux, en d'autres termes régler l'azimut, et cela se fait usuellement en pointant le nord. D'autre part, il faut définir une altitude de référence en orientant le tube à un angle précis. Ces deux étapes peuvent être faites simultanément en pointant l'Étoile Polaire, ou une autre étoile facilement reconnaissable, généralement Véga en été et Sirius en hiver.

Une fois le télescope calibré, les coordonnées de l'astre visé sont sauvegardées sur le fichier CSV en tant que « dernière position connue » et servent de point de départ pour tout mouvement des moteurs.

Pour l'heure, nous avons décidé d'ignorer les calibrations liées au niveau du sol ; nous partons du principe que le télescope est posé sur une surface plate, et pour ce faire, nous ajustons l'assiette du télescope à l'aide de 4 vis qui servent de pieds, et de deux niveaux à bulles. Il est théoriquement possible de connaître l'inclinaison du plan de rotation du télescope par rapport au sol à l'aide d'une calibration à deux astres, mais nous préférons nous concentrer sur le module de pointage pour l'instant. Nous pensons implémenter cette option dans une future mise à jour du programme.

### 3.4. GOTO

Pour pointer un astre, l'ordinateur calcule la « distance à parcourir » pour les deux axes via les [fonctions expliquées plus haut](#). Pour ce calcul, la « dernière position connue » est l'astre dernièrement pointé, soit via la calibration ou alors lors du précédent pointage. Ces distances à parcourir correspondent aux angles que le télescope doit parcourir, et par extension, le déplacement des moteurs. Donc, une fois cette distance calculée, le programme ordonne aux moteurs d'effectuer une certaine rotation, qui est définie via cette distance et l'avantage mécanique des moteurs ([cf. 4.5.1 Avantage mécanique](#)).

Une fois le télescope correctement pointé, les coordonnées de l'astre visée remplacent la « dernière position connue » et le processus peut recommencer.

### 3.5. SUIVI EN TEMPS RÉEL

Nous avons pensé à deux façons d'implémenter un module de suivi en temps réel. La première est de tourner les moteurs de sorte que le télescope tourne à la même vitesse que la terre. La seconde est de régulièrement actualiser le programme `goto`. Cette dernière serait bien plus simple à implémenter, bien que moins élégante.

Nous n'avons pour l'heure pas inclus ce mode en raison de certains problèmes mécaniques, mais nous comptons le faire une fois ceux-ci résolus.

## 4. MOTORISATION

### 4.1. MOTEURS UTILISÉS

Comme expliqué plus haut, le télescope doit être dirigé sur deux axes, et ce, le plus finement possible. Parmi les différents types de moteurs disponibles, l'un est spécifiquement conçu pour la précision : les moteurs pas-à-pas (ou *steppers motors* en anglais). Ces moteurs, à courant continu, sont dirigés par pas incrémentsaux, ce qui leur confère une grande précision. À l'intérieur du moteur se trouve le rotor (partie interne mobile à laquelle est fixé l'axe) qui est au centre du stator (partie externe immobile). Sur le rotor se trouvent plusieurs aimants qui ont de petites dents sur l'extérieur. Le stator comprend des électroaimants et des dents qui correspondent à ceux sur le rotor. Les électroaimants sont indépendants les uns des autres et selon l'ordre et la disposition dans lequel ils sont alimentés, le rotor tourne un certain nombre de pas.<sup>17</sup>

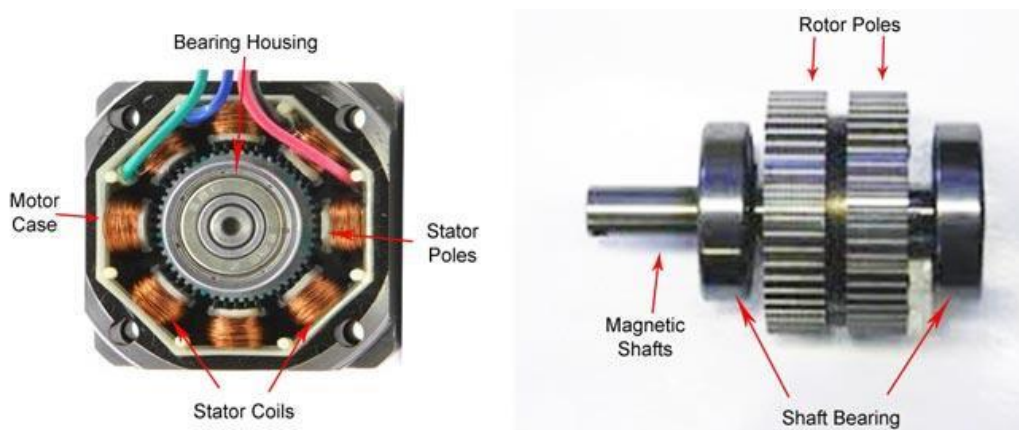


FIGURE 20 - SCHÉMA EXPLICATIF D'UN MOTEUR PAS À PAS

La précision des moteurs est déterminée par le nombre de dents du rotor et est mesurée par le nombre de pas nécessaire pour faire un tour complet, généralement 200 (le moteur tourne donc par incréments de  $1.8^\circ$ )

Les *steppers* ont également plusieurs modes de fonctionnement : en temps normal, un seul électroaimant est alimenté (mode SINGLE), mais si deux électroaimants opposés sont utilisés en même temps (mode DOUBLE), on peut augmenter le couple d'environ 25%. En combinant le mode SINGLE et DOUBLE, il est possible de doubler le nombre de pas et donc la précision (mode INTERLEAVE). Enfin il est possible de contrôler précisément l'intensité dans chaque électroaimant afin d'obtenir une très grande précision à l'aide d'une technique appelé le *microstepping* ; il est ainsi possible d'obtenir jusqu'à 32x plus de pas mais le couple est très réduit.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> WOODFORD, Chris, Stepper motors, <https://www.explainthatstuff.com/how-stepper-motors-work.html>

<sup>18</sup> LADY ADA, AdaFruit, <https://learn.adafruit.com/adafruit-dc-and-stepper-motor-hat-for-raspberry-pi/using-stepper-motors>

Pour notre application, nous utilisons le mode INTERLEAVE ; si on multiplie le nombre de pas par le ratio entre la petite et la grande poulie, on arrive à une précision de  $0,1^\circ$  tout en conservant un couple adéquat (cf. [4.5.2 Avantage mécanique](#)).

Nos moteurs sont des NEMA-17-03 (achetés sur <https://www.conrad.fr/>). Ils ont une précision de 200 pas et un couple de maintien de 0.2Nm.

## 4.2. CONTRÔLE (CERVEAU)

Le cerveau de toute l'opération est un mini-ordinateur spécifiquement crée pour les projets d'électronique : le RaspberryPi. Cet ordinateur, de la taille d'une carte de crédit, n'est pas d'une puissance spectaculaire, mais reste largement suffisant pour notre application.<sup>19</sup> Le Raspberry embarque 40 ports *GPIO* (*General Purpose Input/Output*) pour interagir avec le monde qui l'entoure.<sup>20</sup> Ces ports permettent notamment d'interagir avec des cartes de contrôle, qui elles contrôlent les moteurs.

En effet, nos moteurs sont alimentés en 4.8V, mais consomment 1.2A. Cette intensité est bien trop élevée pour être fournie directement par le Raspberry, donc un microcontrôleur est utilisé. Celui-ci est alimenté selon les besoins du moteur, et sert en quelque sorte d'interrupteur. Il est ainsi possible d'alimenter des composants très gourmands en énergie sans brûler l'ordinateur. Nous utilisons la carte *Adafruit DC and Stepper Motor HAT for Raspberry Pi*, qui s'attache directement au-dessus du Raspberry et est alimenté indépendamment de l'ordinateur. Cette carte permet de contrôler deux *steppers*, ce qui est parfait pour notre application.

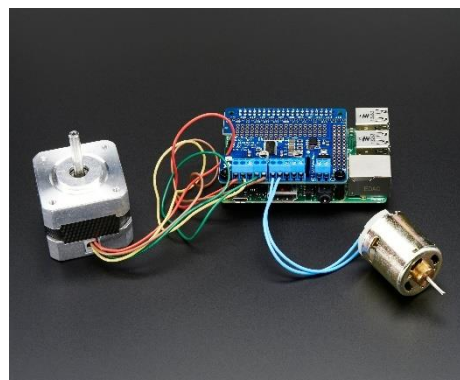
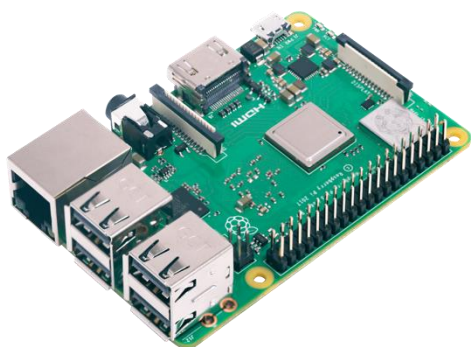


FIGURE 21 - RASPBERRYPI ET MICRO-CONTROLEUR

Le Raspberry peut comprendre des instructions du langage de programmation Python ce qui tombe bien car les calculs sont également écrits en Python. Nous avons écrit un programme qui récupère les données du programme de calcul et qui détermine le nombre de pas que doit faire chaque moteur : il s'agit simplement de multiplier le nombre degrés à parcourir par 10 (cf. [Avantage mécanique](#)) et de déterminer dans quel sens les moteurs doivent tourner.

---

<sup>19</sup> Wikiédia, *Raspberry Pi*, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)

<sup>20</sup> Wikipédia, *General Purpose Input/Output*, [https://fr.wikipedia.org/wiki/General\\_Purpose\\_Input/Output](https://fr.wikipedia.org/wiki/General_Purpose_Input/Output)

### 4.3. CODE

Adafruit fournit une bonne documentation sur leur module de contrôle du microcontrôleur. Après avoir désigné les moteurs, nous pouvons utiliser la fonction `onestep()` qui indique au stepper de tourner d'un pas. Si on laisse l'intérieur des parenthèses vide, le mode SINGLE sera utilisé par défaut ; c'est à dire qu'un pas correspond à 1/200 de tout, ou 1.8°. Comme dit plus haut, nous utilisons le mode INTERLEAVE, qui double notre précision, avec la commande qui suit :

```
kit.stepper1.onestep(style=stepper.INTERLEAVE)
```

Cette ligne permet donc de tourner le moteur de 0.9°, et nous savons que nous avons un avantage mécanique d'1/9, donc un pas du moteur correspond à 0.1° de rotation de la grande poulie. Nous récupérons donc le résultat de la fonction « `to_travel()` » et la multiplions par 10, puis réitérons ce nombre de fois la fonction `onestep()` (opération répétée indépendamment pour l'altitude et pour l'azimut). Voici un exemple pour l'altitude :

```
n = to_travel_alt(pos1_alt, pos2_alt) * 10
for i in range(n):
    kit.stepper1.onestep(style=stepper.INTERLEAVE)
```

### 4.4. ALIMENTATION

Ultimement, un télescope se doit d'être transportable. Après tout, ce n'est pas au milieu de la ville que nous aurons la plus belle vue des étoiles. Ultimement, nous voulons être entièrement indépendant d'une source de courant. Il existe moult solutions, la plus évidente étant d'intégrer des batteries au télescope. Pour l'instant, nous utilisons des alimentations qui sont branchées sur secteurs.

Les moteurs consomment 5.8W (4.8V, 1.2A) et sont branchés au microcontrôleur, qui est lui-même connecté à l'alimentation. Le Raspberry est alimenté par un chargeur de téléphone.

### 4.5. TRANSMISSION

#### 4.5.1. AVANTAGE MÉCANIQUE

Plusieurs roues qui interagissent entre elles sont liées par le principe de l'avantage mécanique. Ce principe décrit la façon par laquelle un système d'engrenages, de roues ou de leviers multiplie une grandeur qui lui est propre. Dans le cas de deux roues, la vitesse angulaire et le couple transféré dépendent du ratio entre leur diamètre. Simplement dit, une petite roue qui en entraîne une plus grande la fera tourner plus lentement mais avec un couple plus élevé.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> Wikipédia, Mechanical advantage,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical\\_advantage](https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_advantage)

$$\frac{\text{diamètre roue 1}}{\text{diamètre roue 2}} = \frac{\text{vitesse angulaire roue 1}}{\text{vitesse angulaire roue 2}} = \frac{\text{couple roue 1}}{\text{couple roue 2}}$$

Ce principe est notamment utilisé dans les vitesses des vélos (lien entre la difficulté et la vitesse), ou dans l'horlogerie mécanique (lien entre la taille des pignons et leur vitesse de rotation).

Dans notre cas, nous avons choisi un ratio d'1/9. Le plus petit multiple commun entre 360 et 200 est 1800, qui divisé par 200 vaut 9. Cela veut dire que pour un tour complet de la petite poulie, la grande aura tourné de 40°, et que pour chaque pas du moteur, la grande roue tourne de 1/5° (et de 1/10° si on utilise le mode INTERLEAVE). Ce facteur doit être pris en compte lors du contrôle des moteurs.

Nous aurions pu augmenter la précision en choisissant un ratio plus grand, mais la grande poulie aurait été trop large.

#### 4.5.2. COURROIES

Parmi les nombreuses options de transmissions, nous avons choisi un système de poulies et de courroies. Ce système est un bon compromis entre facilité de fabrication, d'installation et précision.

Nous avons d'abord envisagé un système de vis sans fin : une vis placée de manière tangente à une roue dentée l'entraîne avec une très grande précision. Cette configuration permet un très grand avantage mécanique d'une façon assez compacte. En revanche, ce système ne fonctionne que dans un sens ; il n'est pas possible d'entraîner la vis en tournant la roue, et le contrôle manuel était important pour nous. De plus, la fabrication de ce type de système nécessite des outils spécialisés, sans compter les difficultés pour connecter la vis au moteur.

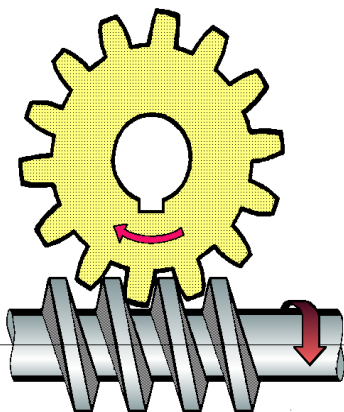
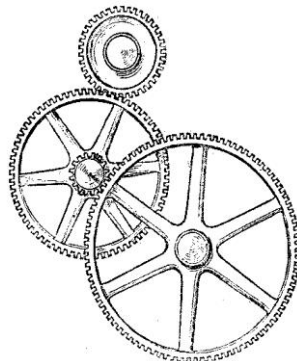


SCHÉMA D'UNE VIS SANS FIN



SYSTÈME D'ENGRENAGES



SYSTÈME DE COURROIE

FIGURE 22 - DIFFÉRENTES TRANSMISSIONS

Une autre possibilité aurait été d'utiliser un système d'engrenages externes sur l'axe horizontal (l'altitude) et un système d'engrenages internes pour l'axe vertical (l'azimut). Ce système a pour principal défaut la difficulté à aligner correctement les pièces lors de l'assemblage, et la construction des roues aurait nécessité une CNC pour avoir un profil de dent régulier.



Finalement, nous avons opté pour le système de courroie car il est assez facile à comprendre et à fabriquer, et qu'il permet une grande flexibilité lors de l'assemblage, tout en gardant une précision convenable.

Nous avons acheté deux courroies dentées, d'un profil 5M (5mm entre chaque dent) sur le site [www.123courroies.com](http://www.123courroies.com). Les dents évitent que la courroie glisse sur la poulie (qui est également dentée) et assurent un transfert du couple avec le moins de perte possible. Les poulies ont quant à elles été modélisés et imprimés en 3D.

Les courroies sont tendues en ajustant la distance entre les poulies ; le moteur, sur lequel est placée la petite, peut être déplacé le long d'une fente pour augmenter la tension dans la courroie.

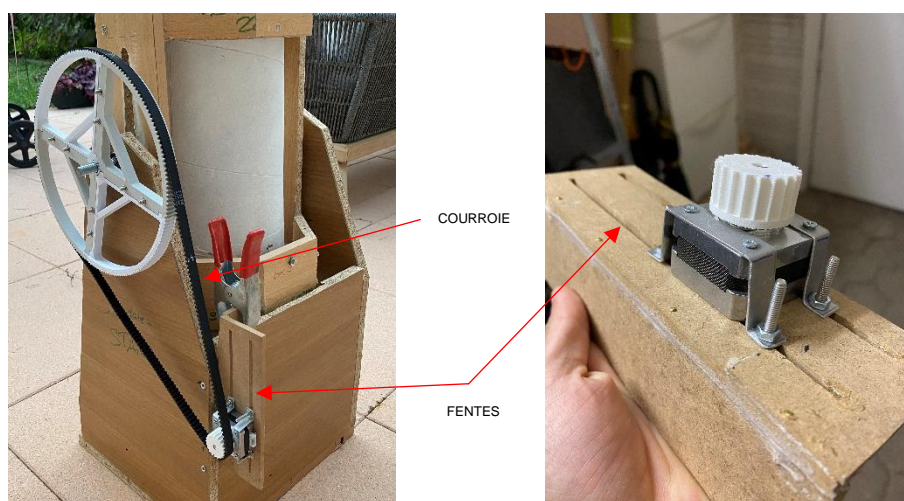


FIGURE 23 - TRANSMISSION ALTITUDE

#### 4.5.3. MODÉLISATION ET IMPRESSION 3D

Les poulies, qui sont entraînées par les courroies, ont été particulièrement difficiles à dimensionner.

L'idée de base vient de *Jake's Blog*<sup>22</sup>, qui a motorisé un télescope préexistant avec un système de poulies et de courroies. Les grandes roues sont trop larges pour être imprimées en une fois ; nous les avons donc découpées en quatre parties qui s'emboîtent l'une dans l'autre. Les petites poulies ont été imprimées en une fois. Mais là n'était pas la difficulté. Le véritable défi est d'obtenir le bon module, soit la taille et l'espacement des dents.

Aligner les dents était très difficile car nous sommes partis de zéro. Pour obtenir leur profil, nous avons pris une image d'internet que nous avons recopiée, puis nous l'avons mise aux bonnes dimensions avant d'entourer un disque avec les dents. Nous avons choisi le diamètre des poulies par rapport aux dents : 180 dents pour la grande et 20 pour la petite. Les dents sont espacées de 5mm, ce qui nous donne des périmètres 900mm et 100mm respectivement. Divisé par pi, nous obtenons environ 286.5mm de diamètre pour la grande et 31.8mm pour la petite. Avant de les imprimer

---

<sup>22</sup> « Jake », *Jake's Blog*, <https://blog.ja-ke.tech/>

au SEM, nous avons demandé à Arnaud BUCHEL, un ami qui a une imprimante 3D, de les imprimer pour tester le module, et à notre grande surprise, celui-ci ne correspondait pas : les dents étaient trop espacées.

Nous avons réussi à déterminer le bon module pour les petites poulies en réduisant graduellement l'échelle du dessin original ; 84% du module initial semble être correcte. Mais lorsque nous avons appliqué notre trouvaille aux grandes roues, celles-ci étaient toujours trop grandes. Après mûre réflexion, ainsi que de nombreux essais, Arnaud a trouvé la solution : la distance entre les dents sur la courroie doit être conservée. Sur un plan plat, celle-ci correspond à la distance entre deux dents, et sur un disque, à l'arc de cercle entre les sommets des dents. Nous avons donc appliqué cette formule aux poulies, et le module correspondait parfaitement.

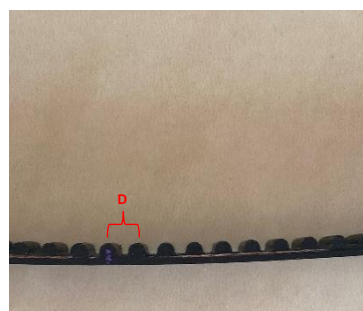
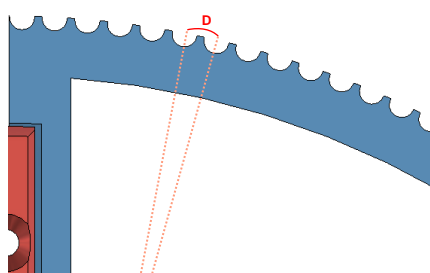


FIGURE 24 - SCHÉMA DU MODULE

L'imprimante d'Arnaud reste cependant inadéquate pour imprimer de gros volumes. Nous avons fait appel à monsieur Bertrand EMERY du *Service Media et Image (SEM)* du DIP qui a gentiment accepté de nous aider. Nous y avons également imprimé le porte oculaire et le socle de la butée à bille.

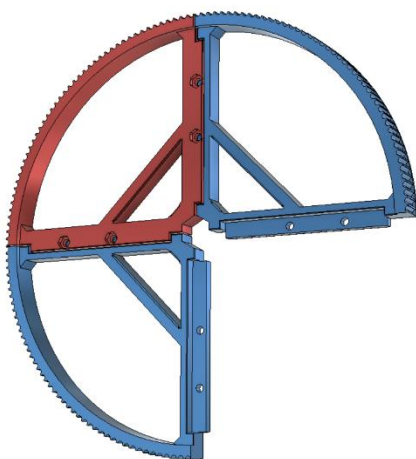


FIGURE 25 - GRANDE POULIE



## 5.CONSTRUCTION

### 5.1. PLANS

Étant donné que nous avons dessiné les plans sur ordinateur, il est très facile d'obtenir des vues détaillées de chaque pièce à construire grâce à une fonction de *Fusion360* : les dessins automatiques. Nous avons ainsi créé des dessins techniques qui ont servi de plan de construction pour la découpe et l'assemblage des différentes parties. Nous avons ensuite préparé les divers composants sur plusieurs semaines avant de les assembler et de monter les accessoires optiques ainsi que l'électronique.

Ces dessins imprimés avaient l'avantage d'être facilement lisibles, et on pouvait les manipuler sur le lieu de travail, sans avoir à consulter l'ordinateur pour chaque mesure. Une copie de ces dessins se trouve [en annexe](#).

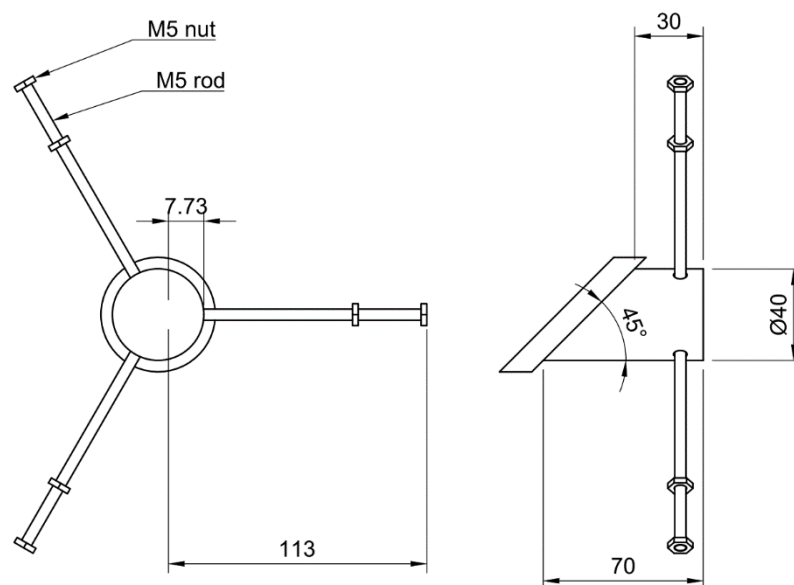


FIGURE 26 - EXEMPLE D'UN TEL DESSIN

### 5.2. MATÉRIAUX ET OUTILS

La monture et les grandes pièces ont été réalisées à partir de plaques de mélaminé obtenu en recyclant une vieille table IKEA. L'utilisation de ce matériau nous arrange car cela nous évite des dépenses supplémentaires, mais n'est pas idéal car il est pénible à travailler et contient des colles nocives pour l'environnement et l'humain, nous avons donc fait attention à porter un équipement adéquat lors des découpes et à nettoyer notre lieu de travail.

Pour le tube, nous avons eu la chance d'en trouver un de 200mm de diamètre pour un mètre de long chez nous. En revanche, le miroir, de 203mm rentrait à peine et il

n'était pas possible de le maintenir, c'est pourquoi nous avons adapté le design et l'avons placé dans le prolongement du tube (voir fig. 28).

Notre principal outil de coupe était une scie sauteuse, et nous avons utilisé une scie à onglet pour les découpes en biais. Pour relier les pièces ensemble, nous avons utilisé des vis ou de la colle à bois. Enfin, certaines pièces, qui nécessitent une plus grande précision, ont requis l'usage d'une défonceuse.

### 5.3. MONTURE

La monture est composée de deux parties : le *pied* qui permet d'assurer que tout le télescope est bien à plat à l'aide de quatre boulons, et le *socle* sur lequel pivote le tube.

Le pied est une plaque rectangulaire sur laquelle se trouvent la butée à bille ainsi que la grande poulie de l'axe vertical. Les boulons se trouvent au bout de deux planches, à l'extérieur de la surface rectangulaire, afin de ne pas gêner le socle lorsque celui-ci tourne. Quatre écrous M12 sont incrustés dans les planches de bois, dans lesquels sont insérés des boulons correspondants. Un niveau à bulle circulaire est ajouté pour aider avec la calibration.

Le socle est une sorte de cage en bois qui permet de supporter l'axe du tube. Nous les avons dessinés avec une forme originale, simplement car nous les préférons esthétiquement ; ils auraient très bien pu être rectangulaire. Sur le haut se trouvent des entailles circulaires du diamètre des roulements utilisés. L'arrière est ouvert pour permettre au bas du tube de pivoter librement, et l'avant est assez bas pour accepter le tube à l'horizontal.



FIGURE 27 - PIED DE LA MONTURE

## 5.4. CAGE

Ce que nous appelons la cage est la structure qui entoure le tube et qui sert de base d'ancrage à l'axe et au barillet. Elle est composée de deux octogones, dont le cercle inscrit est légèrement plus grand que le tube, et qui sont reliés entre eux par deux planches de support, une de chaque côté. Nous avons utilisé des octogones par souci d'esthétisme, mais nous aurions pu choisir n'importe quel polygone régulier dont le nombre de faces est un multiple de quatre.

L'octogone inférieur comporte un « couvercle » sur lequel se trouve le barillet. Ce couvercle est maintenu fermé par un loquet et un collier de serrage réutilisable. Ses mouvements latéraux sont limités par des feuilles de papier de verre collées qui augmentant la friction. L'octogone supérieur aide à la rigidité de l'ensemble. Le barillet est relié à ce « couvercle » par les vis d'ajustements.

Les huit pièces de l'octogone du bas sont collées et vissées pour assurer une bonne solidité au barillet. Celui du haut est simplement collé car il ne subira pas autant de forces que son homologue.

Les planches de supports comportent une fente de 12cm de long pour 13mm de large, le long de laquelle peut glisser l'axe de rotation. Ces fentes sont symétriques sur les deux supports.



FIGURE 28 - PHOTOS DE LA CAGE

## 5.5. ASSEMBLAGE

Les pièces sont construites les unes après les autres et assemblées à la fin. Les différentes parties ne sont pas fixées les unes aux autres, mais sont simplement emboîtées ; nous pouvons ainsi facilement démonter le télescope. Seul le tube est une pièce unique. Elle est maintenue dans la cage par six vis M4 ([expliqué au point suivant](#)).

## 5.6. MOYENS DE CALIBRATIONS

Comme dit lors de la planification, l'idée générale était d'avoir un design modulable et qui offrirait le plus d'options de calibrations afin de compenser nos imprécisions lors de la construction. Nous avons donc privilégié des boulons et des tiges filetées et creusé des fentes et non des simples trous, pour ainsi avoir le moins de pièces fixes possible.

Le porte oculaire et le support du miroir secondaire illustrent parfaitement notre optique. Ils sont tous deux ajustables verticalement et la position du miroir secondaire l'est aussi jusqu'à un certain point. Le centre de rotation fonctionne de la même manière, peut se déplacer le long du tube le long du tube.

En ce qui concerne l'alignement du miroir et du tube, tous deux sont indépendamment ajustables. L'assiette du barillet peut être incliné via les trois vis d'ajustement, et il est possible de légèrement déplacer le miroir latéralement grâce aux faibles tolérances de la charnière. Le tube, lui, est rattaché à la cage par six vis ; deux séries de trois vis M4 une série par octogone. Celles-ci maintiennent le tube et permettent de légèrement l'incliner de de le bouger sur le plan du miroir.

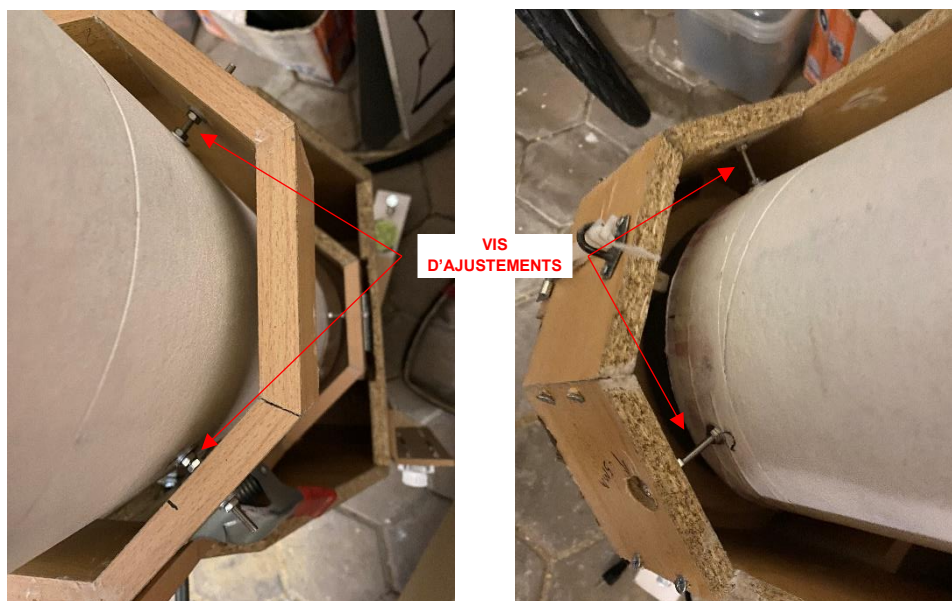


FIGURE 29 - VIS D'AJUSTEMENTS

Le désavantage d'une telle modularité est qu'elle entraîne une diminution de la rigidité et favorise les micro-vibrations. Le télescope est aussi globalement plus fragile aux accidents (chute, écrasement, etc...).

## 5.7. RÉGLAGE DES INSTRUMENTS

Nous ajustons en premier lieu le pied de la monture, grâce au niveau à bulles, afin d'assurer que le télescope est bien posé à plat. Cette opération est effectuée à chaque début d'utilisation.

Avant la première utilisation, nous devons aligner les miroirs et régler leur inclinaison. Nous plaçons d'abord le miroir principal dans le barillet, et le miroir secondaire à environ 83cm de celui-ci (image A). Après avoir centré celui-ci et aligné le porte-oculaire, nous pouvons apercevoir le reflet du miroir primaire à travers ce dernier (image B). Il faut ensuite régler l'inclinaison et le positionnement du miroir secondaire afin qu'il soit bien au centre du miroir principal (image C). Enfin, nous utilisons les vis d'ajustement du barillet pour incliner le miroir principal ; nous cherchons à ne plus voir les côtés du tube (image D). Si ces réglages sont

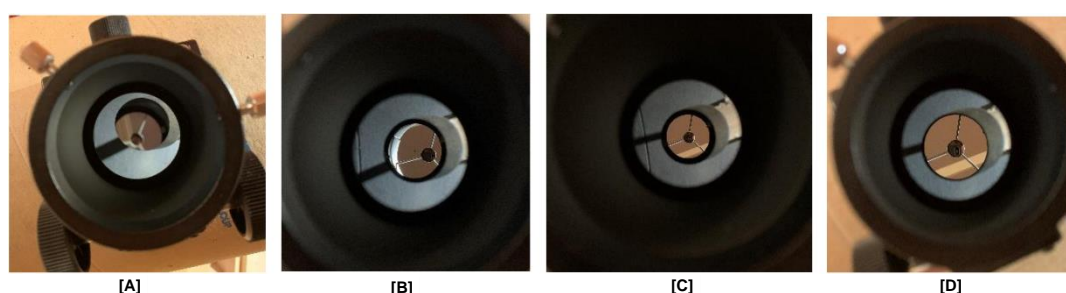


FIGURE 30 - PROCESSUS DE COLLIMATION DU TÉLESCOPE

correctements effectués, nous devrions voir notre œil au centre du miroir secondaire, lui-même au centre du miroir principal.<sup>23</sup>

Pour ajuster le chercheur, il faut en premier lieu repérer un objet lointain mais facilement identifiable, puis le pointer avec le point rouge et regarder à travers un oculaire avec un vaste champ de vision (faible grossissement). Une fois l'objet au centre du champ de vision, il faut corriger, si besoin, l'orientation horizontale et verticale du chercheur. Ensuite, nous pouvons répéter ces étapes avec un oculaire avec un plus gros grossissement pour affiner le réglage.<sup>24</sup> Pour notre part, nous avons commencé par pointer la Lune, puis nous avons continué avec Jupiter.

La mise au point se fait indépendamment pour chaque astre et est différente pour chaque oculaire.

---

<sup>23</sup> DELLAGIOVANNA, Nicolas, *Fabrication d'un télescope d'astronomie amateur à moindre coût*.

<sup>24</sup> WEBASTRO, auteur anonyme, 3 octobre 2017. <https://www.webastro.net/noctua/les-différents-matériels/chercheurs-et-pointeurs-réglages-et-utilisation-r50/>



## 5.8. ÉLECTRONIQUE

Nous avons prévu de la place pour l'électronique sur le socle de la monture, sous le tube. L'alimentation est placée au centre pour ne pas influencer le centre de gravité de la monture, et nous avons disposé le Raspberry au-dessus. Les moteurs sont connectés à la carte de contrôle par des fils Dupont, elle-même branché à l'alimentation. Le Raspberry est alimenté par un chargeur de téléphone. Nous avons connecté le tout à une multiprise.

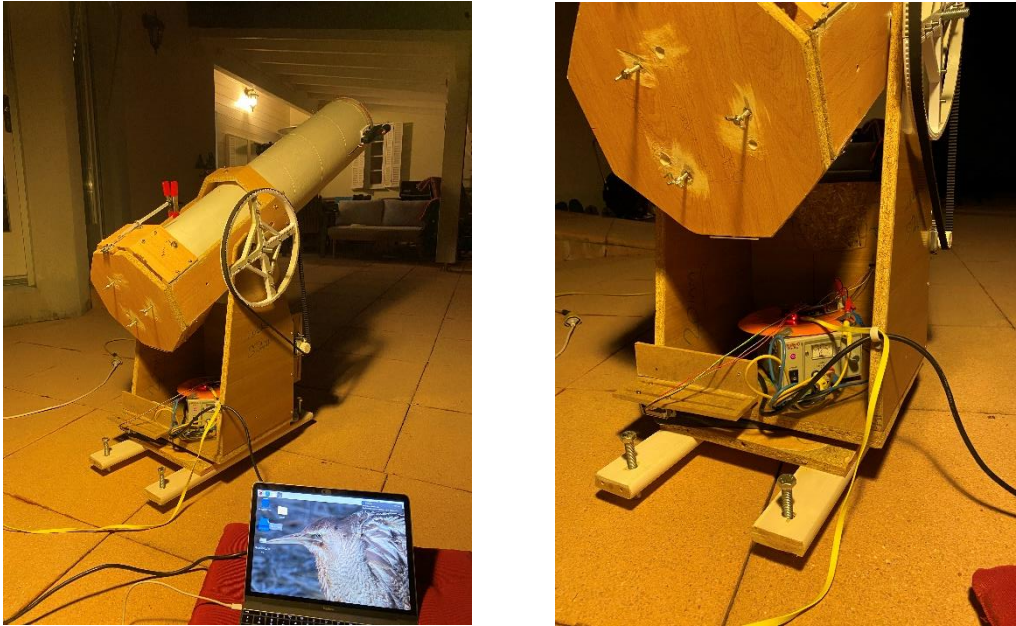


FIGURE 31 - ARRIÈRE DU TÉLESCOPE

## 6.UTILISATION

### 6.1. INFORMATIONS GÉNÉRALES

Il y a plusieurs étapes pour pointer un objet céleste. Il faut tout d'abord s'assurer que le télescope est bien posé à plat, via le niveau à bulle, et si nécessaire, effectuer des ajustements. En plus de sa nécessité pour le programme de suivi, avoir le télescope à plat permet d'éviter qu'il ne tourne tout seul à cause de l'inclinaison. Après cela, si le chercheur est déjà réglé, nous pouvons pointer un astre. Ensuite, nous devons faire la mise au point en réglant la profondeur de l'oculaire dans le porte-oculaire via le pas de vis. Une fois ces étapes effectuées, nous devrions obtenir une image nette.

### 6.2. INTERACTIONS ET INTERFACE UTILISATEUR

Le Raspberry peut être commandé, comme un ordinateur classique, via un moniteur et un clavier, ou alors depuis un autre ordinateur, en tant que bureau à distance. Cette seconde option est pratique car elle permet d'utiliser son laptop comme télécommande, mais elle requiert que le Raspberry et l'ordinateur de commande soient connectés au même réseau WiFi, et donc impraticable en conditions extérieur. Nous utilisons cette méthode actuellement, mais nous souhaitons trouver une meilleure option prochainement.

L'interaction se fait via le terminal de commande : d'abord, nous entrons les coordonnées géographiques dans un programme principal, qui les enregistre sur un fichier CSV. Ensuite, le programme de calibration est initié : nous choisissons quel astre pointer, et nous sommes invités à y orienter le télescope via les flèches du clavier (haut-bas pour l'altitude et gauche-droite pour l'azimut). Une fois validé par l'opérateur, les coordonnées de l'astre sont enregistrées en tant que dernière position connue. À partir d'ici, nous pouvons entrer l'astre à pointer et le télescope fonctionne en mode automatique.

### 6.3. AUTRES MODES

Nous disposons aussi d'un mode manuel, qui est très semblable au module de calibration, à la différence près que nous n'entrons pas l'astre que nous pointons, mais que le programme nous laisse bouger le télescope via le clavier et enregistre ces changements effectués.

Le programme principal initie automatiquement celui de calibration, mais à la fin de ce dernier, nous sommes redirigés vers le « menu ». D'ici, nous pouvons lancer les différents modes (`goto`, `manuel`, `recalibrer`) et nous avons accès à deux autres modules : un qui permet de « libérer » les moteurs pour pouvoir les tourner manuellement (`release.py`), et un qui « redémarre » le télescope en le pointant au zénith et en libérant les moteurs (`reset.py`).

## 6.4. AJUSTEMENTS

Une fois sous tension, il est important d'utiliser les moteurs pour contrôler le télescope et ne surtout pas l'orienter manuellement. D'une part, si le télescope est bougé autrement que par les moteurs, l'ordinateur n'a aucune façon de déterminer sa position ; il faudra donc le recalibrer. De plus, un moteur mis en mouvement à travers l'axe et non par impulsions électriques est essentiellement un alternateur, et produit donc un courant électrique, qui risque de bruler le microcontrôleur.

Pour remédier à ces problèmes, il serait possible d'utiliser un composant qui bloque ou limite le courant dans un sens (diode, fusible, etc...) pour éviter de bruler la carte. Pour connaître l'orientation du télescope, il serait possible d'utiliser des potentiomètres circulaires (*MagnetoPot*) qui permettent de connaître la rotation d'un axe par rapport à un plan. Nous souhaitons implémenter ces améliorations prochainement.



## 7. CONCLUSION

### 7.1. ATTENTES ET RÉSULTAT

Nous étions partis avec pour objectif initial de simplement pouvoir voir les planètes de notre système solaire de plus près. La motorisation était un objectif, mais nous étions prêts à la laisser de côté. Nous sommes donc très satisfaits d'avoir pu l'inclure et visons de l'améliorer afin d'atteindre le télescope de nos rêves. En ce qui concerne la charge de travail, celle-ci s'est avérée supérieure à ce que nous avions initialement estimée, mais nous y avons trouvé du plaisir et de l'intérêt ; travailler sur notre télescope ne ressemblait pas tant à une tâche académique mais plutôt aux nombreux autres projets que l'on a faits ensemble et qui nous ont tant intéressés. Enfin, ce travail s'est trouvé récompensé lorsqu'un soir, avec des amis que nous avions invité pour l'occasion, nous avons observé les stries de Jupiter et les anneaux de Saturne pour la première fois. Globalement, Obol, notre télescope nommé ainsi en honneur au télescope spatial Hubble, est à la hauteur de nos attentes.

### 7.2. POUR UNE PROCHAINE FOIS : LA PHOTOGRAPHIE

Nous avons été confrontés à une question importante très tôt dans le processus de *design* : voulions nous implémenter la photographie ? L'ajout d'un support pour appareil photo aurait fondamentalement changé l'aspect de notre télescope. En effet, pour supporter une telle masse, le tube aurait dû être beaucoup plus stable, chose d'autant plus importante car toutes les vibrations sont retranscrites sur l'image captée par l'appareil. La plupart des télescopes de photographie n'utilisent d'ailleurs pas de monture horizontale, mais privilégient les montures équatoriales, optimisées pour le suivi du ciel, et utilisent une vis d'Archimède pour transférer le mouvement du moteur au tube, système qui rend l'utilisation manuel du télescope impossible, car une vis sans fin ne tourne que dans un sens. De plus, notre télescope ne comprend pour l'instant pas de système de suivis, indispensable pour réaliser de belles images célestes. Toutes ces considérations prises en compte, nous avons simplement décidé d'abandonner la photographie au profit d'un télescope d'observation.



FIGURE 32 - TÉLESCOPE DE PHOTOGRAPHIE SUR UNE MONTURE ÉQUATORIALE

### 7.3. BILAN PERSONNEL

Sur une note plus personnelle, nous sommes fiers du résultat atteint, mais surtout, nous sommes contents d'avoir travaillé sur Obol ensemble. Nous sommes conscients que nous n'aurions pas pu réaliser ce projet dans son intégralité seul, et cette expérience nous a d'autant plus soudé. Cette passion pour le ciel nocturne que nous partageons ainsi que notre intérêt pour le travail manuel n'aurait su être mieux récompensée ; en voyant les cratères de la Lune d'aussi prêt, et surtout à travers notre télescope, construit ensemble, nous nous rendons compte du chemin accompli et de tout ce que nous avons appris, que ce soit de l'ordre académique ou humain.

### 7.4. REMERCIEMENTS

Nous tenons à grandement remercier toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu lors de notre projet, et sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible. D'abord, Boris ISCHI qui nous a suivi le long de notre travail de maturité et qui a aidé à l'écriture du programme de pointage. Puis Bertrand EMERY, du *Service Media et Image*, qui a permis l'impression 3D de nos pièces. Ensuite, Arnaud BUCHEL et Simon DALHEIMER pour leur aide lors du dessin des poulies, et la construction du télescope, et Nicolas DELLAGIOVANNA pour avoir gentiment partagé ses connaissances et son expérience. Enfin, nos parents qui ont financièrement soutenu notre projet.



## 8. SOURCES

### 8.1. BIBLIO- ET WEBOGRAPHIE

- BERRY, Richard, 1985, *Build Your Own Telescope*. Scribner. ISBN 13 : 9780684184760
- BERTORELLO, Serge, 2001. *Techniques d'astronome amateur* [en ligne]. 1 janvier 2001 [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <http://serge.bertorello.free.fr/index.html>
- DELLAGIOVANNA, Nicolas, 2019, *Fabrication d'un télescope d'astronomie amateur à moindre coût*. Genève : Collège de Candolle. Travail de Maturité.
- « Jake », 2018, *Jake's Blog* [en ligne]. 7 mars 2018. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://blog.ja-ke.tech/>
- LADY ADA, Adafruit, 2015, *Adafruit DC and Stepper Motor HAT for Raspberry Pi* [en ligne]. 27 janvier 2015. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://learn.adafruit.com/adafruit-dc-and-stepper-motor-hat-for-raspberry-pi?view=all>
- NAIR, Prasanth, *Astrometry in python with PyEphem* [en ligne]. 4 juillet 2010. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://asimpleweblog.wordpress.com/2010/07/04/astrometry-in-python-with-pyephem/>
- OUYANG, Yohanes E., 2014, *Basic of Stepper Motors* [en ligne]. 29 janvier 2016. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <http://embeddedsystemengineering.blogspot.com/2016/01/basic-of-stepper-motors.html>
- RHODES, Brandon, 1998, *PyEphem* [en ligne]. 2021. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://rhodesmill.org/pyephem/index.html>
- STELVISION, *Oculaires : comment constituer sa gamme idéale ?* [en ligne]. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.stelvision.com/astro/oculaires-constituer-sa-gamme-ideale/>
- WOODFORD, Chris, 2012, *Stepper motors*. [en ligne]. 28 mai 2021. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse <https://www.explainthatstuff.com/how-stepper-motors-work.html>
- (auteur anonyme) WEBASTRO, *Chercheurs et pointeurs : réglages et utilisation* [en ligne] 3 octobre 2017. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.webastro.net/noctua/les-différents-matériels/chercheurs-et-pointeurs-réglages-et-utilisation-r50/>
- (sans auteur) General Purpose Input/Output, *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne] Dernière modification de la page le 2 novembre 2020 à 20:24. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/General\\_Purpose\\_Input/Output](https://fr.wikipedia.org/wiki/General_Purpose_Input/Output)
- (sans auteur) Mechanical advantage, *Wikipedia : the free encyclopedia* [en ligne] Dernière modification de la page le 13 août 2021 à 19:45 (UTC). [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical\\_advantage](https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_advantage)

- (sans auteur) Monture azimutale, *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne] Dernière modification de la page le 14 juin 2021 à 14:49. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Monture\\_azimutale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Monture_azimutale)
- (sans auteur) Raspberry Pi, *Wikipédia : l'encyclopédie libre* [en ligne] Dernière modification de la page le 13 septembre 2021 à 16:18. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)

## 8.2. LOGICIELS UTILISÉS

- AUTODESK, 2013. *Fusion 360* [logiciel]. Autodesk. Version 2.0.10806. Disponible à l'adresse : <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- LEWIS, David, 2012, *Gui Plop* [logiciel]. Version 3.0.6. [Disponible à l'adresse : <https://en.freedownloadmanager.org/Windows-PC/Gui-Plop-FREE.html>]
- RHODES, Brandon, 1998, *PyEphem* [module Python]. Version 4.1. 29 septembre 2021. Disponible à l'adresse : <https://pypi.org/project/ephem/>
- VAN ROSSUM, Guido, 1991. *python* [logiciel]. Python Software Foundation. Version 3.9. 5 octobre 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.python.org/downloads/>

## 8.3. ILLUSTRATIONS

- Image de couverture : Photo, Collection personnelle
- Figure 1 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran
- Figure 2 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran
- Figure 3 : BERRY, Richard, 1985, Which telescope is right for you ?. In: *Build Your Own Telescope*. Scribner. ISBN 13 : 9780684184760
- Figure 4 : BERTORELLO, Serge, *Notions d'optique* [en ligne]. 1 janvier 2001 [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <http://serge.bertorello.free.fr/optique/instrum/miroir.html>
- Figure 5 : Logiciel *Fusion 360*, Captures d'écran
- Figure 6 : BERTORELLO, Serge, *Dimensions du miroir plan d'un télescope de Newton* [en ligne]. 1 janvier 2001 [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <http://serge.bertorello.free.fr/calculs/dimplan.html>
- Figure 7 : URBAIN, Tom, StarLust, 2020, *Qu'est-ce que le grossissement ?* [en ligne] 30 septembre 2020 [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://starlust.org/fr/grossissement-telescope/>
- Figure 8 : STELVISION, *Oculaires : comment constituer sa gamme idéale ?* [en ligne]. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.stelvision.com/astro/oculaires-constituer-sa-gamme-ideale/>
- Figure 9 : BERRY, Richard, 1985, Which telescope is right for you ?. In: *Build Your Own Telescope*. Scribner. ISBN 13 : 9780684184760
- Figure 10 : Photo, Collection personnelle
- Figure 11 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran



- Figure 12 : Logiciel *Fusion 360*, Captures d'écran
- Figure 13 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran
- Figure 14 : Photos, Collection personnelle
- Figure 15 : Photos, Collection personnelle
- Figure 16 : Photos, Collection personnelle
- Figure 17 : Logiciel *Fusion 360*, Captures d'écran
- Figure 18 : Photo, Collection personnelle
- Figure 19 : Photo, Collection personnelle
- Figure 20 : OUYANG, Yohanes E., 2014, Basic of Stepper Motors [en ligne]. 29 janvier 2016. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <http://embeddedsystemengineering.blogspot.com/2016/01/basic-of-stepper-motors.html>
- Figure 21 :
 

Gauche : REICHELT, [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.reichelt.nl/nl/en/raspberry-pi-3-b-4x-1-4-ghz-1-gb-ram-wlan-bt-raspberry-pi-3b--p217696.html?CCOUNTRY=662&LANGUAGE=nl&GROUPID=8242&START=0&OFFSET=16&SID=93b28fdd511e2b61463312ecd7f783c8d4c1b3e3d7fc54ee390c6&LANGUAGE=EN&r=1>

Droite: LADY ADA, Adafruit, 2015, *Adafruit DC and Stepper Motor HAT for Raspberry Pi* [en ligne]. 27 janvier 2015. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://learn.adafruit.com/assets/22670>
- Figure 22 :
 

Gauche : WIKIMEDIA, 14 janvier 2012. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vis100f1.png>

Milieu : WIKIMEDIA, 17 février 2010. [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transmission\\_of\\_motion\\_by\\_compound\\_gear\\_train\\_\(Army\\_Service\\_Corps\\_Training,\\_Mechanical\\_Transport,\\_1911\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transmission_of_motion_by_compound_gear_train_(Army_Service_Corps_Training,_Mechanical_Transport,_1911).jpg)

Droite : Site web inexistant. <https://1.bp.blogspot.com/-sSMjoUT3-0/U6qdYzkjadI/AAAAAAAAACKI/HpuNstGfpZY/s1600/>
- Figure 23 : Photos, Collection personnelle
- Figure 24 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran (gauche) ; Photo, Collection personnelle (droite)
- Figure 25 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran (gauche) ; Photo, Collection personnelle (droite)
- Figure 26 : Logiciel *Fusion 360*, Capture d'écran
- Figure 27 : Photo, Collection personnelle

- Figure 28 : Photos, Collection personnelle
- Figure 29 : Photos, Collection personnelle
- Figure 30 : DELLAGIOVANNA, Nicolas, 2019, Fabrication d'un télescope d'astronomie amateur à moindre coût. Genève : Collège de Candolle. Travail de Maturité.
- Figure 31 : Photos, Collection personnelle
- Figure 32 : JONES, Trevor, 2015, *AstroBackyard*, [Consulté le 1 octobre 2021]. Disponible à l'adresse : <https://astrobackyard.com/wp-content/uploads/2015/12/basic-astrophotography-equipment-setup.jpg>
- Dernière image : Photo, Collection personnelle

## 9. ANNEXES

### 9.1. FICHE DE DÉPENSE

Kerem	Article	Description	Qte.	Prix unitaire	Livraison et douane	Devise	Prix total	Magasin	Date	Remarques
	Raspberry Pi 3B+		1	0	0	XXX	0	reichelt.com	01.05.2020	déjà acheté
	Motor Hat	AdaFruit motor driver	2	0	0	XXX	0	reichelt.com	01.05.2020	déjà acheté
	Niveau à bulle T		1	2,04	0	USD	2,04	aliexpress.com	06.05.2021	
	Niveau à bulle rond	60*12mm	1	3,3	0	USD	3,3	aliexpress.com	06.05.2021	
	Heatsink	8,8*8,8mm	1	2,3	0	USD	2,3	aliexpress.com	06.05.2021	
	Pointeur laser	5mW, rouge	1	2,47	0	USD	2,47	aliexpress.com	06.05.2021	
	Ecrou M12	pour tige filetée	1	2,5	0	CHF	2,5	Migros Brico	07.06.2021	x4
	Roulement à billes	d=12,7mm	2	2,9	8,85	EUR	14,65	123roulement.com	14.06.2021	no: C1891816
	Butée à billes	d=120mm	1	15,35	0	EUR	15,35	123roulement.com	14.06.2021	no: C1891816
	Courroie ALT	5M 1270	1	21,5	6,58	EUR	28,08	123courroies.fr	14.06.2021	no: FIMFKQTQS
	Courroie AZI	5M 1035	1	19,95	0	EUR	19,95	123courroies.fr	14.06.2021	no: FIMFKQTQS
	Moteur stepper	4.8v 1.2A 0.2Nm	2	13	14	chf	40	conrad.ch	03.07.2021	NEMA 17-03
	Visserie		1	52	0	EUR	52	Leroy Merlin	21.08.2021	
	Visserie		1	7,00	0	CHF	7	Quincaillerie Perillat	09.09.2021	
Chris	Miroir principal	203mm, F5	1	235	0	EUR	235	pierro-astro.com	10.05.2021	
	Miroir secondaire	50mm	1	40	18	EUR	58	pierro-astro.com	10.05.2021	
	tige filée	M12	1	2,5	0	EUR	2,5	Leroy Merlin	02.06.2021	

### 9.2. CODE SOURCE

Le code python utilisé dans notre projet se trouve sur GitHub à l'adresse suivante :

<https://github.com/kkremm/obol.git>

L'installation du module `PyEphem` et de `adafruit-circuitpython-motorkit` est requise.

### 9.3. FICHIERS 3D ET PLANS

Les fichiers 3D ainsi que les plans sont disponibles à l'adresse suivante ainsi que dans la clé USB jointe à ce dossier :

<https://drive.google.com/drive/folders/1lipQ6pCDARpKgnh8uAy5eaA2K7YdBH8U?usp=sharing>

Le fichier 3D principal est également consultable en ligne via le lien suivant :

<https://a360.co/3zmWoOg>