HEIG-VD

Travail de Bachelor

Système de correction tip-tilt rapide pour télescope amateur

Etudiant : David Gloor

Professeur responsable : Lorenzo Zago

Yverdon-les-bains, le 23 juillet 2010

Résumé

Dans le but d'effectuer une prise d'image au moyen d'un télescope amateur, il faut tenir compte d'un certain nombre de perturbations qu'il va ensuite s'agir de corriger afin de garantir la stabilité de l'image. Ces erreurs sont principalement dues aux problèmes d'alignement ainsi qu'à l'entrainement du télescope. Dans un premier temps, les grandes perturbations vont-être corrigées par la monture du télescope. Et, dans un second temps, afin de garantir une plus grande rapidité, la correction des petites perturbations, avec une lame de verre installée dans un mécanisme deux axes dit "tip-tilt".

Ce projet entre dans le cadre du travail de diplôme de la fin de ma formation de Bachelor of Science HES-SO, orientation microtechniques, et celui-ci a pour principal objectif la réalisation d'un système de correction tip-tilt pour télescope amateur.

Les sujets qui vont-être traités au fil de ce rapport sont une recherche de documentation, puis une approche théorique du système, suivie par la réalisation d'un prototype et pour finir la mise en place d'une procédure et d'un banc d'essais visant à la validation du système.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier le professeur L.Zago de m'avoir permis d'effectuer ce travail de Bachelor dans le domaine de l'astronomie amateur dont le sujet correspond parfaitement à ma vision de la microtechnique.

Je tiens aussi à remercier M. C.D'Eramo de son accueil chaleureux lors de la visite de son observatoire à Combremont-le-Petit ainsi que du temps passé à communiquer sa passion.

Enoncé du projet

Département **TIN**

Filière **Microtechniques - MI**

Candidat : **David Gloor**

TRAVAIL DE DIPLOME 2010

Système de correction tip-tilt rapide pour télescope amateur

Cahier des charges :

Complément de formation et recherche documentaire sur les télescopes d'amateur et les systèmes de guidage et correction de l'image, familiarisation avec tous les détails du LX200 du labo optique.

- Conception du tip-tilt et indentification de tous ses éléments mécaniques, optiques, électriques, électroniques et logiciels. Schémas électriques et électroniques. Design CAO.
- Dessins de fabrications et/ou spécifications d'achat de tous les composants.
- Achat, fabrication des composants et montage. Réalisation du banc d'essai.
- Réalisation du logiciel de commande. Une interface graphique, par exemple en LabVIEW.
- Essais et validation du système.

Table des matières

Résumé iii
Remerciements v
Enoncé du projet vii
Table des matières ix
1. Introduction 1
2. Contextes et objectifs du projet 3
2.1. Objectifs généraux 3
2.2. Introduction au domaine de l'astronomie amateur 3
2.2.1. Télescope et lunette astronomique 3
2.2.2. Principaux types de télescope 4
2.2.3. Montures de télescope 5
2.2.4. Caractéristiques générales d'un télescope 6
2.3. Types d'erreur 8
2.3.1. Erreurs de suivi 8
2.3.2. Seeing 8
2.3.3. Procédé de détection d'erreurs 9
2.4. Système de correction tip-tilt 10
2.4.1. Etat de l'art 10
2.4.2. Produits existants 11
3. Télescope Meade LX200 et CCD SBIG ST-402 ME 15
4. Conception générale du système 17
4.1. Principe de fonctionnement du tip tilt 17
4.1.1. Lame de verre à face parallèle 17
4.1.2. Parcours des rayons à travers le tip-tilt 19
4.2. Prévisions théoriques du tip-tilt 21
4.2.1. Résolution angulaire du système 21
4.2.2. Rotation de la lame de verre pour un déplacement maximal d'une étoile 22
4.2.3. Correction maximal du système 22
4.2.4. Temps minimal de correction 22

4.2.5. Vitesse angulaire du système 22
4.2.6. L'état de surface 23
4.2.7. L'épaisseur de la lame de verre 23
4.2.8. Le diamètre de la lame de verre 24
4.2.9. Spécifications techniques du système tip-tilt 25
4.3. Système complet de prise d'image 25
4.3.1. Modèle théorique 25
4.3.2. Modèle optique 26
5. Description du système tip-tilt 29
5.1. Catalogue des solutions 29
5.1.1. Mécanisme de rotation sur deux axes 29
5.1.2. Fixation de la lame de verre 31
5.1.3. Accouplement moteur 32
5.1.4. Conception de la boîte 33
5.1.5. Fixation du télescope et du beam splitter sur le tip-tilt 34
5.2. Calcul de dimensionnements 34
5.2.1. La lame de verre 34
5.2.2. Les deux moteurs 35
5.3. Vues éclatées 39
5.4. Nomenclature 41
5.5. Commande des moteurs 42
5.5.1. Driver de moteur pas-à-pas 42
5.5.2. Carte d'interface PC-driver moteur 43
5.5.3. Programmation LabVIEW 45
6. Essais 47
6.1. Objectifs 47
6.2. Procédures 47
6.2.1. Premier objectif : Test moteurs 47
6.2.2. Deuxième objectif : Simulation de la lame de verre 48
6.2.3. Banc d'essais 48
6.3. Montage de système tip-tilt 50
7. Synthèse et conclusions 53
Références I
Différents polycopiés I

Site internet I
Index III
Index des figures III
Index des graphiques IV
Index des tableaux IV
Annexes V
Annexe A : Plan de travail V
Annexe B : Code MatLab VII
Annexe C : Photos du projet IX
Annexe C.1 : Mécanique du système tip-tilt IX
Annexe C.2 : Montage du tip-tilt, du beam splitter, de l'autoguider et de la CCD X
Annexe C.3 : Montage sur le télescope XI
Annexe D : Liste des composants XIII
Annexe D.1 : Datasheet moteur XIV
Annexe D.2 : Datasheet réducteur XVI
Annexe D.3 : Datasheet encodeur XVII
Annexe D.4 : Datasheet carte moteur XVIII
Annexe D.5 : Datasheet lame de verre à face parallèle XXIV
Annexe D.6 : Datasheet support lame de verre XXV
Annexe D.7 : Datasheet palier lisse XXVI
Annexe E : Mise en plan XXVII

1. Introduction

Ce projet a été effectué en tant que travail de diplôme de la fin de ma formation de Bachelor of Science HES-SO, orientation microtechniques. Le choix du sujet fut orienté sur la volonté de conserver la pluridisciplinarité mécano électrique qu'offre la branche microtechnique. Le vaste domaine qu'est celui de l'optique, et plus précisément celui des télescopes pour amateur, permet facilement de satisfaire ce point. J'ai donc choisi le sujet, proposé par le professeur Lorenzo Zago, qui porte sur le système de correction tip-tilt rapide pour télescope amateur.

Dans le but d'effectuer une prise d'image au moyen d'un télescope amateur, il faut tenir compte d'un certain nombre de perturbations qu'il va ensuite s'agir de corriger afin de garantir la stabilité de l'image. Ces erreurs sont principalement dues aux problèmes d'alignement ainsi qu'à l'entrainement du télescope. Dans un premier temps, les grandes perturbations vont-être corrigées par la monture du télescope. Et, dans un second temps, afin de garantir une plus grande rapidité, la correction des petites perturbations, avec une lame de verre installée dans un mécanisme deux axes dit "tip-tilt".

Quelques versions de ce produit existent déjà sur le marché. Comme par exemple le SBIG AO-8, mais son utilisation demande de ce fait aussi une caméra SBIG. Un autre produit est aussi annoncé, mais sera relativement cher. Pour ce projet de diplôme, il s'agira ici de construire un appareil de performances semblables mais potentiellement peu cher à produire, et qui sera essentiellement compatible avec la plupart des télescopes d'amateur.

La construction de se rapport se divise en cinq chapitres. Le premier, *Contextes et objectifs du projet*, va introduire le sujet de ce travail de Bachelor. Il comprend les objectifs généraux, une brève introduction au domaine de l'astronomie amateur, une recherche sur les différents types d'erreur qui interviennent dans de tel système ainsi qu'une première approche du système de correction tip-tilt. Le deuxième, *Télescope Meade LX200 et CCD SBIG ST-402 ME*, comprend la description du télescope cible, de ses dimensions ainsi que de ses propriétés optique. Le troisième, *Conception générale du système*, contient toute la partie conceptuelle de ce projet. C'est-à-dire le principe de fonctionnement, les différentes prévisions théoriques ainsi qu'une explication sur les éléments utiles lors d'une prise d'image. La quatrième, *Description du système tip-tilt*, traite de la réalisation du prototype. Elle comprend donc le catalogue des solutions, les divers calculs de dimensionnement du système, la vue éclaté et la nomenclature de la partie mécanique du projet ainsi que la méthode retenue de commande des moteurs. Et pour finir la cinquième et dernière partie, *Essais*, comprend comme son nom l'indique la procédure de test du système, le banc d'essais ainsi que des photos de ce projet.

2. Contextes et objectifs du projet

2.1. Objectifs généraux

Les objectifs à atteindre, lors de la réalisation de ce projet, sont au nombre de quatre et sont résumés dans les paragraphes qui suivent.

Le premier objectif consiste en un bref complément de formation réalisé au moyen d'une recherche documentaire sur les télescopes pour amateurs, les systèmes de guidage et correction d'image ainsi qu'une familiarisation avec tous les détails du télescope Meade LX200 du laboratoire d'optique de l'HEIG-VD.

Puis, le deuxième objectif est la conception théorique du mécanisme tip-tilt. Il comporte l'indentification de tous ses éléments mécaniques, optiques, électriques, électroniques et logiciels. Ce qui comprend le choix de la commande des moteurs, le design CAO ainsi que les différentes spécifications d'achat de tous les composants.

Ensuite, le troisième objectif porte sur la réalisation concrète à proprement parler. Ce qui inclu l'achat ou la fabrication des composants, le montage ainsi que la réalisation du logiciel de commande. Pour ce dernier une interface graphique LabVIEW sera développée.

Le quatrième et dernier objectif consiste à penser à un banc d'essai ainsi qu'une procédure de test qui permettront, ultérieurement, d'effectuer les essais et la validation du système.

2.2. Introduction au domaine de l'astronomie amateur

Cette recherche de documentation a pour but d'introduire le vaste domaine de l'optique qui est celui des télescopes d'amateur. Elle commence donc par traiter des deux principaux instruments d'optique qui sont les lunettes astronomiques et les télescopes avec leurs principaux avantages et inconvénients. Puis, les lunettes astronomiques seront mises de côté pour ne traiter que des télescopes. Ce qui amène aux trois types fondamentaux qui existent, ainsi que de leurs types de montures. Et pour finir, une brève recherche sur les principales caractéristiques qui entrent en jeu dans de tels instruments.

2.2.1. Télescope et lunette astronomique

Historiquement, le premier instrument d'optique visant à l'étude astronomique fut la lunette astronomique en 1600. Son principe permet, au moyen de lentilles, d'augmenter la taille apparente et la luminosité des objets du ciel lors de leurs observations.

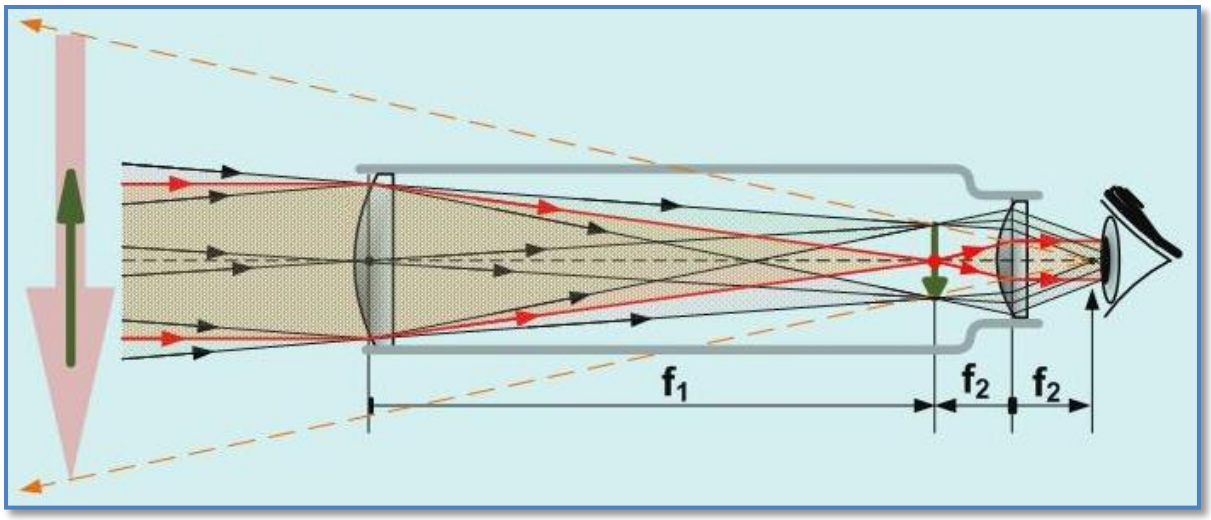


Figure 1 : Schéma de la lunette astronomique.[1]

Puis, vers 1660, l'idée apparue de remplacer les lentilles d'une lunette par des miroirs, le télescope était né.

Les principaux avantages d'un tel système par rapport à une lunette sont aux nombres de deux. Premièrement, étant donné que les rayons ne traversent plus des lentilles mais sont réfléchies sur des miroirs, cela implique que le système est exempt d'aberration chromatique et aussi que les rayons subissent un moins grand taux d'absorption. Deuxièmement, l'objectif d'une lunette comporte deux lentilles, ce qui fait quatre surfaces sphériques à tailler. Le miroir d'un télescope n'en comprend qu'une seule, ce qui rend la fabrication de ce dernier beaucoup plus simple. Par contre, à cause de la position de son miroir secondaire devant le primaire, il résulte une obstruction du champ d'observation. Ceci explique le faite privilégier l'utilisation de lunettes astronomiques pour des petites tailles d'instruments et de télescopes pour des grandes.

2.2.2. Principaux types de télescope

D'un point de vu mécanique, il existe trois types fondamentaux de télescope qui sont dus aux trois premiers inventeurs, Newton, Cassegrain et Gregory. La représentation de ces trois types sont illustrées sur la figure 2 qui suit.

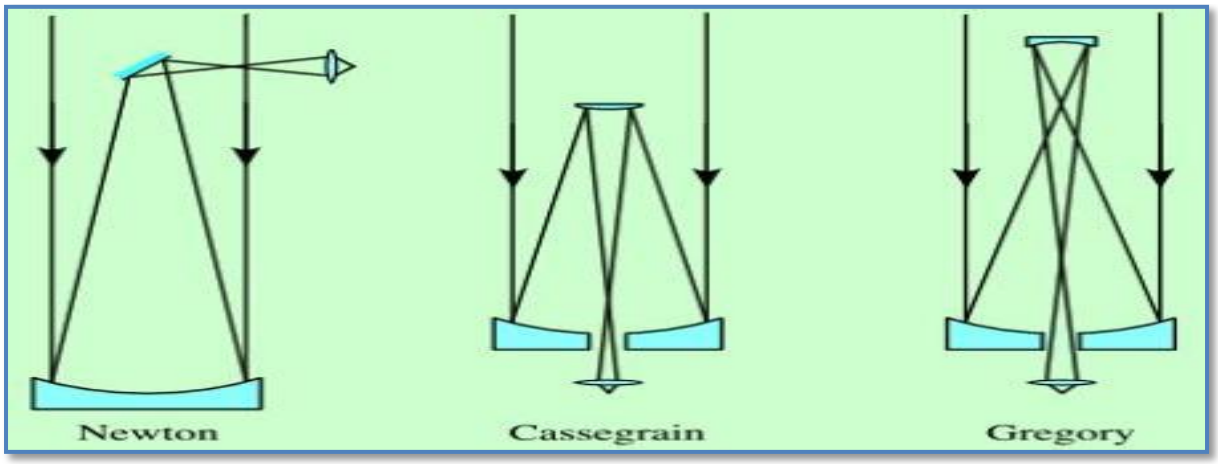


Figure 2 : Schéma des trois types fondamentaux de télescope.[2]

[1] Source : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Kepschem.png
[2] Source : Cour d'optique du professeur L. Zago – Polycopié SYSTEMES OPTIQUES POUR L'IMAGERIE page 7-5

La combinaison de Newton comprend un primaire parabolique suivie d'un secondaire plan. Son principal avantage est que son coût est bon marché. Par contre son désavantage est dû à son primaire parabolique qui génère une aberration dite de coma, c'est-à-dire une réduction du champ utilisable.

Ensuite, la combinaison de Cassegrain comporte un primaire concave parabolique et un secondaire convexe hyperbolique.

Et pour finir la combinaison de Gregory est constitué d'un primaire concave et d'un secondaire convexe elliptique. Pour des caractéristiques égales, un télescope de Gregory est plus long qu'un télescope de Cassegrain. Ce qui implique que le modèle de Gregory n'est plus ou très peu utilisé.

Bien sûr cette liste n'est pas exhaustive et ne traite que des premiers pas dans le domaine de l'astronomie. Afin de toujours améliorer leurs instruments, différents autres types de modèles de télescope sont apparus au fil des siècles, telle que Schmidt, Schmidt-Cassegrain, Maksutov-Cassegrain ou encore Ritchev-Chrétien.

2.2.3. Montures de télescope

Le principal problème rencontré par les astronomes fut sans nul doute la rotation de la terre. Ce phénomène entraine un déplacement des corps observable dans le ciel. Pour palier à ce problème, l'utilisation de différents types de montures permettent de rendre mobile les instruments optiques. Il existe deux principaux types de montures qui sont la monture azimutale et la monture équatoriale.

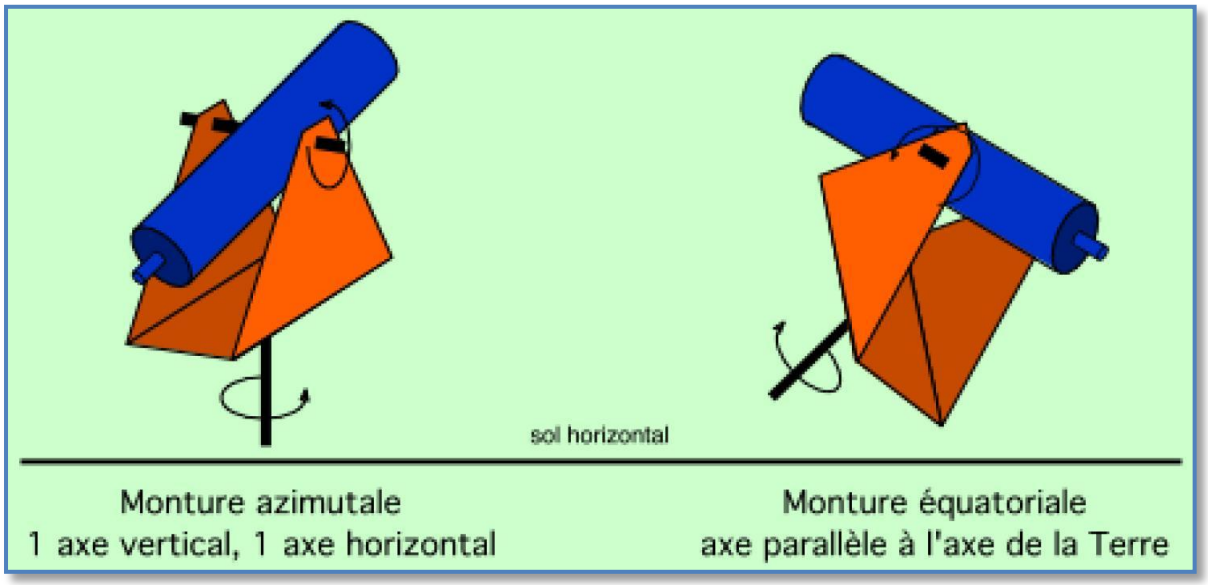


Figure 3 : Types de monture.[3]

D'un point de vue mécanique la monture azimutale est la plus simple à construire et la plus stable. Elle est constituée de deux axes, horizontal et vertical. L'axe de sa base est dirigé vers le centre de la terre. Le suivie d'étoile nécessite donc une commande en continue des deux axes.

Quand à elle, la monture équatoriale possède aussi deux axes, sauf que le premier permet de régler la monture et le second sert à orienter l'instrument selon les coordonnées célestes données par la déclinaison et l'ascension droite. L'axe de sa base est orienté parallèlement à l'axe de rotation de la terre. Au final ce type de monture est mécaniquement assez compliqué à réaliser et entraîne dans le bras qui tient la fourche, un porte-à-faux. Ce qui va avoir tendance à le faire plier. Par contre, elle permet le suivi au moyen d'un seul axe, ce qui simplifie considérablement l'entraînement.

[3] Source : Cour d'optique du professeur L. Zago – Polycopié SYSTEMES OPTIQUES POUR L'IMAGERIE page 7-16

Néanmoins, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique, la monture de type azimutale à tendance à revenir sur le devant de la scène. En effet, le principe consiste à la motoriser au moyen de deux moteurs, un sur chaque axe, qui sont ensuite commandé électroniquement. Ce type de montage porte souvent le nom de monture alt-azimutale.

2.2.4. Caractéristiques générales d'un télescope

Comme tous les instruments, un certain nombre de variables qui vont influencer les performances du télescope peuvent-être définies. Ces caractéristiques se séparent en deux catégories, les caractéristiques mécaniques et les caractéristiques optiques.

2.2.4.1. Caractéristiques mécaniques

La première et sans doute la plus importante, car la plupart des autres caractéristiques en dépendent, est **le diamètre de l'objectif**. Plus celui-ci est grand, plus le télescope peut récolter des photons. Ce qui va autoriser un fort grossissement et permettre l'observation des objets lointains.

Ensuite vient **la longueur focale**. Plus celle-ci est longue, plus l'instrument permet un fort grossissement au détriment d'une diminution du champ visuel et d'un certain assombrissement. Les grandes focales sont donc principalement utilisées dans l'observation planétaire.

2.2.4.2. Caractéristiques optiques

Un autre paramètre important est celui du **grossissement**. Il peut-être décrit comme le rapport entre le diamètre apparent de l'image à la sortie de l'oculaire et le diamètre apparent de l'objet-réel. Au-delà de la limite de résolution de l'instrument, le grossissement ne révèle plus d'autres détails que les défauts de l'image et induit une diminution de la clarté.

Le pouvoir séparateur, quand à lui, correspond à la capacité d'un système optique à révéler les détails. Il se trouve en mesurant le plus petit angle séparant deux points qu'on parvient à voir comme distincts l'un de l'autre. L'équation suivante décrit la diffraction du système.

$$r_a = 1.22\frac{f \cdot \lambda}{D} \tag{2.01}$$

Où f est la focale, λ la longueur d'onde et D le diamètre de l'objectif.

La fonction d'étalement du point (PSF, point spread function) peut-être décrite comme étant la fonction de transfert de la chaine de détection, tel que la diffraction, les aberrations, le seeing, etc. Elle quantifie donc l'étalement du point lumineux dans l'image ce qui la rend indispensable pour le traitement d'image.

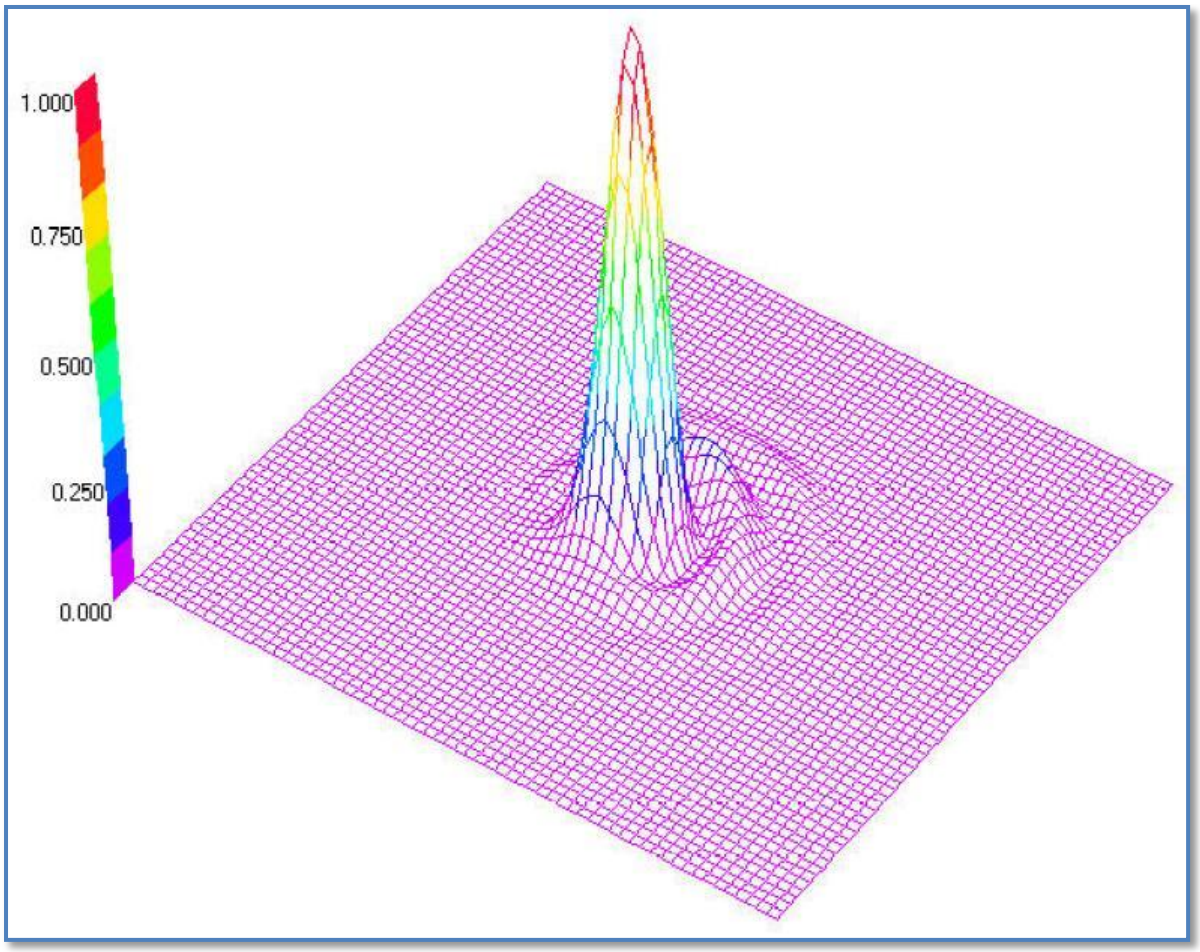


Figure 4 : Fonction d'étalement de point, PSF.[4]

La largueur à mi-hauteur (FWHM, full width half maximum) de la PSF permet d'évaluer le diamètre d'une tache. Son équation est énoncée ci dessous.

$$FWHM = 0.89\frac{\lambda}{r_0} \tag{2.02}$$

Où λ est la longueur d'onde et r_0 le paramètre de Fried.

En termes simples, le paramètre de Fried est le diamètre d'un faisceau de rayons issus d'une source à l'infini, qui traversent les couches de l'atmosphère et arrivent, toujours bien parallèles et en phase au télescope.

[4] Source : Cour d'optique du professeur L. Zago – Polycopié SYSTEMES OPTIQUES POUR L'IMAGERIE page 7-12

2.3. Types d'erreur

Dans ce domaine qui est celui des télescopes amateur, il existe plusieurs types d'erreur. Ces dernières sont principalement d'ordre mécanique et optique.

2.3.1. Erreurs de suivi

Commençons par les erreurs de type DEC qui sont dues aux problèmes d'alignement du télescope. Ce type d'erreur peut venir de plusieurs facteurs, tels que l'axe de la monture n'est pas parfaitement aligné avec l'axe de rotation de la terre ou bien que ceux-ci ne tournent pas à la même vitesse.

De plus, il existe aussi des erreurs de types RA, qui elles sont des erreurs d'entraînement. Ce retrouve dans cette catégorie les tolérances de la mécanique tels que par exemple les vis sans-fin, des états de surface des différents éléments entre eux, se qui génèrent des mouvements saccadés, ou bien du déplacement du centre de gravité du télescope qui change en fonction de son orientation.

2.3.2. Seeing

Et pour finir, le dernier type d'erreur est d'ordre optique, typiquement le seeing. Il provient du faite, que la lumière des étoiles, en passant dans l'atmosphère sera déviée dans le temps et ceci en fonction de divers paramètres tel que du gradient de température, du vent et de l'humidité.

Deux phénomènes visibles sont à constater. Le premier sera l'agitation d'une étoile, ce qui provient de la fluctuation de l'indice de l'atmosphère. Et le second sera le scintillement, qui lui, vient du fait qu'une partie des photons seront réfléchis par cette même atmosphère.

Le seeing caractérise l'élargissement de la tache image au travers de ces deux phénomènes. Un bon seeing est de l'ordre de 0.5'' et en lumière visible de 1''.

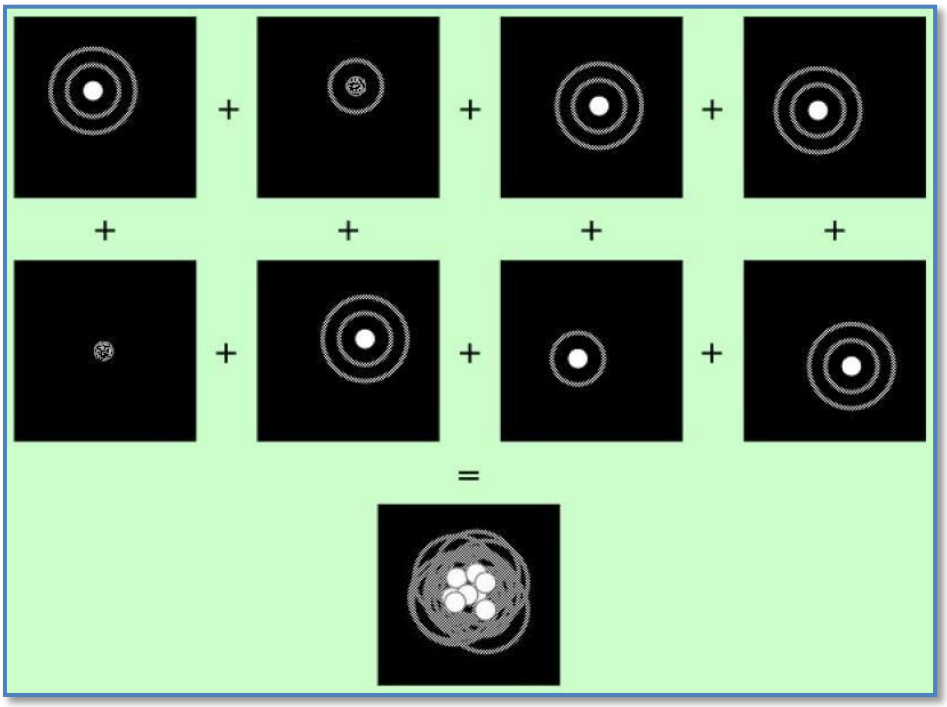


Figure 5 : Exemple de seeing.[5]

[5] Source : Cour d'optique du professeur L. Zago – Polycopié SYSTEMES OPTIQUES POUR L'IMAGERIE page 7-11

2.3.3. Procédé de détection d'erreurs

Dans le but d'effectuer une prise d'image au moyen d'un télescope amateur, il faut tenir compte d'un certain nombre de perturbations qu'il va ensuite s'agir de corriger afin de garantir la stabilité de l'image. Ces perturbations se regroupent dans les turbulences, les erreurs périodiques, la vitesse du vent, la flexion du montage mécanique tel que dans les tubes, les vibrations ainsi que les défauts de mise en station.

Commençons par les erreurs de type périodique. Un procédé assez simple consiste à enregistrer l'erreur lors d'une phase de test. Puis, de réutiliser les donnés récoltées pour corriger, au moyen de la monture, les futures prises d'image.

Pour ce qui est de la correction des erreurs non périodiques, celle-ci peut ce faire au moyen de la CCD[6] de prise d'image qui va directement donner la variation de la vitesse à corriger sur les moteurs de la monture.

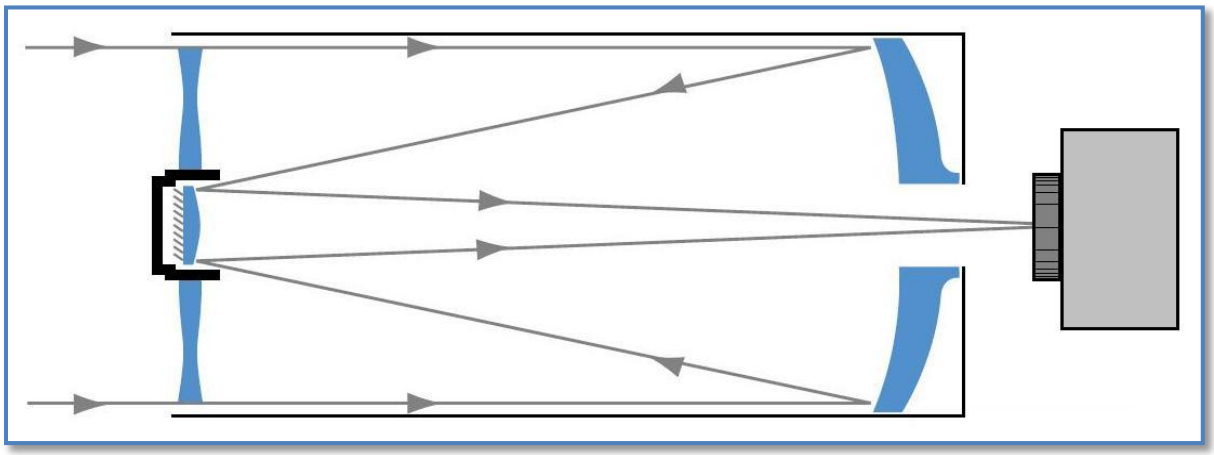


Figure 6 : Guidage et prise d'image au moyen d'un CCD.

Une autre méthode, dans le but est de ne pas surcharger le traitement de la CCD[6], serait d'utiliser un guidage hors axe. Cela consiste à dévier une partie des rayons et d'y mettre un capteur, CCD[6], PSD[7], quatre-quadrants[8], qui va assurer le suivi d'une étoile guide. Néanmoins ce genre de montage à un grand désavantage qui est celui de diminuer l'intensité des rayons pour les deux organes à son extrémité.

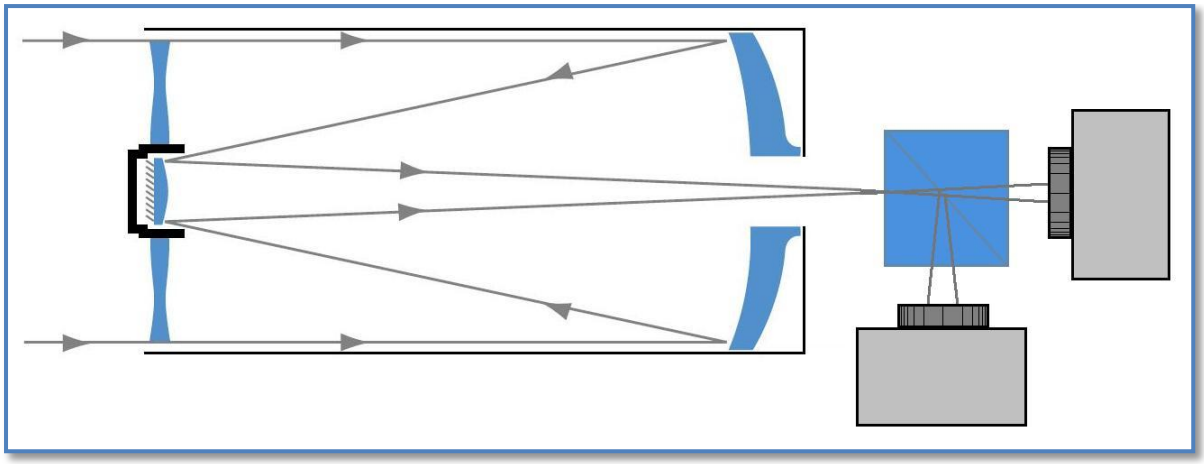


Figure 7 : Guidage hors axe.

[6] CCD, Charge-Coupled Device, utilisée sur les caméras et appareils photo pour prendre une image numérique.
[7] PSD, Position Sensitive Diode, détecte l'intensité ainsi que la position d'un amas de photon.
[8] Quatre-quadrants, même fonction que la PSD sauf que ce dernier n'as que quatre zones de détection.

Une autre solution, néanmoins plus coûteuse, est le guidage distinct. Cette dernière consiste à utiliser un autre télescope ou une lunette de plus petit diamètre qui va venir se monter sur le télescope.

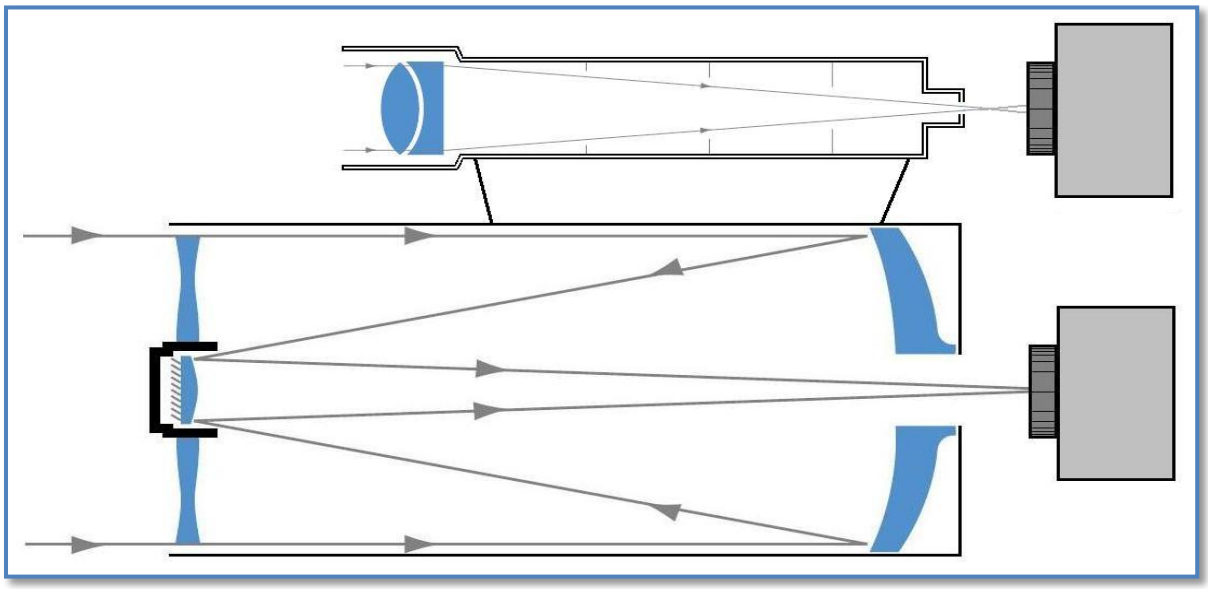


Figure 8 : Guidage distinct.

Et pour finir la dernière méthode consiste à utiliser une optique dite adaptative. Ce dernier principe consiste, au lieu de faire varier la vitesse des moteurs de la monture, à directement modifier les trains d'image de façon relativement rapide, environ 5 [Hz]. Le tip-tilt est un exemple de tel système.

2.4. Système de correction tip-tilt

2.4.1. Etat de l'art

Dans le but d'effectuer une prise d'image au moyen d'un télescope amateur, il faut tenir compte d'un certain nombre de perturbations qu'il va ensuite s'agir de corriger afin de garantir la stabilité de l'image. Ces erreurs sont principalement dues aux problèmes d'alignement ainsi qu'à l'entrainement du télescope. Dans un premier temps, les grandes perturbations vont-être corrigées par la monture du télescope. Et, dans un second temps, afin de garantir une plus grande rapidité, la correction des petites perturbations, avec une lame de verre installée dans un mécanisme deux axes dit "tip-tilt".

Afin de mieux comprendre le domaine d'application du tip-tilt, les principales erreurs, citées dans les paragraphes précédents, qui entrent en jeux sont représentées sur la figure ci-dessous.

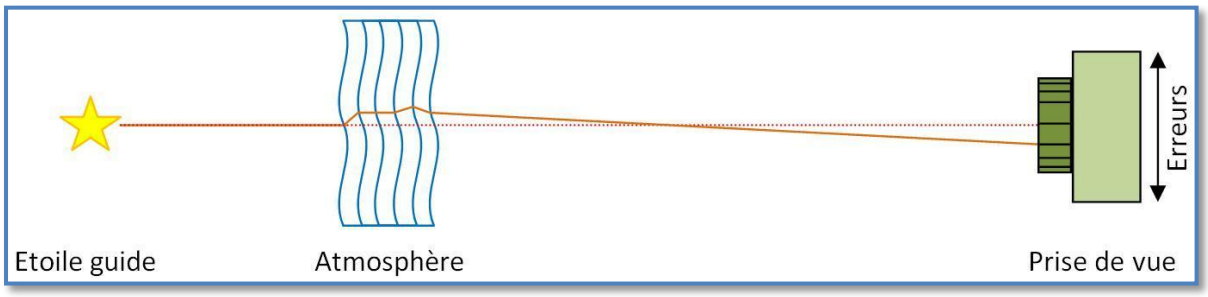


Figure 9 : Erreurs dans la prise d'image.

Le tip-tilt vient se placer juste avant l'organe de prise de vue. Il est construit de telle façon à garantir la rotation de la lame sur deux axes et ainsi, de permettre de centrer l'image sur la CCD. La figure suivante illustre son fonctionnement sur un axe.

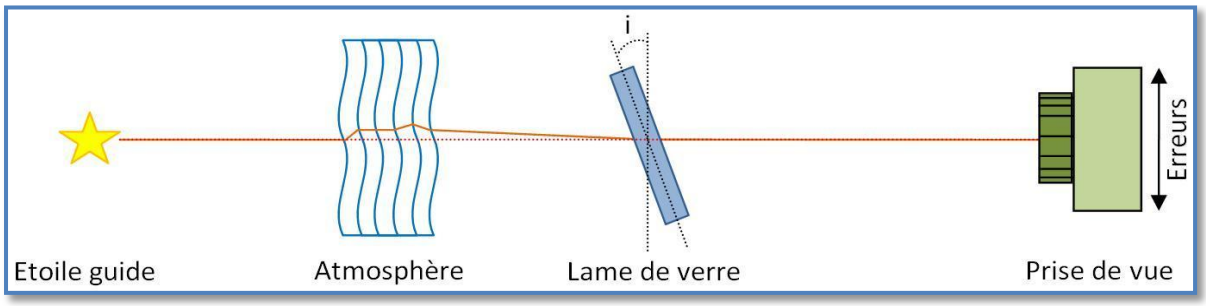


Figure 10 : Correction d'erreurs au moyen d'une lame de verre.

2.4.2. Produits existants

Lors de la recherche de documentation, il est sorti que plusieurs versions de ce produit existent déjà sur le marché. En voici trois, qui ont toutes été développées chez la société SBIG, *Santa Barbara Instrument Group*.

Le premier appareil est le système SBIG AO-7, qui a été développé en 1998 dans le but d'améliorer les performances des caméras CCD du même fabriquant. Cet appareil provoque une correction du front d'onde au moyen d'un miroir plan qui est illustré sur la figure suivante. En vue de la géomètre de ce système, le mouvement du miroir ainsi que sa régulation est assez complexe à réaliser.

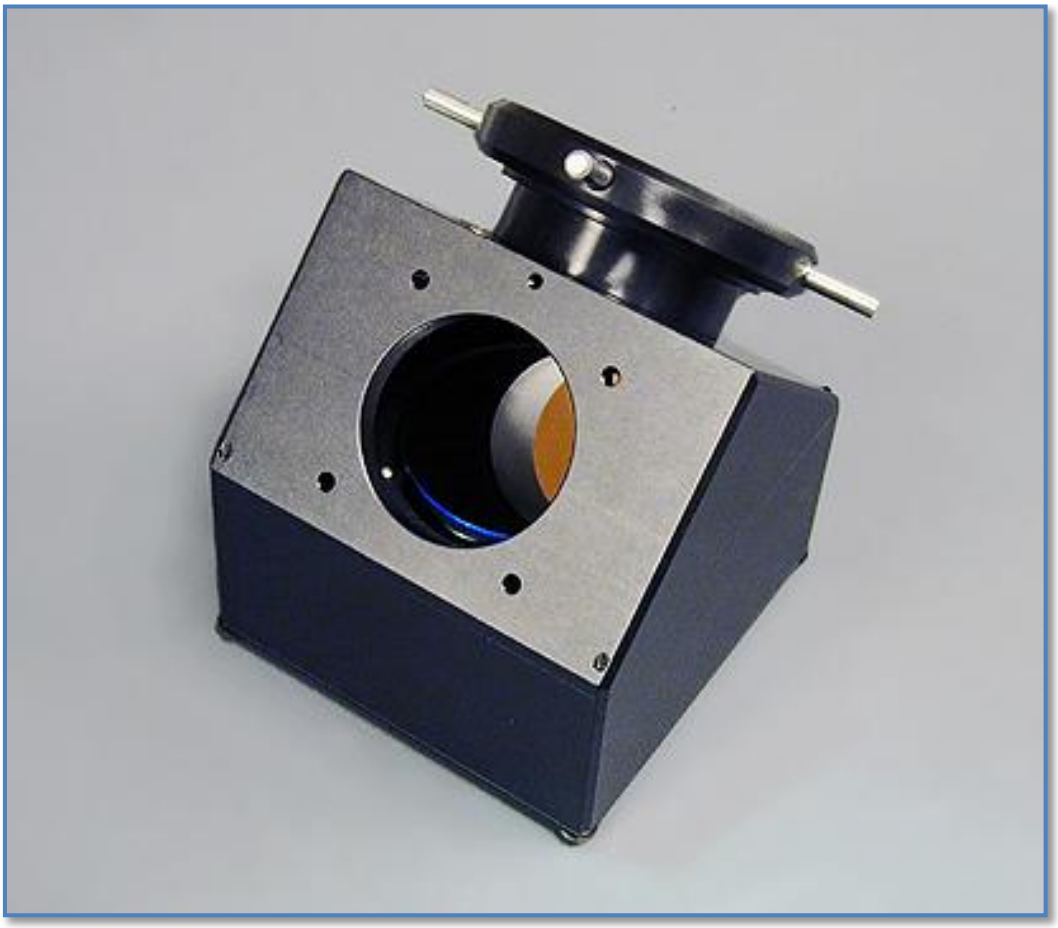


Figure 11 : Système SBIG AO-7. [9]

Puis, le AO-8 dont la principale amélioration fut son diamètre d'ouverture qui permet l'utilisation d'un plus grand CCD ainsi que du remplacement du miroir par une lame de verre de 50 mm de diamètre et de 6 mm d'épaisseur. De plus, cette lame de verre à une inclinaison maximale de ± 9.6 degrés ce qui correspond sur la CCD à ± 36 microns/degré. Sa motorisation est assurée au moyen de deux moteurs pas-à-pas, de résolution angulaire au niveau de la lame de verre de 0.075°, dont l'électronique est conçue pour effectuer plusieurs corrections par seconde, avec une bande passante de l'ordre de 16 Hz.

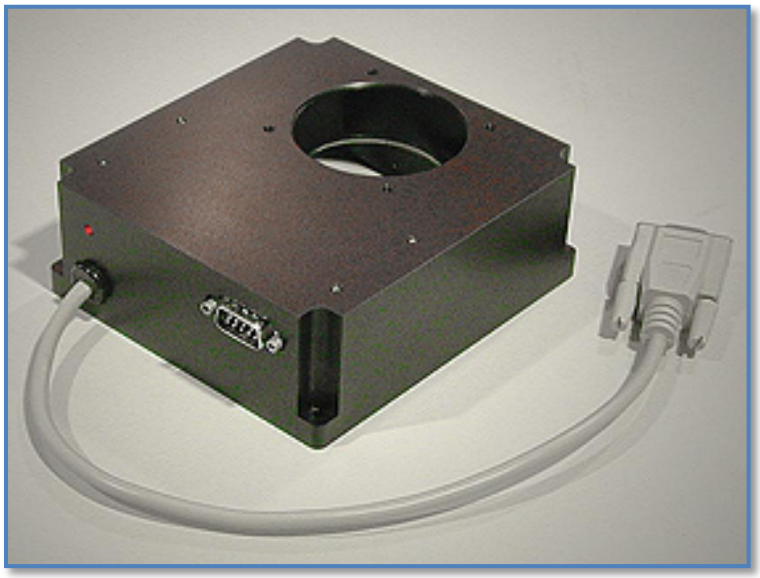


Figure 12 : Système SBIG AO-8. [9]

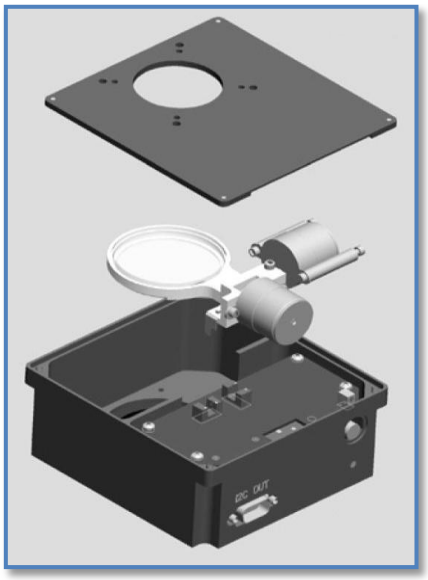


Figure 13 : Mécanisme interne AO-8. [9]

L'AO-L, dont la principale amélioration par rapport à un AO-8 est d'avoir un back focus moins important ce qui entraîne malheureusement un appareil plus lourd et moins compact. De plus, cette lame de verre à une inclinaison maximale de ± 4.6 degrés pour un déplacement sur la CCD à ± 36 microns/degré. Sa motorisation est assurée au moyen de deux moteurs linéaires pas-à-pas dont l'électronique est conçue pour effectuer plusieurs corrections par seconde, avec une bande passante de l'ordre de 12 Hz.

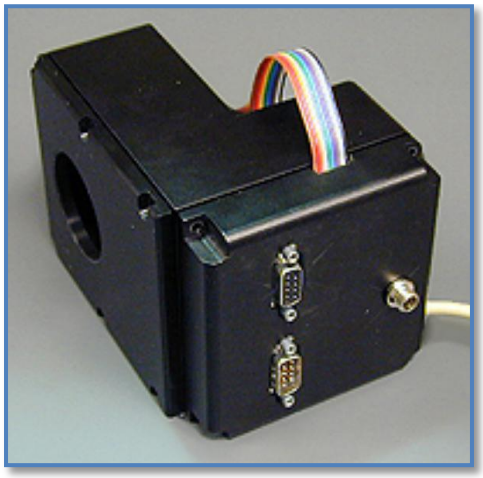


Figure 14 : Système SBIG AO-L.[9]

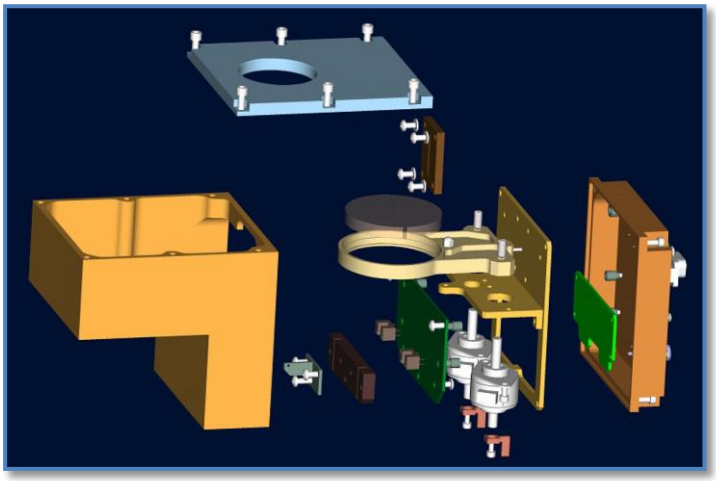


Figure 15 : Mécanisme interne AO-L. [9]

[9] Source : http://www.sbig.com/sbwhtmls/online.htm

Comme mentionné plus haut, les derniers systèmes développés par SBIG sont composés d'une lentille plate de 50 mm de diamètre ainsi que de 6 mm d'épaisseur. Grâce à un traitement antireflet, ces dernières ont un taux de transmission du rayon incident de 99 %. Lors des tests sur son produit, le fabricant n'a pas remarqué de défaut de chromatisme ou de déformation tel que distorsion, rotation de champ ou modification de grossissement. Des lors, on remarque l'énorme avantage d'un tel système dans sa capacité à analyser rapidement l'erreur et à déplacer sa lame de verre.

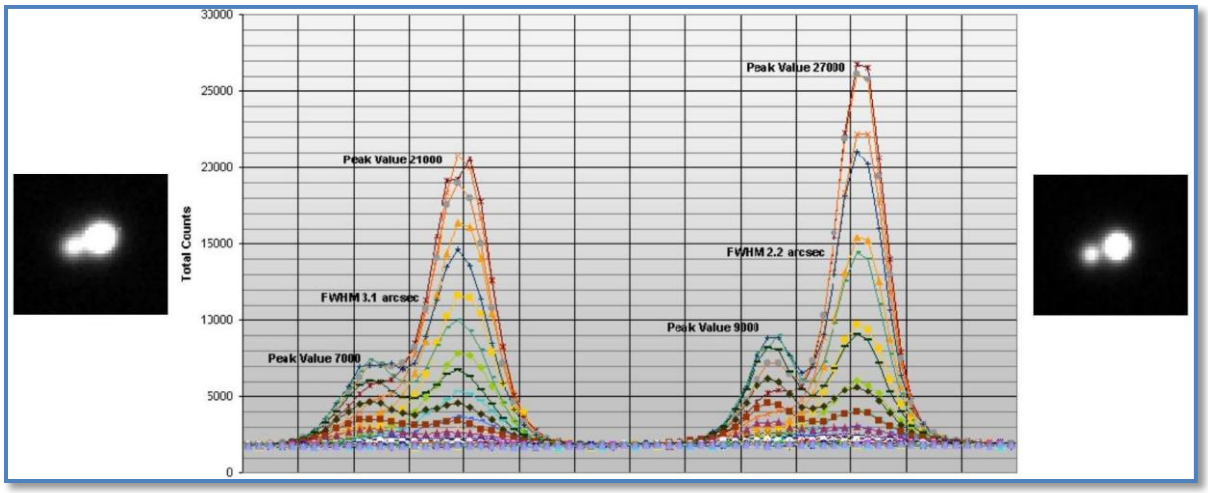


Figure 16 : Deux profile d'étoile sans (gauche) et avec (droite) AO-L. [9]

La figure ci-dessus présente un couple d'étoile de magnitude 14.7 et 15.7 séparé de 3.7 secondes d'arc à travers un Ritchey-Chrétien RCOS 508 mm f/8.3 et une STL-11000M sur une monture Paramound ME. Les poses ont été prises la même nuit et elles ont chacune duré 15 minutes. On constat que ce système améliore sensiblement la largueur à mi-hauteur de chaque étoile. La FWHM est plus faible d'environ 30 % ce qui induit un meilleur contraste et une plus grande séparation de couple stellaire.

3. Télescope Meade LX200 et CCD SBIG ST-402 ME

Dans le but de construire un observatoire automatisé, le laboratoire d'optique l'HEIG-VD à Yverdon-les-bains a fait l'acquisition d'un télescope Meade LX200. C'est donc celui-ci que nous allons prendre pour référence lors de la réalisation de ce projet. Les principales caractéristiques de ce télescope ainsi que la CCD déjà présente dans le laboratoire se trouve dans le tableau représenté ci-dessous.

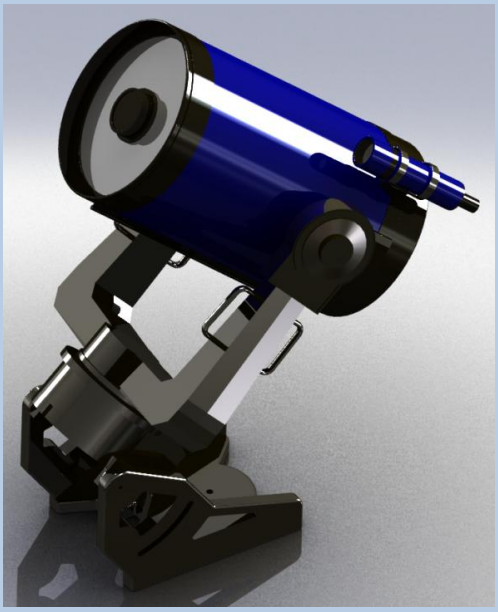
Meade LX200		Principe optique	Advance coma-free
		Diamètre miroir principal	305 [mm]
		Diamètre miroir secondaire	102 [mm]
		Longueur focal	2048 [mm]
		Rapport d'ouverture	f/10
		Obstruction centrale	11.1 [%]
		Pouvoir séparateur	0.38 [%]
		Magnitude stellaire	15
		Grossissement max	760
		Traitement	UHTC
		Dimension tube optique	346 x 610 [mm]
		Poids	78 [kg]
		Type de monture	Equatoriale
SBIG ST-402 ME		Pixel array	765 x 510
		Number of pixels	390'000
		Pixel size	9 [µm]
		CCD size	4.6 x 6.9 [mm]
		CCD area	32 [mm^2]
		Diag FOV 11'' Fastar (544mm FL)	52 [arcmin]
		Dark current at 0 C.	1 [e-/p/s]
		Read noise	17 [e-]
		Full well capacity	100'000 [e-]
		Peak QE	83 [%]
		Computer interface	USB 2.0
		Full fram transfert	0.8 [sec]

Tableau 1 : Spécifications techniques du télescope Meade LX200 et de la CCD SBIG ST-402ME.

4. Conception générale du système

La conception générale du système va débuter par une explication du principe de fonctionnement. Puis, en vue du dimensionnement qui a lieu dans le prochain chapitre de ce rapport, viennent les prévisions théoriques. Et pour finir, vient une explication des différents éléments utiles pour effectuer une prise d'image.

4.1. Principe de fonctionnement du tip tilt

4.1.1. Lame de verre à face parallèle

Afin de bien comprendre le principe de fonctionnement du système tip-tilt, commençons par traiter l'effet du parcours d'un rayon à travers une lame de verre. On sait que n'importe quel rayon lumineux incident sur une lame à face parallèle ressort avec le même angle. Toutefois, il subi un déplacement latéral Δ qu'il va s'agir d'illustrer ci-dessous.

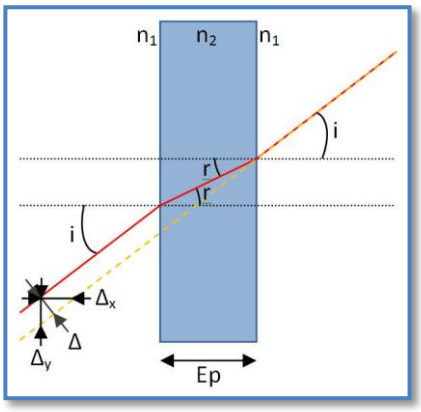


Figure 17 : Passage d'un rayon à travers d'une lame.

Voici la relation entre le rayon incident i et le rayon réfléchi r :

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \cdot \sin(r) \tag{4.01}$$

En redessinant une partie de la figure précédente, le déplacement latéral Δ_x devient :

$$\begin{cases} \tan(r) = \dfrac{a}{Ep} \\ \tan(i) = \dfrac{a}{Ep - \Delta_x} \end{cases} \Rightarrow \Delta_x = \mathrm{Ep} \cdot \left(1 - \frac{\tan(r)}{\tan(i)}\right) \tag{4.02}$$

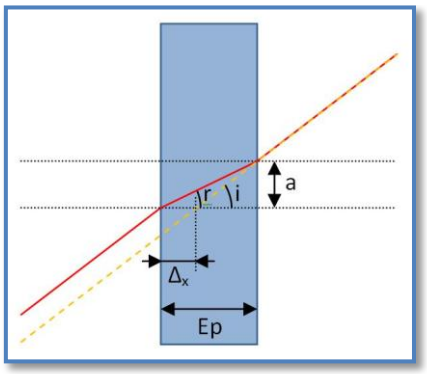


Figure 18 : Calcul du déplacement latéral Δx.

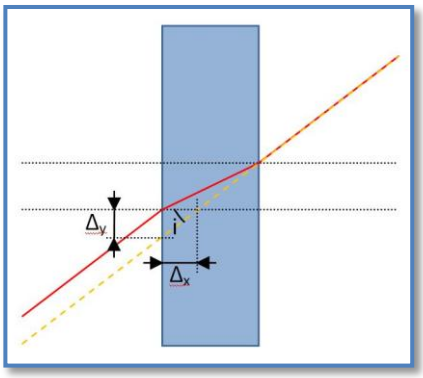


Figure 19 : Calcul du déplacement latéral Δ_y.

Puis, le déplacement latéral Δ_y.:

$$\Delta_y = \Delta_x \cdot \tan(i) \qquad (4.03)$$

Et une dernière fois pour le déplacement latéral Δ.

$$\Delta = \Delta_x \cdot \sin(i) \qquad (4.04)$$

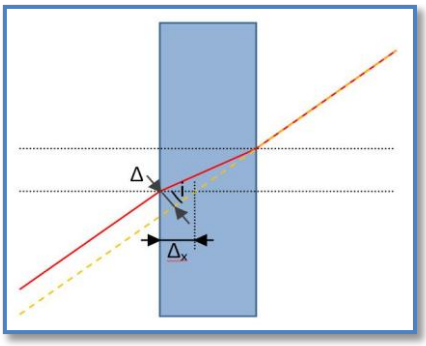
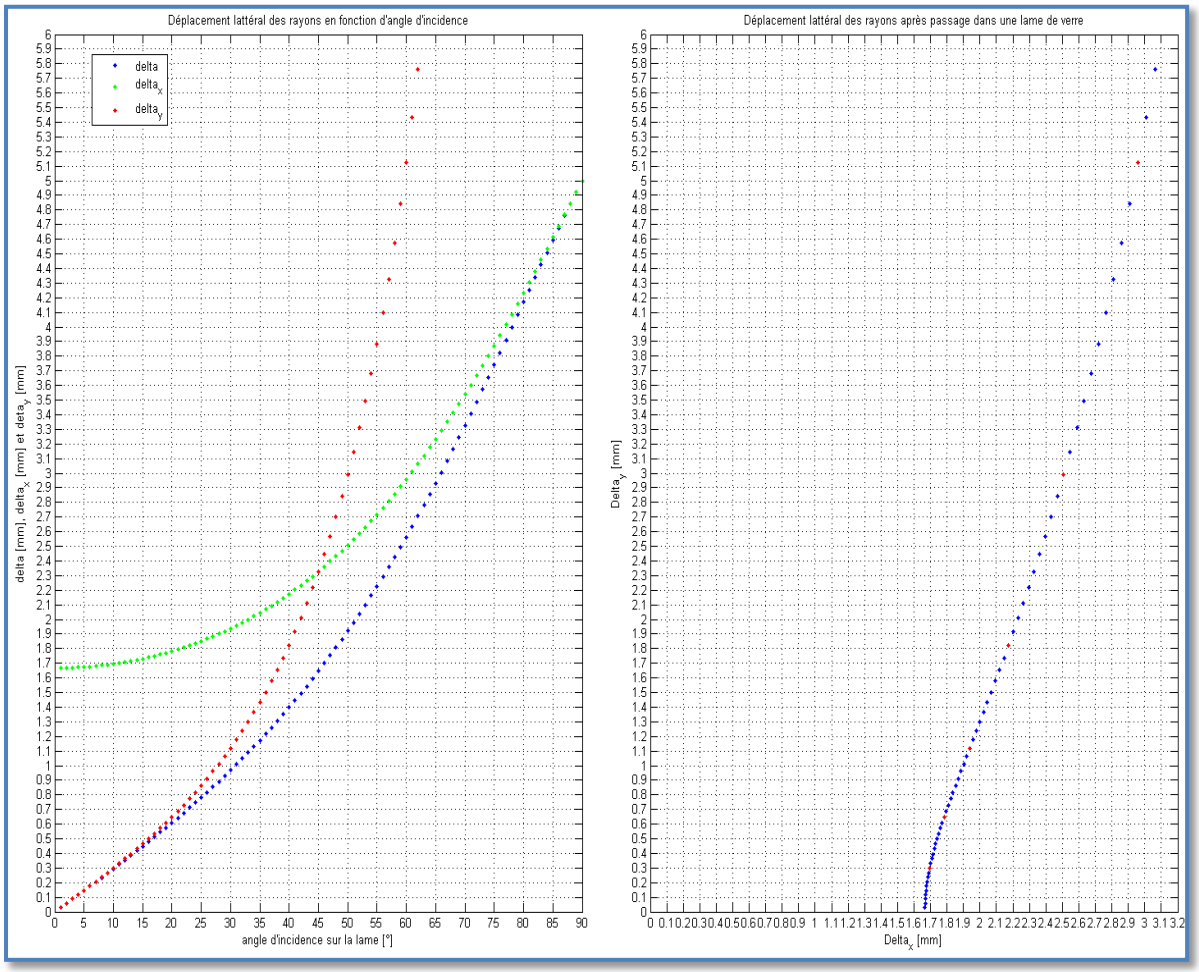


Figure 20 : Calcul du déplacement latéral Δ.

Au moyen du logiciel MatLab, on dessine le graphique des équations (4.01), (4.02), (4.03), (4.04) en fonction de l'angle d'incidence i en degrés et dont les paramètres ont été fixés à E_p = 5 [mm], n_1 = 1 et n_2 = 1.5.



Graphique 1 : Déplacement latéral des rayons après passage dans une lame de verre.

En analysant ce graphique on remarque les différents points suivants.

Concernant la courbe en vert, qui correspond au déplacement latéral en X, on voit que celle-ci commence avec un offset de 1.67 [mm] et que jusqu'à 20 [°], elle ne varie que d'un dixième de millimètre. On peut donc considérer que sur les premiers degrés de variation de l'angle incident, le déglacement latéral Δ_x est constant et peut-être négligé.

Pour ce qui est de la courbe en rouge, qui correspond au déplacement latéral en y, on constate que jusqu'à environ 15° elle peut-être qualifiée de linéaire et que ensuite elle a un comportement exponentielle.

Et pour finir, la courbe en bleu du graphique de gauche représente la variation du point focal sur les axes X et Y après la lame de verre. Les points rouges qui ornent cette courbe ont pour but de marquer le passage tous les dix degrés de l'angle d'incidence i. On remarque très clairement le comportement linéaire de l'axe x cité dans le paragraphe précédent, ainsi qu'une variation de la distance entre deux Δ_y selon l'angle d'incidence.

4.1.2. Parcours des rayons à travers le tip-tilt

Et voici, la modélisation du déplacement de la focale sur l'axe X et Y. Les deux figures suivantes représentent deux cas où la position de la lame de verre est de α = 0 [°] et α = 10 [°]. Le parcours du rayon non modifié est en orange, et celui qui subit la correction est en rouge.

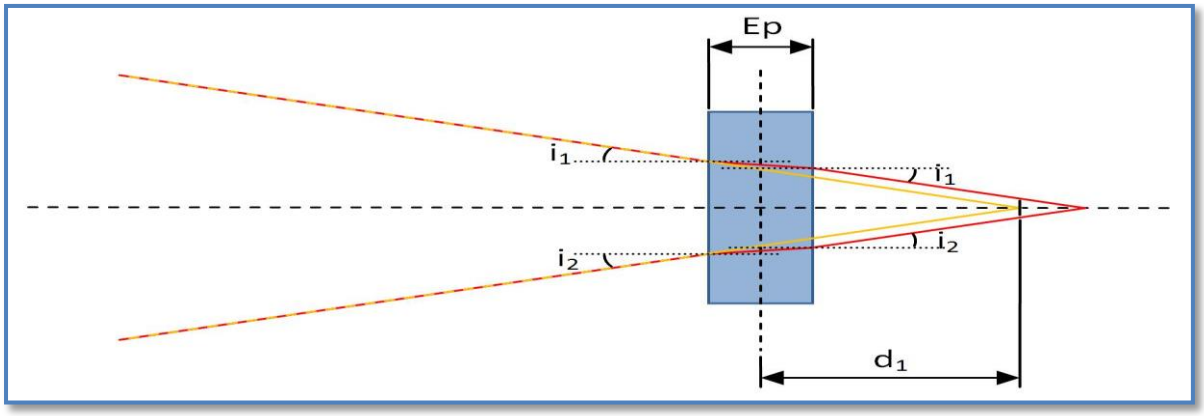


Figure 21 : Fonctionnement du tip-tilt avec α = 0 [°].

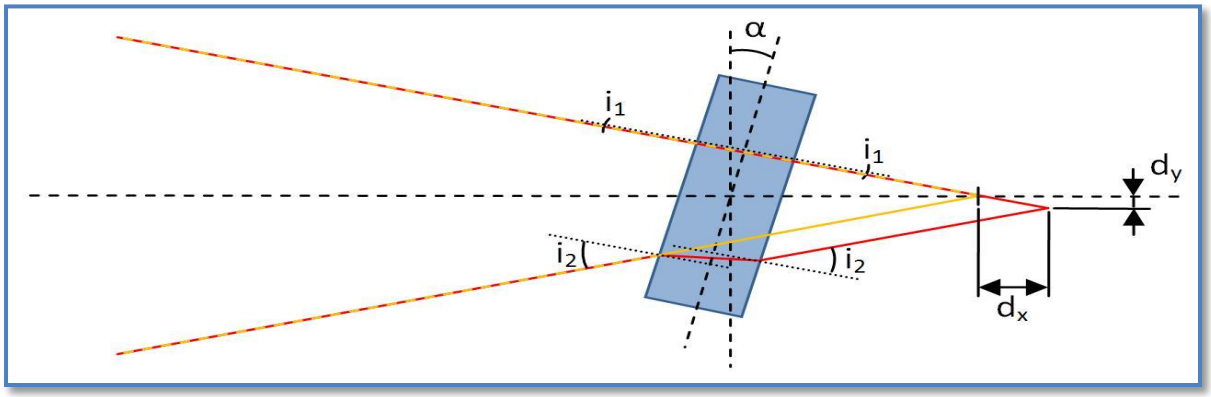


Figure 22 : Fonctionnement du tip-tilt avec α = 10 [°].

Le déplacement du rayon de sortie par rapport au rayon d'entrée sur l'axe X et Y se trouve au moyen des formules suivantes.

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{D_{\text{télescope}}}{2 \cdot f_{\text{télescope}}}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{305}{2 \cdot 3048}\right) = 2.86\ [°] \qquad (4.05)$$

$$i_1 = \beta - \alpha \quad : \quad i_2 = \beta + \alpha \tag{4.06}$$

$$r_1 = \operatorname{asin}\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i_1)\right) \quad : \quad r_2 = \operatorname{asin}\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i_2)\right) \tag{4.07}$$

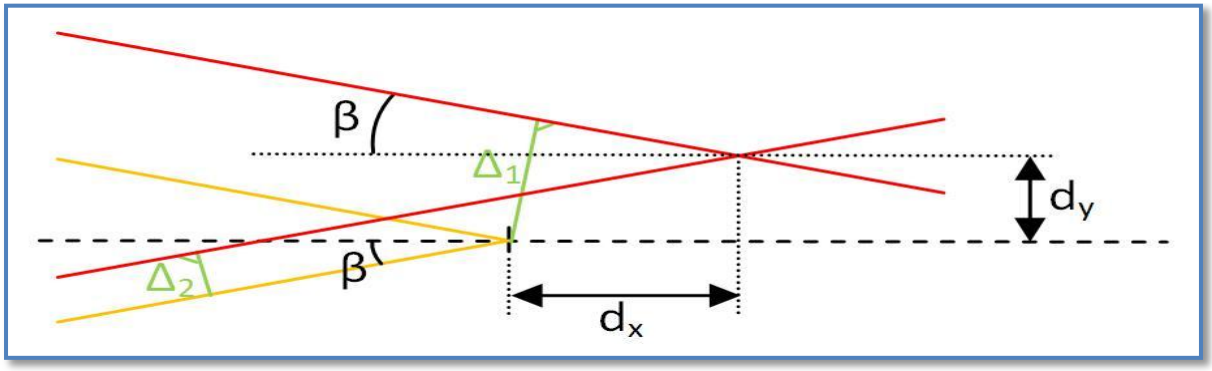


Figure 23 : Zoom sur les déplacements en x et y de la focal.

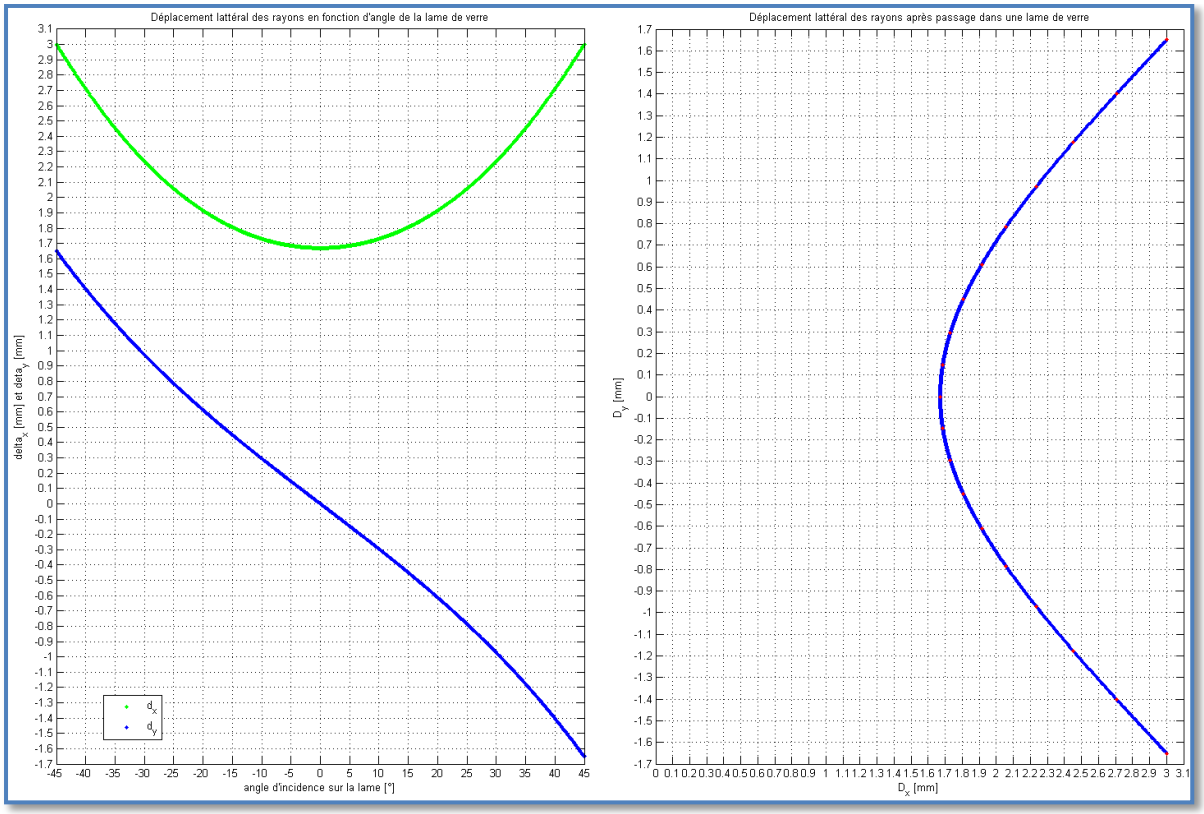
$$\Delta_1 = \mathrm{Ep} \cdot \frac{\sin(i_1 - r_1)}{\cos(r_1)} \quad : \quad \Delta_2 = \mathrm{Ep} \cdot \frac{\sin(i_2 - r_2)}{\cos(r_2)} \tag{4.08}$$

$$\Delta_{y1} = \frac{\Delta_1}{\cos(\beta)} \quad : \quad \Delta_{y2} = \frac{\Delta_2}{\cos(\beta)} \tag{4.09}$$

$$d_y = \frac{\Delta_{y1} - \Delta_{y2}}{2} \tag{4.10}$$

$$d_x = \frac{\Delta_{y1} - d_y}{\sin(\beta)} \tag{4.11}$$

Au moyen du logiciel MatLab, on dessine le graphique des équations (4.08), (4.09), (4.10) et (4.11) en fonction de l'angle de la lame de verre α en degrés. Les paramètres ont été fixés à Ep = 5 [mm], n_1 = 1 et n_2 = 1.5.



Graphique 2 : Déplacement latéral des rayons après passage dans un tip-tilt.

En analysant ce graphique, on remarque que les différentes constatations du graphique précédent sont toujours valides.

Concernant la courbe en vert, qui correspond au déplacement latéral en x, on voit que celle-ci a avec un offset de 1.67 [mm] et que jusqu'à 13 [°], elle ne varie que d'un dixième de millimètre. On peut donc considérer que sur les premiers degrés de variation de l'angle incident, le déplacement latéral Δ_x est constant et qu'il peut-être négligé.

Pour ce qui est de la courbe en bleu du graphique de gauche, qui correspond au déplacement latéral en y, on constate que jusqu'à environ 15° elle peut-être qualifiée de linéaire et que ensuite elle a un comportement exponentielle.

Et pour finir, la courbe en bleu du graphique de gauche représente la variation du point focal sur l'axe X et Y après la lame de verre. Les points rouges qui ornent cette courbe ont pour but de marquer le passage tous les cinq degrés de l'angle alpha de la lame. On remarque très clairement le comportement linéaire de l'axe x cité dans le paragraphe précédent, ainsi qu'une variation du pas selon l'angle alpha.

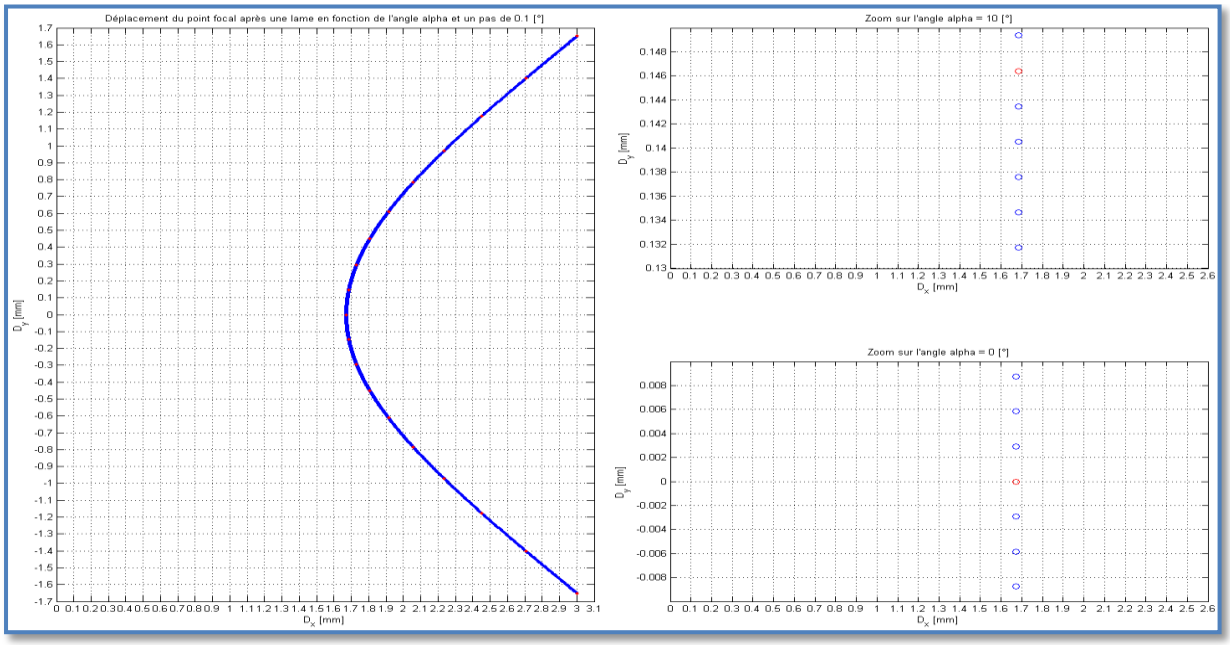
C'est pour ces différentes raisons, qu'il a été décidé de s'arranger pour que l'angle alpha de la rotation de la lame de verre ne soit pas plus grand que 10 [°].

4.2. Prévisions théoriques du tip-tilt

4.2.1. Résolution angulaire du système

Le pas angulaire est défini par le déplacement minimal que doit subir la lame de verre pour qu'elle puisse faire une correction de moins d'un pixel sur la CCD. Les plus préformantes CCD disponibles sur le site de SBIG ont au minimum 3 [µm] de taille de pixel. Ce qui donne le pas de correction qui est de **d_{pas} = 3 [µm]**.

Ensuite, le logiciel MatLab permet de définir la variation minimale de l'angle α afin de garantir le pas de correction d_{pas}. Celui-ci est de **α_{pas} = 0.1 [°]** ce qui correspond, sur les deux graphiques de droite ci-dessous au pas sur l'axe D_y entre deux points.



Graphique 3 : Résolution angulaire de α en fonction de la distance Dy.

4.2.2. Rotation de la lame de verre pour un déplacement maximal d'une étoile

La plus grande perturbation que le tip-tilt va devoir corriger est d'environ 2 [arcsec]. Il va maintenant s'agir de calculer de combien l'image a été déplacée sur la CCD et, ensuite, de combien il a fallu bouger l'angle α de la lame de verre.

Afin de connaître la correspondance entre un angle en degré et un angle en arc seconde, on utilise la formule ci-dessous.

$$angle_en_degré = \frac{angle_en_arcsec}{3600} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360} \tag{4.12}$$

Puis, en connaissant la focal du télescope, qui est de f = 3048 [mm], ainsi que la formule suivante, on trouve le déplacement de l'image sur la CCD.

$$d = \beta \cdot f = \frac{angle_en_arcsec}{3600} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot f = \frac{2}{3600} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot 3.048 = 29.55\ [\mu m] \tag{4.13}$$

Pour la suite des calculs, il a été choisi de prendre la valeur de **la perturbation maximale d = 30 [µm]**.

Et pour finir, dans le paragraphe précédent 4.2.1, *Résolution angulaire du système*, on a déterminés le rapport entre le pas sur la CCD et le pas sur l'angle α de la lame de verre. Voici donc l'angle α pour une perturbation maximale.

$$\alpha = d \cdot \frac{\alpha_{pas}}{d_{pas}} = 30 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0.1}{3 \cdot 10^{-6}} = 1\ [°] \tag{4.14}$$

La valeur de la correction à apporter sur **l'angle α pour une perturbation maximale est donc de 1 [°]**.

4.2.3. Correction maximal du système

Maintenant, il va s'agir de vérifier le choix de fixer la rotation maximal de la lame de verre à 10 [°]. Pour ce faire, il s'agit de déterminer la perturbation maximale en seconde d'arc que le système peut corriger. Le déroulement va se faire inversement à celui du paragraphe précédent 4.2.2, *Rotation de la lame de verre pour un déplacement maximal d'une étoile*.

$$d = \alpha \cdot \frac{d_{pas}}{\alpha_{pas}} = 10 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{0.1} = 300\ [\mu m] \tag{4.15}$$

$$angle_en_arcsec = d \cdot \frac{3600}{f} \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} = 300 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3600}{3.048} \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} = 20.3\ [arcsec] \tag{4.16}$$

Ce qui donne **une variation maximale de l'étoile guide de 20.3 [arcsec]**.

4.2.4. Temps minimal de correction

Le choix de la fréquence de correction maximale se fait en prenant de nouveau comme référence les caractéristiques des instruments SBIG. Ceux-ci ont une fréquence d'environ 15 [Hz]. Ce qui donne un temps de correction de **t_{corr} = 66.7 [ms]**.

4.2.5. Vitesse angulaire du système

La vitesse angulaire du système se détermine au moyen de l'équation suivante ainsi que des valeurs déterminées dans les paragraphes précédents 4.2.1, *résolution angulaire du système*, et 4.2.2, *Rotation de la lame de verre pour un déplacement maximal d'une étoile*.

$$\omega_{lame} = \frac{\alpha_{corr}}{t_{corr}} = \frac{1}{66.7 \cdot 10^{-3}} = 14.99\ \left[\frac{°}{s}\right] \tag{4.17}$$

Ce qui donne **une vitesse angulaire ω_{lame} = 15 [°/s]**.

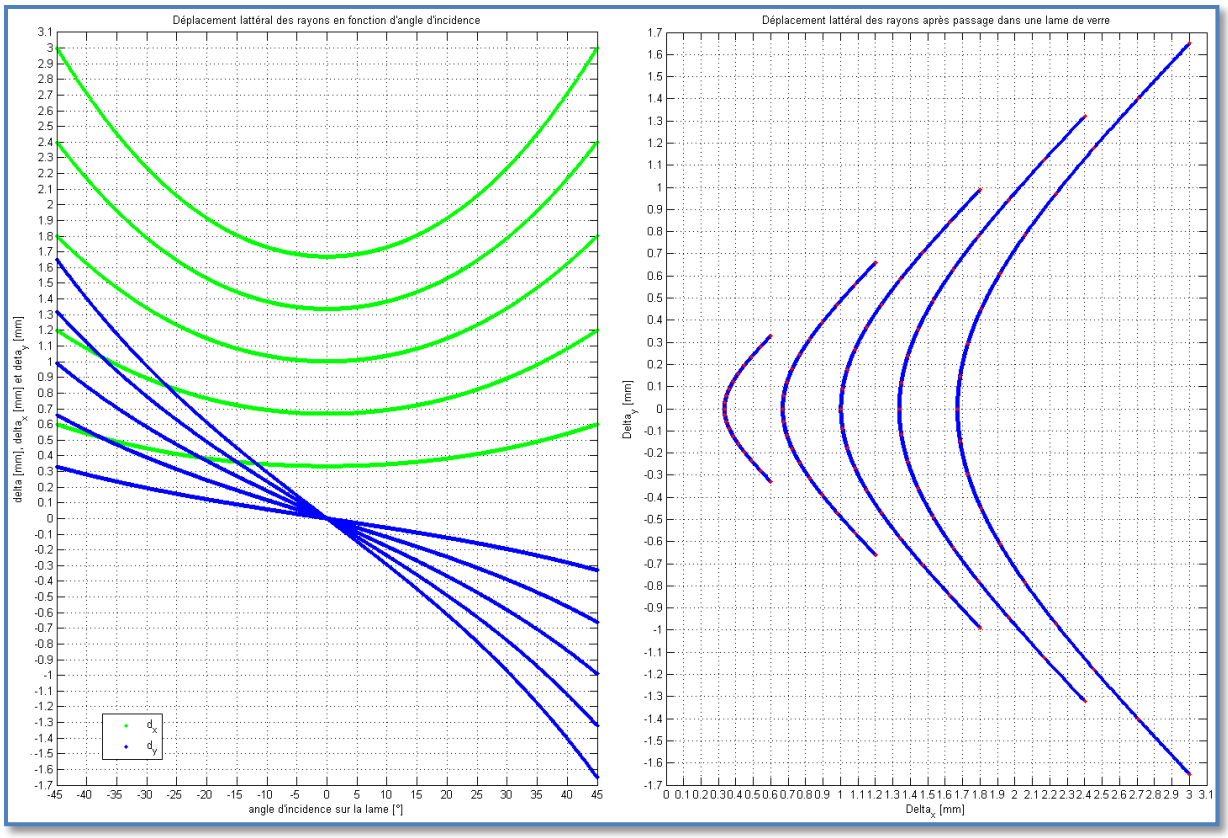
4.2.6. L'état de surface

L'état de surface doit être plus fin que la longueur d'onde qui le traverse. Il a donc été décidé d'utiliser un **facteur λ/10**.

4.2.7. L'épaisseur de la lame de verre

Passons maintenant à la valeur de l'épaisseur. Celle-ci va principalement influencer le pas delta_y entre chaque modification angulaire α. Voyons donc comment évolue ce delta_y en fonction d'une épaisseur de lame variable.

Pour ce faire, il suffit de rajouter une variation d'épaisseur de la lame sur le graphique Matlab du chapitre 4.1.2, *Parcours des rayons à travers du tip-tilt*.



Graphique 4 : Effet de la variation de l'épaisseur de la lame de verre de 1, 2, 3, 4 et 5 mm.

On remarque sur le graphique précédent, que plus l'épaisseur est grande plus les corrections apportées le seront aussi. Ce qui peut aussi être comparé avec un zoom de la courbe. L'avantage d'une grande épaisseur de lame est donc de garder plus longtemps la distance delta_y sur la partie linéaire de la courbe. Par contre, elle grandit aussi le déplacement delta_x ce qui n'est pas souhaitable. Au vu de ces différents points, il a été choisi d'utiliser **une lame de verre de 5 [mm] d'épaisseur**.

4.2.8. Le diamètre de la lame de verre

Et pour finir, le diamètre doit être suffisamment grand pour ne pas couper le faisceau de sortie du télescope et ceci dans tous les modes de fonctionnement du tip-tilt.

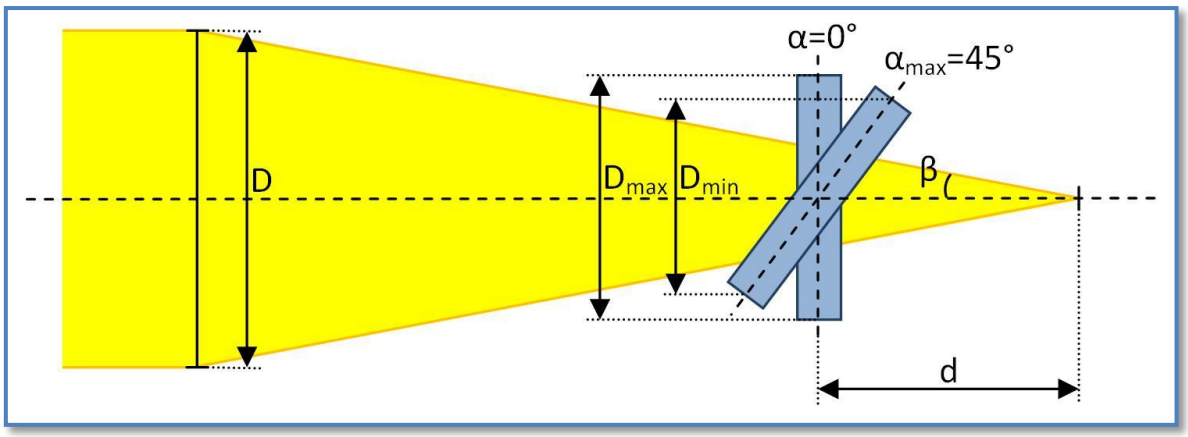


Figure 24 : Dimensionnement du diamètre de la lame de verre.

On détermine donc l'angle de focalisation du télescope.

$$\beta = atan\left(\frac{D}{2 \cdot f}\right) = atan\left(\frac{305}{2 \cdot 3048}\right) = 2.86\ [°] \tag{4.18}$$

Ensuite, on place le tip-tilt à la sortie du télescope, ce qui nous donne la distance d déterminée dans le chapitre 4.3.2, *Model optique*.

Maintenant, on trouve le diamètre D_{min} de la lame.

$$D_{min} = 2 \cdot d \cdot tan(\beta) = 2 \cdot 160 \cdot tan(2.86) = 15.99\ [mm] \tag{4.19}$$

Comme illustré sur la figure ci-dessus, la distance minimale est déterminée dans la position α = 45 °. Il faut donc trouver la distance maximale qui est par rapport à un angle α = 0 °.

$$D_{max} = \frac{D_{min}}{cos(\alpha_{max})} = \frac{15.99}{cos(45)} = 22.62\ [mm] \tag{4.20}$$

Cette valeur D_{max} est calculée pour un point au centre de la CCD. Il faut maintenant réajuster les calculs sur un point de l'image qui est au bord cette dernière. La longueur maximale de la CCD a été déterminée en allant comparer différents produits SBIG. La valeur maximale d'une CCD montée sur un appareil SBIG est d'environ 15 mm.

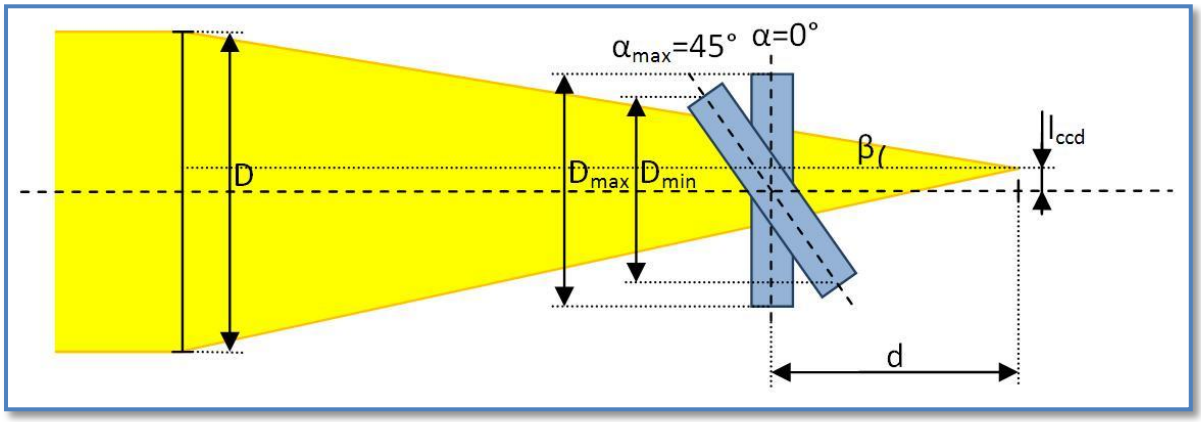


Figure 25 : Dimensionnement de la lame de verre avec correction CCD.

On prend les équations (4.18), (4.19) et (4.20) en y rajoutant cette taille maximale de CCD.

$$\beta_{ccd} = atan\left(\frac{D - l_{ccd}}{2 \cdot f}\right) = atan\left(\frac{305 - 15}{2 \cdot 3048}\right) = 2.72\ [°] \tag{4.21}$$

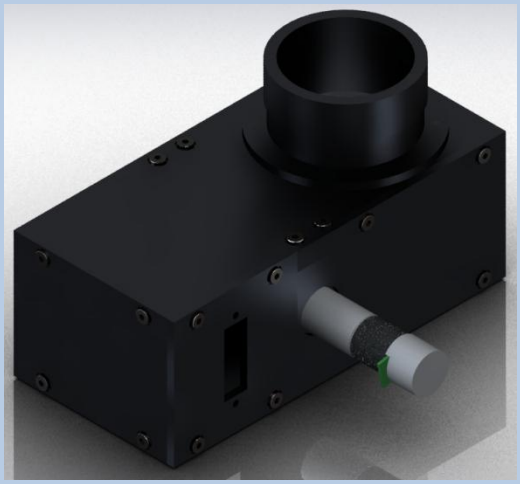
$$D_{min} = 2 \cdot d \cdot tan(\beta) + l_{ccd} = 2 \cdot 160 \cdot tan(2.80) + 15 = 30.22\ [mm] \tag{4.22}$$

$$D_{max} = \frac{D_{min}}{cos(\alpha_{max})} = \frac{30.22}{cos(45)} = 42.74\ [mm] \tag{4.23}$$

Ce qui détermine que **le diamètre de la lame de verre devra être plus grand que 43 mm**.

4.2.9. Spécifications techniques du système tip-tilt

Afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble des spécifications techniques du système, voici un tableau de récapitulation de toutes les exigences du système tip-tilt.



Diamètre min de la lame	43 [mm]
Epaisseur de la lame	5 [mm]
Etat de surface de la lame	λ/10
Course angulaire max de la lame	± 10 [°]
Pas angulaire de la lame	0.1 [°]
Fréquence correction max	15 [Hz]
Vitesse angulaire max	15 [°/s]
Rotation de la lame pour déplacement max de l'étoile	1 [°]
Correction max du système	20.3 [arcsec]

Tableau 2 : Spécifications techniques du système.

4.3. Système complet de prise d'image

Voyons maintenant plus attentivement la méthode de prise d'image au moyen d'un télescope. Pour se faire, l'explication va se décomposer en deux parties : le modèle théorique ainsi que le modèle optique des différents appareils. Cette manière de procéder a pour but de bien faire le tour du sujet avant de commencer à l'approfondir.

4.3.1. Modèle théorique

Commençons par le modèle théorique, celui-ci est une représentation symbolique des différents éléments utiles à la prise d'image d'un objet dans le ciel. Il permet donc de contribuer à la compréhension globale du principe de fonctionnement. Sa représentation schématique est illustrée sur la figure ci-dessous.

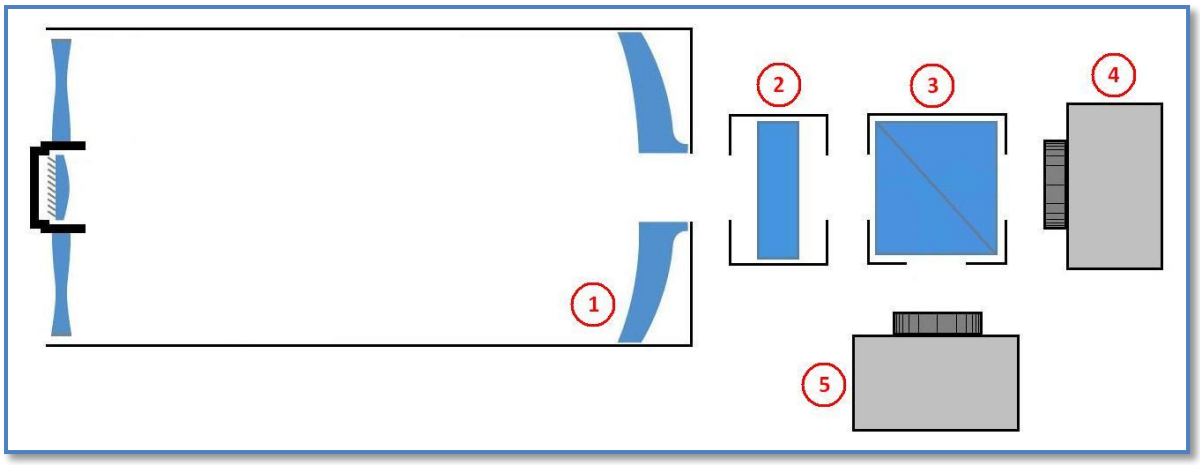


Figure 26 : Model théorique du principe de fonctionnement.

Voici la liste des différents éléments qui constituent le montage et qui seront traités plus en détail dans le modèle suivant.

1. Un télescope
2. Un tip-tilt
3. Un beam splitter
4. Un autoguider (CCD ou quatre-quadrants)
5. Une CCD de prise d'image

4.3.2. Modèle optique

En ce qui concerne le modèle optique, celui-ci défini le parcours des rayons lumineux dans les différents éléments qui constituent le montage. Il permet donc de comprendre la fonction de ces derniers.

Commençons par le début, c'est-à-dire par l'objet que nous voulons observer dans le ciel. Pour être observé, ce dernier doit générer, ou réfléchir, une source de lumière. Vu la distance qui le sépare de nous, nous considérons que le faisceau lumineux est uniquement composé de rayons parallèles.

Ce concept implique que notre premier élément, le télescope, a pour tache de focaliser ces rayons à sa sortie. Le parcours de ces derniers est schématisé sur la figure ci-dessous.

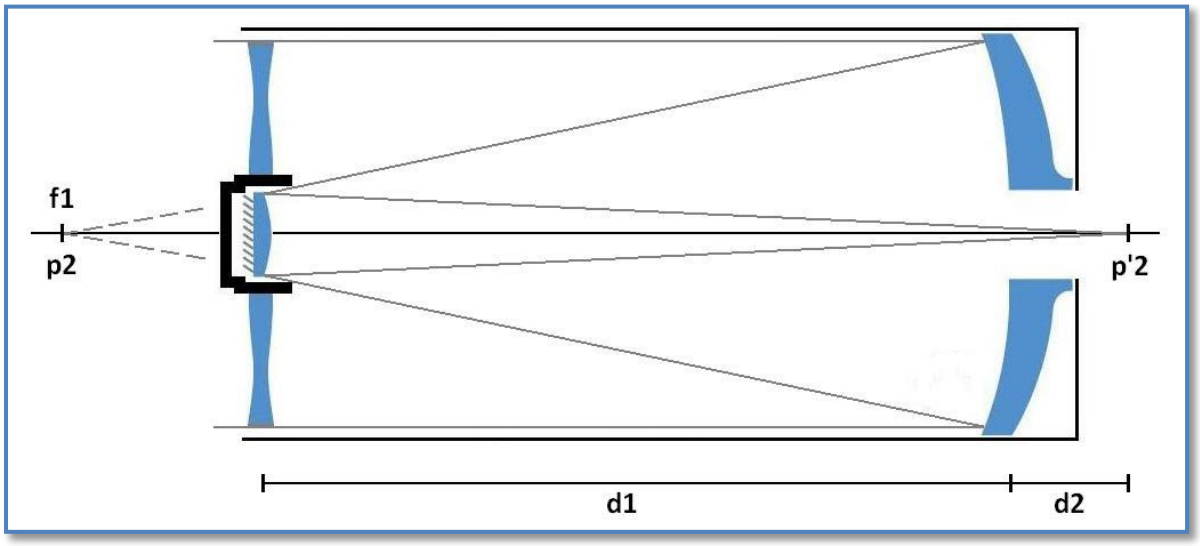


Figure 27 : Schéma optique du télescope.

On commence par placer l'origine au centre du premier miroir. Ce qui va produire une image à sa focale f_1. Ensuite le deuxième miroir va renvoyer le faisceau derrière le premier miroir selon les équations suivantes.

$$p_2 = f_1 - d_1 \tag{4.24}$$

$$p'_2 = \frac{1}{\frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2}} \tag{4.25}$$

$$d_2 = p'_2 - d_1 \tag{4.26}$$

A l'aide des équations (4.24), (4.25) et (4.26) on obtient la relation (4.27) qui décrit la position de l'image à la sortie du télescope.

$$d_2 = \frac{1}{\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1 - d_1}} - d_1 \tag{4.27}$$

L'angle de sortie du rayon lumineux est de :

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{\frac{D_2}{2}}{p'_2}\right) \tag{4.28}$$

De plus, si le faisceau n'entre pas de façon perpendiculaire dans le télescope, mais avec un angle α, celui-ci va être décalé perpendiculairement de l'axe x de :

$$y = \mathrm{f} \cdot \alpha \tag{4.29}$$

Malheureusement, la fiche technique du fabriquant n'est pas assez détaillée. Il a donc fallu trouver une autre méthode pour déterminer la distance d_2.

La solution utilisée, vient du fait que le laboratoire d'optique possède déjà un télescope avec un flip miroir et une CCD. Il suffit de schématiser ce montage sur SolidWorks et après de mesurer la distance d_2 qui nous intéresse.

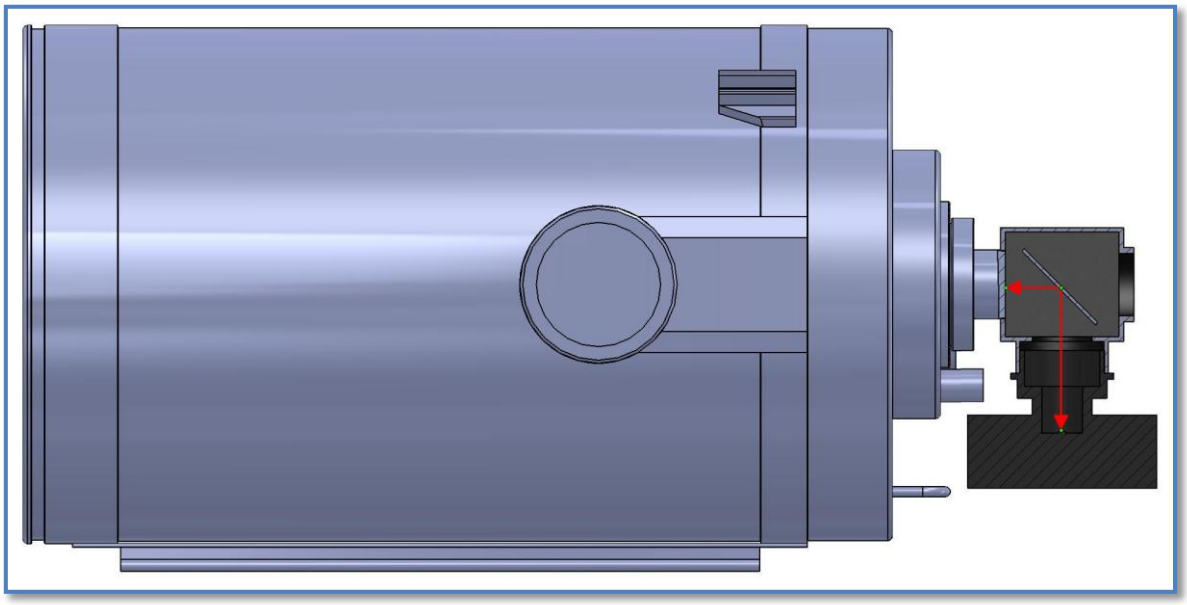


Figure 28 : Montage du télescope avec flip miroir et CCD.

En redressant la flèche rouge sur la figure ci-dessus, on détermine la distance d_2 de notre montage qui est d'environ 160 mm.

Pour ce qui est du deuxième appareil, le tip-tilt, son explication a déjà été traitée un peu avant dans ce rapport et de façon plus détaillée. On passe donc sans autre à l'appareil suivant.

Lors de la réalisation de cet exemple, le choix fut orienté sur un système de guidage hors axe. C'est donc ici qu'entre en jeu le beam splitter. Celui-ci est constitué de deux prismes triangulaires collés ensemble et qui forment un cube permettant de réfléchir partiellement la lumière au niveau de leur jonction. Il va donc séparer le faisceau de sortie du tip-tilt en deux. Ce qui va permettre de pouvoir faire la prise d'image en même temps, et de façon distincte, que la mesure de la correction à apporter sur la monture du télescope et le tip-tilt.

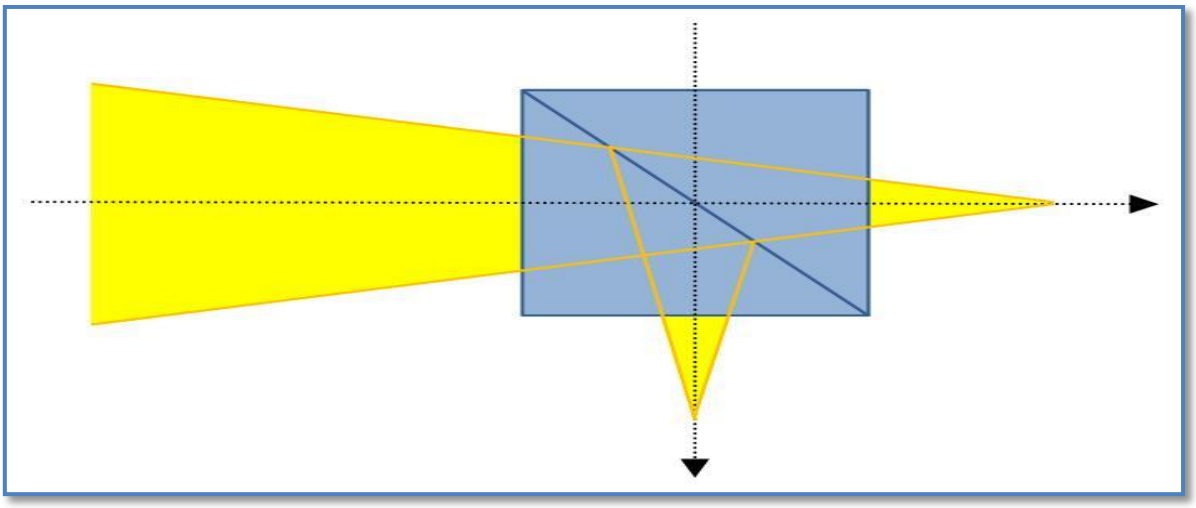


Figure 29 : Schéma du beam splitter.

Quant à lui, le quatre-quadrants est l'appareil qui permet de mesurer le déplacement de l'étoile de référence par rapport à sa position d'origine. Celui-ci va, ensuite, donner les corrections à apporter au tip-tilt pour recentrer l'image.

Et pour finir, voici le capteur qui va prendre l'image qui nous intéresse tant. Dans notre cas, on va utilisé une CCD décrite dans le chapitre 3, *Télescope Meade LX200 et CCD SBIG ST-402 ME*.

5. Description du système tip-tilt

Cette cinquième partie comprend tous les éléments utiles à la réalisation concrète de ce projet. Elle commence par traiter du catalogue des solutions. Puis, en liaison avec les prévisions théoriques du chapitre précédent, des calculs de dimensionnements de la lame de verre ainsi que des deux moteurs. Ensuite, viennent la vue éclatée ainsi que la nomenclature de la partie mécanique du projet. Et pour finir, elle fait le point sur la méthode choisie pour la commande du système.

5.1. Catalogue des solutions

5.1.1. Mécanisme de rotation sur deux axes

La principale fonction de ce système est de garantir le déplacement d'une lame de verre à face parallèle sur deux axes de rotations. Ces deux axes sont perpendiculaires ente-eux et parallèles à la surface de lame, comme illustré sur la figure suivante.

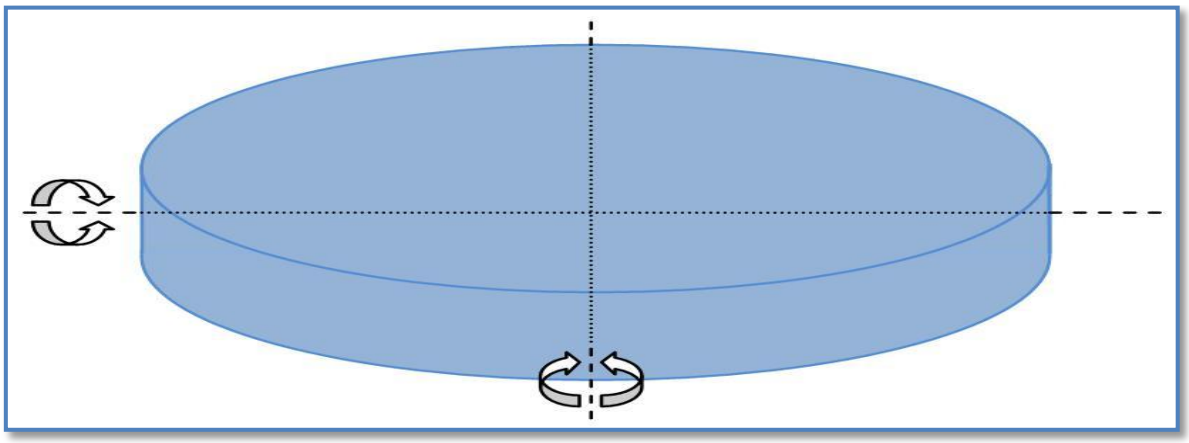


Figure 30 : Rotation de la lame de verre.

On constate sans peine, que la principale difficulté est de faire les deux mouvements en parallèle. Ce type de mouvement est très compliqué si ce n'est impossible. Il va donc falloir réfléchir à un système dont les mouvements travaillent en série. Cette méthode de travail consiste à résoudre le problème par étage, c'est-à-dire un mouvement de rotation par étage.

Lors de la réalisation de la partie mécanique, deux concepts possibles ont été envisagés et sont présenté ci-dessous.

Dans le premier concept, illustré sur la figure suivante, la lame de verre vient se fixer dans une bague qui est munie de deux pivots, un de chaque côté de celle-ci, et qui vont garantir la rotation sur le premier axe. Puis, ce système est monté sur une deuxième bague qui va, elle, faire la rotation sur le deuxième axe.

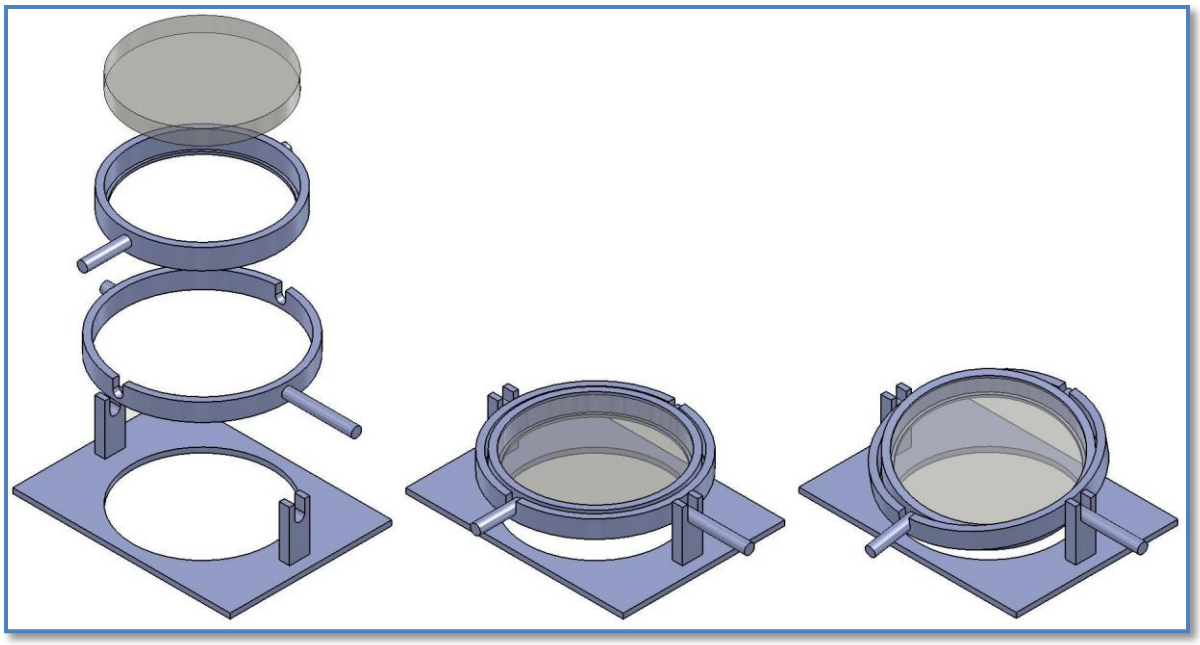


Figure 31 : Système mécanique du premier concept.

Son principal avantage est d'avoir un système mécaniquement simple à réaliser. Dans le centre des axes de rotation se trouve au centre de la lame de verre ce qui facilite grandement la commande. Par contre, le défaut d'un tel montage est que la fixation du moteur du deuxième étage, celui qui tient la lame de verre, se fait sur le côté de la bague. Ce qui entraîne un porte-à-faux qui va générer une inertie du système et donc un couple de rotation supplémentaire.

Passons maintenant au deuxième prototype. Celui-ci a été pensé de telle façon à éliminer les défauts de son prédécesseur. La lame de verre est toujours montée dans une bague, sauf que dans ce système, le centre de rotation n'est plus au centre de la lame de verre mais décalé sur la gauche. Et ceci dans le but que le centre de gravité soit aux centre des deux axes de rotation et ainsi minimiser le couple généré par les inerties du système. C'est pourquoi cette solution a été retenue.

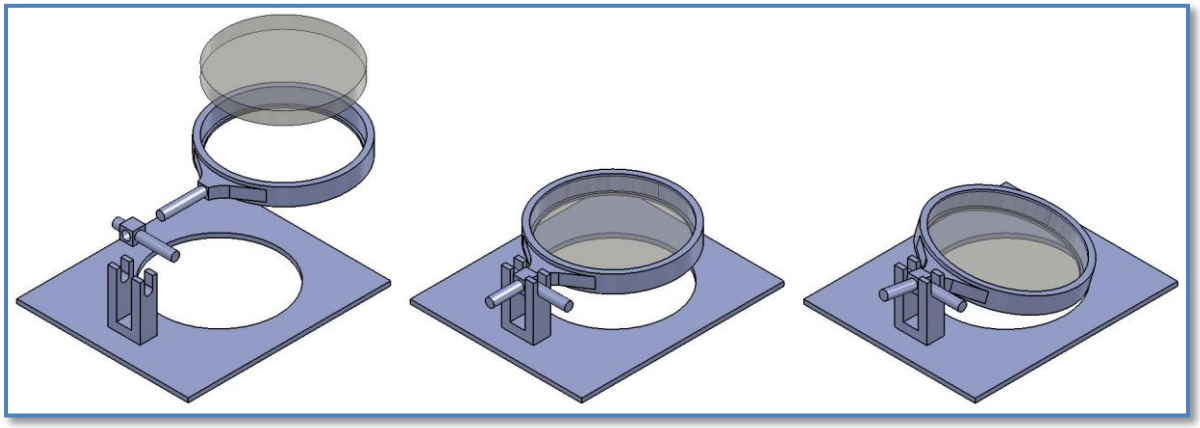


Figure 32 : Système mécanique du deuxième concept.

5.1.2. Fixation de la lame de verre

Voyons maintenant le choix de la méthode de fixation de la lame de verre. Il existe déjà dans le commerce plusieurs systèmes. En voici trois, de chez le fournisseur de matériel optique THORLABS, qui paraissent correspondre aux attentes de ce projet. Le tableau ci-dessous illustre les trois systèmes qu'il va s'agir de départager.

Désignation fabriquant	Caractéristique	Prix
LH2/M	Adjustable Lens Mount: Ø 0.77'' to Ø 2.28''	41.60 Euro
LMR2/M	Lens Mount for Ø 2'', One Retaining Ring Included	20.90 Euro
FMP2/M	Fixed Ø 2'' Optical Mount	17.20 Euro

Tableau 3 : Choix du système de fixation de la lame de verre.

Figure 33 : Support Lentille LH2/M de chez THORLABS.[10]

Le premier système retenu consiste à fixer la lame dans une bague et la serrer au moyen de trois tiges montées à 120 [°]. Le principal avantage de se montage est de pouvoir facilement changer de diamètre de lame de verre. Par contre, il prend une plus grande place que les deux autres systèmes de fixation.

Le deuxième système consiste à monter la lentille dans une bague et de la fixer axialement avec une vis. L'avantage de ce montage, est le maintient de la lentille de façon uniforme en garantissant un faible volume.

Figure 34 : Support lentille LMR2/M de chez THORLABS.[10]

[10] Source : http://www.thorlabs.de/

Le troisième montage consiste à tenir la lentille dans une bague et de la fixer radialement avec une vis. L'avantage est de ne pas obstruer le diamètre la lentille comme on peut le voir dans le système précédent. Toutefois, on remarque la prise de volume supplémentaire pour le serrage de la vis.

Figure 35 : Support lentille FMP2/M de chez THORLABS.[10]

En vue des différents avantages et inconvénients de chaque système, il a été choisi d'utiliser le deuxième, **LMR2/M**, car il semble mieux répondre aux attentes de ce projet.

5.1.3. Accouplement moteur

La fonction de cette pièce est de garantir la fixation de l'arbre de sortie du moteur avec la suite du système. Il existe différentes méthodes qui se trouvent dans le commerce sauf que ces dernières sont mal adaptées pour ce cas. Il a donc fallu la redimensionner.

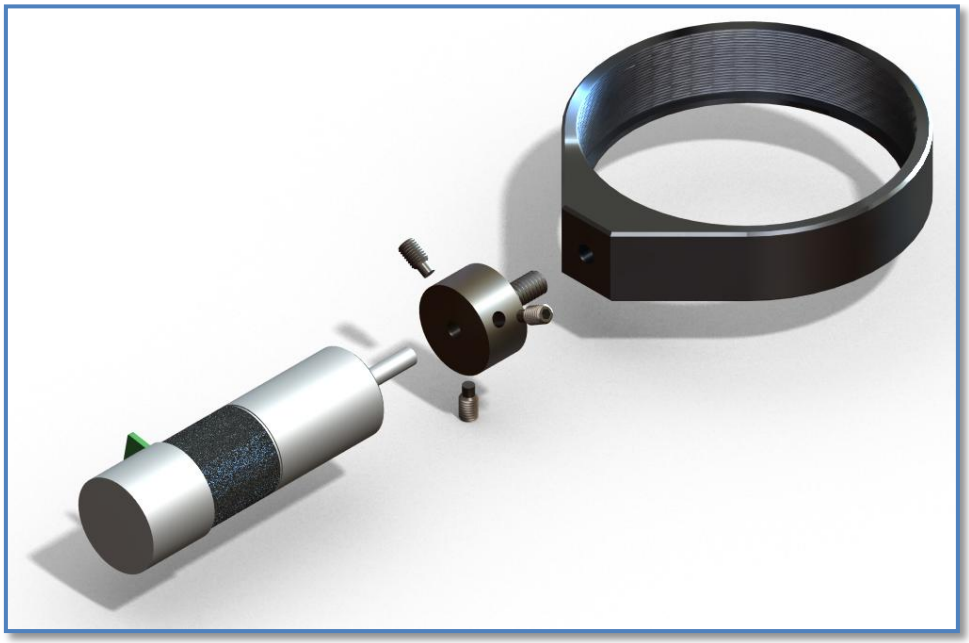


Figure 36 : Raccord moteur.

La figure ci-dessus montre la méthode de raccordement retenue. L'arbre du moteur vient s'insérer dans l'alésage de la pièce de raccordement et est fixé au moyen de trois vis sans tête montées à 120 [°]. Puis, le reste du système vient se monter sur le filetage de l'autre côté du raccord.

5.1.4. Conception de la boîte

La solution optimale pour la réalisation de la boîte du système est une pièce moulée permettant de diminuer au maximum les espaces non utilisée en son sein. Toutefois, lors de réalisation de prototype, ce type d'usinage n'est par réaliste de par son coût ainsi que la longue durée de production de la première pièce. C'est pourquoi il a fallu réfléchir à une autre méthode.

La première idée a été d'utiliser deux plaques montées ensemble au moyen d'un cylindre. Cette idée est illustrée sur la figure suivante. Son principal avantage est d'utiliser peu d'éléments et, qui plus est, sont simples à usiner. Par contre, elle a le grand désavantage d'avoir beaucoup d'espace non utilisé. C'est donc pourquoi cette boîte n'a pas été retenue.

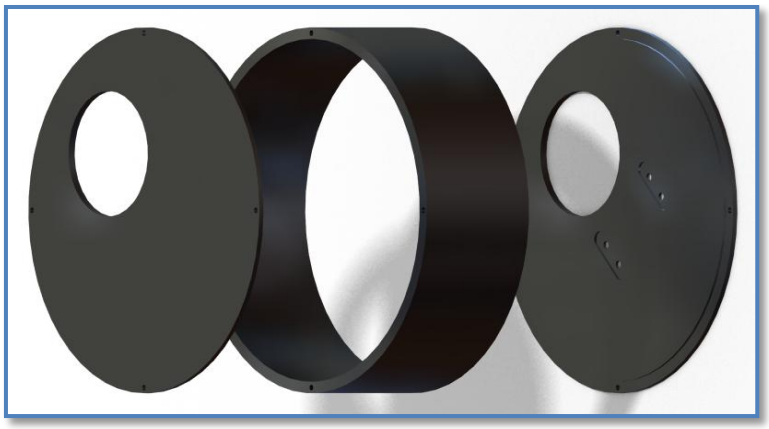


Figure 37 : Premier prototype de boîte.

Passons à la deuxième boîte. Celle-ci est construite à partir de plaques qui viennent se fixer ensemble au moyen de vis. L'avantage de ce montage est de mieux gérer la place dans la boîte. Toutefois, elle nécessite plus de pièces ainsi qu'un volume de travail plus grand lors de l'usinage. En vue des différents avantages et inconvénients, c'est cette dernière idée qui a été retenue.

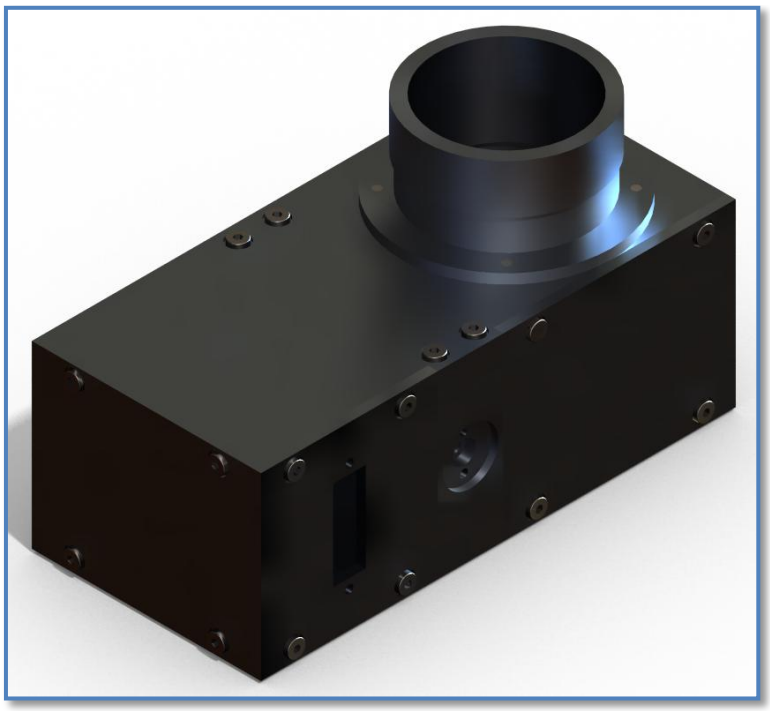


Figure 38 : Deuxième prototype de la boîte.

5.1.5. Fixation du télescope et du beam splitter sur le tip-tilt

Le choix de la liaison entre le système de correction tip-tilt et le télescope s'est porté sur un tube standardisé 2 [inches] qui se monte sur un raccord visé à la sortie du télescope. A son autre extrémité, la collerette du tube est fixée au moyen de quatre vis sur le tip-tilt. La figure suivante représente le tube qui va être usiné.

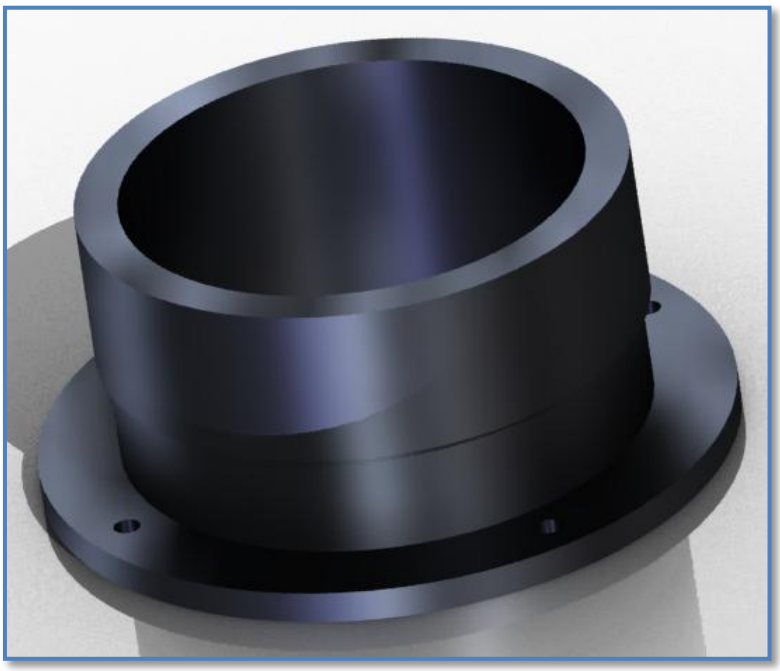


Figure 39 : Raccord entre le tip-tilt et le télescope.

Pour ce qui est de la liaison de fixation du tip-tilt au beam-splitter, celle-ci ce fait, contrairement à la fixation tip-tilt au télescope, directement en vissant les deux faces des deux boîtes ensemble.

5.2. Calcul de dimensionnements

5.2.1. La lame de verre

Le choix de la lame de verre ce fait au moyen des trois paramètres qui sont, l'épaisseur, le diamètre ainsi que l'état de surface. Il va maintenant s'agir de dimensionner ces éléments.

En résumant les calculs de dimensionnement qui précédent, *4.2. Prévisions théoriques du tip-tilt*, la lame doit avoir les caractéristiques suivantes. Un diamètre plus grand que 43 [mm], une épaisseur de 5 [mm] et un état de surface de λ/10.

Le choix s'est porté sur **une lame de verre à faces parallèles M47,836 du fournisseur EDMUND** dont les caractéristiques sont les suivantes.

- Un diamètre de 50 [mm].
- Une épaisseur de 5 [mm].
- Un état de surface de λ/10.

5.2.2. Les deux moteurs

La première chose à faire dans le choix d'un moteur est de définir son type. C'est-à-dire entre un moteur à courant continu ou un moteur pas-à-pas.

Pour rappel, les principales différences entre ces deux types de moteur sont les suivantes :

- Premièrement, le moteur pas-à-pas, contrairement au moteur CC qui tourne librement, a un couple réluctant qui garantit le maintient de sa position lorsqu'il n'est pas alimenté.
- Deuxièmement, afin de garantir un bon positionnement du moteur CC, celui-ci doit avoir un organe de contrôle, par exemple un encodeur, contrairement à son homologue qui peut se commander en mode pas à pas.

On remarque tout de suite l'avantage du moteur CC lors d'un long déplacement et celui du moteur pas-à-pas quand il s'agit de garantir un petit déplacement nécessitant un couple de maintient lorsque ce dernier n'est plus alimenté.

Il devient évident que le choix du moteur pas-à-pas s'impose de lui-même. Ce dernier offre une facilité de commande ainsi qu'au repos, un couple de maintient.

Maintenant il s'agit de définir les différents paramètres du moteur, tel que le réducteur, la puissance, la vitesse, le couple ainsi que la résolution angulaire.

Le choix du fabriquant s'est porté sur Faulhaber car il a beaucoup de choix ainsi que des produits facilement modulables. Comme par exemple un moteur pas-à-pas avec un réducteur et une carte de commande.

En résumant les calculs de dimensionnement des chapitres 5.2.2.1 *Couple moteur*, 5.2.2.2 *Puissance moteur* et 5.2.3 *Réducteur*, le premier moteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Puissance de 0.9 [mW].
- Vitesse angulaire de 380 [rpm].
- Couple de 15 [Nmm].
- Pas de 15.2 [°].

Le deuxième moteur :

- Puissance de 10.5 [mW].
- Vitesse angulaire de 380 [rpm].
- Couple de 177 [Nmm].
- Pas de 15.2 [°].

Et enfin, le réducteur :

- Rapport de réduction de 152 [-].
- Rendement de 67 [%].

Il a été choisi d'utiliser le matériel suivant chez le fabriquant Faulhaber :

- **Deux moteur AM1524-2R-V-6-35-73-0904**
- **Deux réducteurs 15A-152:1**
- **Deux encodeurs AE23B8 du fournisseur Faulhaber.**

5.2.2.1. Couple moteur

En vue de la géométrie du système, le couple nécessaire pour faire bouger la lame de verre est déterminée par les inerties du système, l'accélération angulaire ainsi que les frottements.

Commençons par calculer le couple du moteur du premier étage. La figure ci-dessous illustre le montage réalisé à l'aide du logiciel SolidWorks.

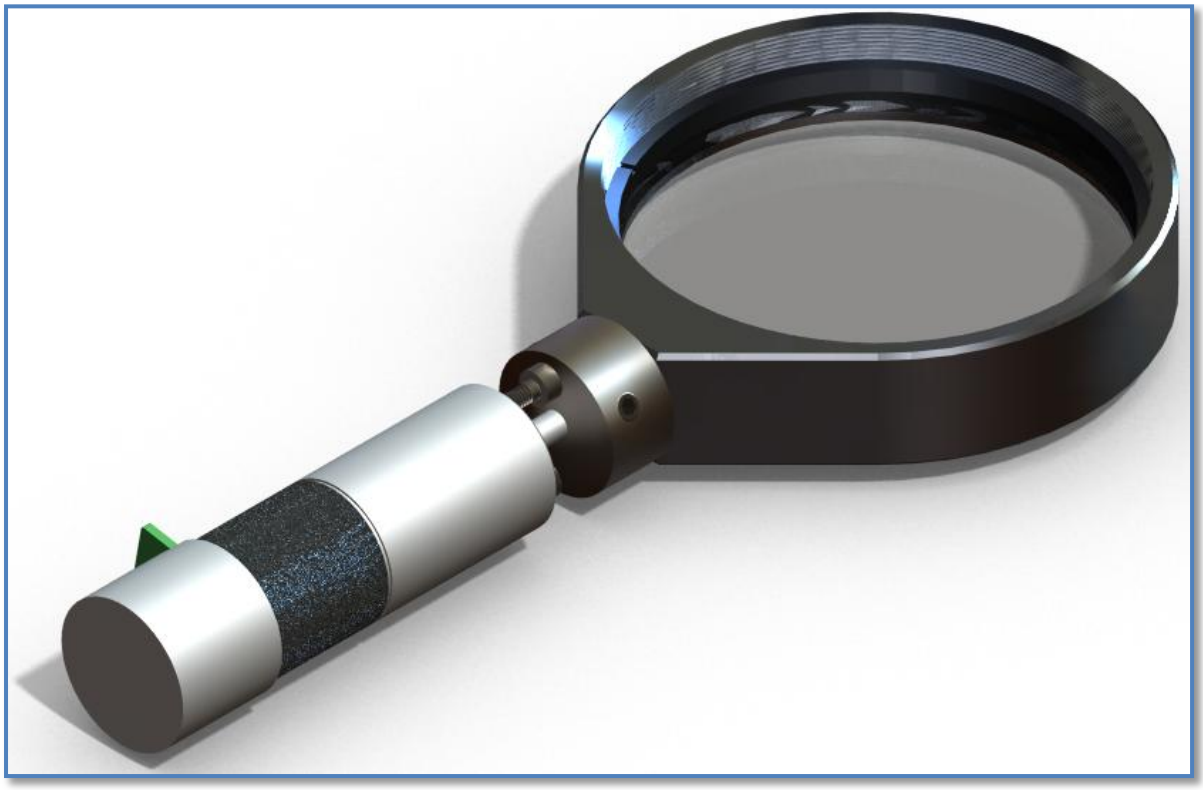


Figure 40 : Première étage du tip-tilt.

Tout d'abord, au moyen du logiciel SolidWorks, l'inertie de chaque élément du montage par rapport au centre de rotation de l'arbre du moteur.

$$J_{lame} = 4015 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{support_lame} = 5300 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{vis_lame} = 505 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{raccord} = 295 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{mot1} = 45 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

Puis, on détermine l'inertie totale du système lors de la rotation de la lame de verre.

$$J_{tot1} = J_{lame1} + J_{support_{lame1}} + J_{vis_{lame1}} + J_{raccord1} + J_{mot1} = 10160 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

Une fois cela fait, on trouve le couple à appliquer sur le moteur afin de vaincre cette inertie.

$$T_{inertie1} = J_{tot1} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 10160 \cdot 10^{-9} \cdot 225 = 2.3 \cdot 10^{-3}\ [Nm]$$

Et pour finir, on calcule le couple du premier étage.

$$\boldsymbol{T_{système1}} = T_{inertie1} = \mathbf{2.3 \cdot 10^{-3}}[\boldsymbol{Nm}] \qquad (5.01)$$

Passons maintenant au calcul du couple moteur du deuxième étage. La figure ci-dessous illustre le montage réalisé à l'aide du logiciel SolidWorks.

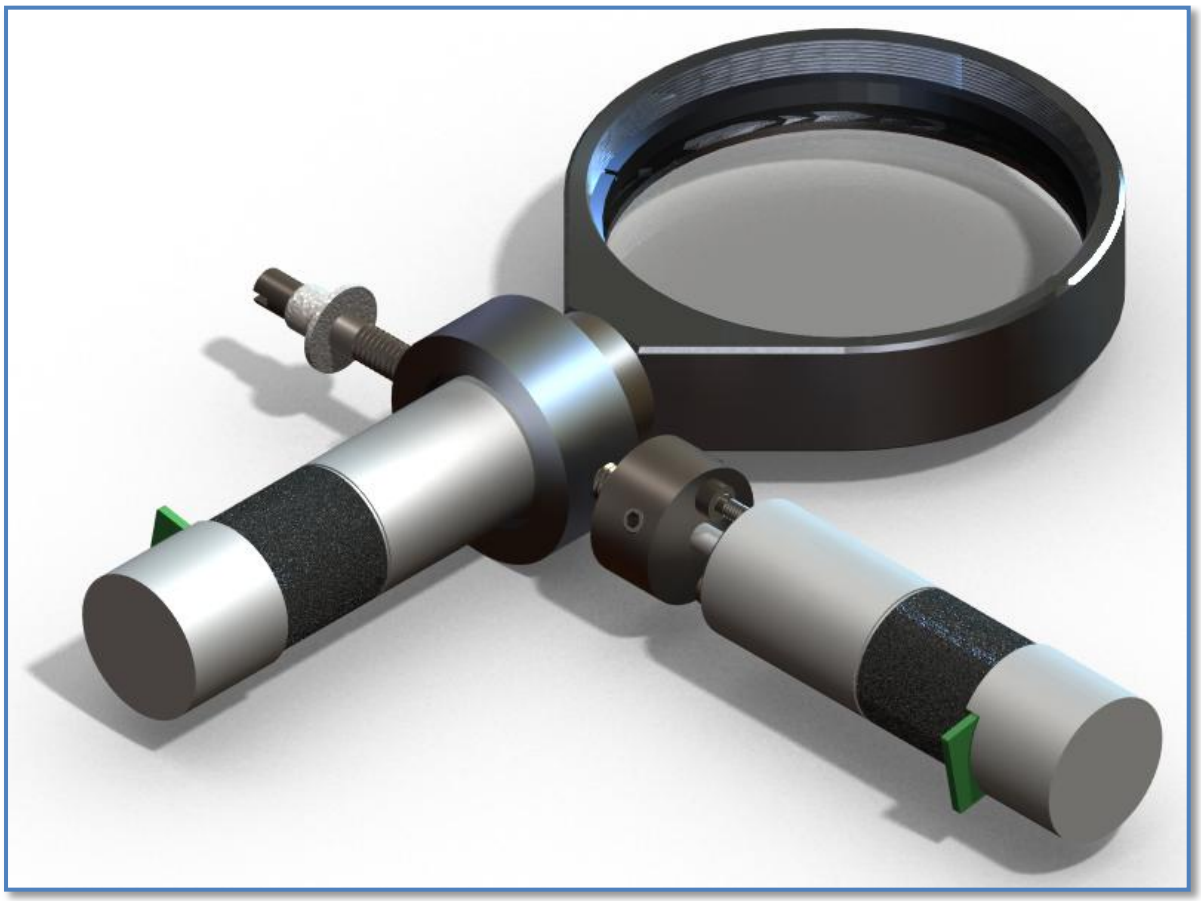


Figure 41 : Deuxième étage du tip-tilt.

Comme précédemment, on commence par calculer, au moyen du logiciel SolidWorks, l'inertie de chaque élément du montage par rapport au centre de rotation de l'arbre du moteur.

$$J_{lame} = 55715 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{support_lame} = 35040 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{vis_lame} = 3975 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{raccord1} = 1110 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{fixation2étage} = 530 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{mot1} = 22615\ \cdot 10^{-9} [kg \cdot m^2]$$

$$J_{tige} = 5 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{raccord2} = 295 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

$$J_{mot2} = 45 \cdot 10^{-9}\ [kg \cdot m^2]$$

Puis, on détermine l'inertie totale du système lors de la rotation de la lame de verre.

$$J_{tot2} = J_{lame} + J_{support_{lame}} + J_{vis_{lame}} + J_{raccord1} + J_{fixation2étage}$$
$$+ J_{mot1} + J_{tige} + J_{raccord2} + J_{mot2}$$

Une fois cela fait, on trouve le couple à appliquer sur le moteur afin de vaincre cette inertie.

$$T_{inertie2} = J_{tot2} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 119330 \cdot 10^{-9} \cdot 225 = 26.9 \cdot 10^{-3}\ [Nm]$$

Ensuite, on calcule le couple de frottement entre le palier lisse et la tige.

$$T_{frottement2} = \frac{D_1}{2}\left(\frac{m_1}{2} \cdot g \cdot \mu\right) = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2}\left(\frac{0.1}{2} \cdot 9.81 \cdot 0.05\right) = 49.1 \cdot 10^{-6}\ [Nm]$$

Et pour finir, on détermine le couple du deuxième étage.

$$\boldsymbol{T_{système2}} = T_{inertie2} + T_{frottement2} = 26.9 \cdot 10^{-3} + 49.1 \cdot 10^{-6} = \mathbf{26.9 \cdot 10^{-3}}\ [\mathbf{Nm}] \quad (5.02)$$

5.2.2.2. Puissance moteur

Les puissances des moteurs sont déterminées selon les équations ci-dessous.

$$\boldsymbol{P_{mot1}} = \frac{P_{système1}}{\eta_{réducteur}} = \frac{T_{système1} \cdot \omega_{lame}}{\eta_{réducteur}} = \frac{2.3 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot \frac{\pi}{180}}{0.67} = \mathbf{0.9}\ [\boldsymbol{mW}] \quad (5.03)$$

$$\boldsymbol{P_{mot2}} = \frac{P_{système2}}{\eta_{réducteur}} = \frac{T_{système2} \cdot \omega_{lame}}{\eta_{réducteur}} = \frac{26.9 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot \frac{\pi}{180}}{0.67} = \mathbf{10.5}\ [\boldsymbol{mW}] \quad (5.04)$$

5.2.2.3. Réducteur

Il est clair que pour les valeurs déterminées plus haut, il sera difficile de trouver un moteur à entraînement direct adéquat. Il va donc s'agir d'utiliser un réducteur. Voici les formules de transformation de ce dernier.

$$\boldsymbol{\omega_{mot}} = \omega_{lame} \cdot R = 15 \cdot 152 = 2280\ \left[\frac{°}{s}\right] \xrightarrow{\cdot\frac{\pi}{180}} 39.79\ \left[\frac{rad}{s}\right] \xrightarrow{\cdot\frac{30}{\pi}} \mathbf{380}\ [\boldsymbol{rpm}] \quad (5.05)$$

$$\boldsymbol{\alpha_{pas_mot}} = \alpha_{pas_{lame}} \cdot R = 0.1 \cdot 152 = \mathbf{15.2}\ [°] \quad (5.06)$$

$$\boldsymbol{T_{mot1}} = \frac{T_{système1}}{R} = \frac{2.3 \cdot 10^{-3}}{152} = \mathbf{15 \cdot 10^{-6}}\ [\boldsymbol{Nm}] \quad (5.07)$$

$$\boldsymbol{T_{mot2}} = \frac{T_{système2}}{R} = \frac{26.9 \cdot 10^{-3}}{152} = \mathbf{177 \cdot 10^{-6}}\ [\boldsymbol{Nm}] \quad (5.08)$$

5.3. Vues éclatées

On trouve ci-dessous deux vues éclatées. La première représente les différents éléments qui composent la boîte et la deuxième le mécanisme du tip-tilt. On remarque une numérotation sur ces dernières, celle-ci se réfère à la nomenclature du chapitre 5.4, *Nomenclature*.

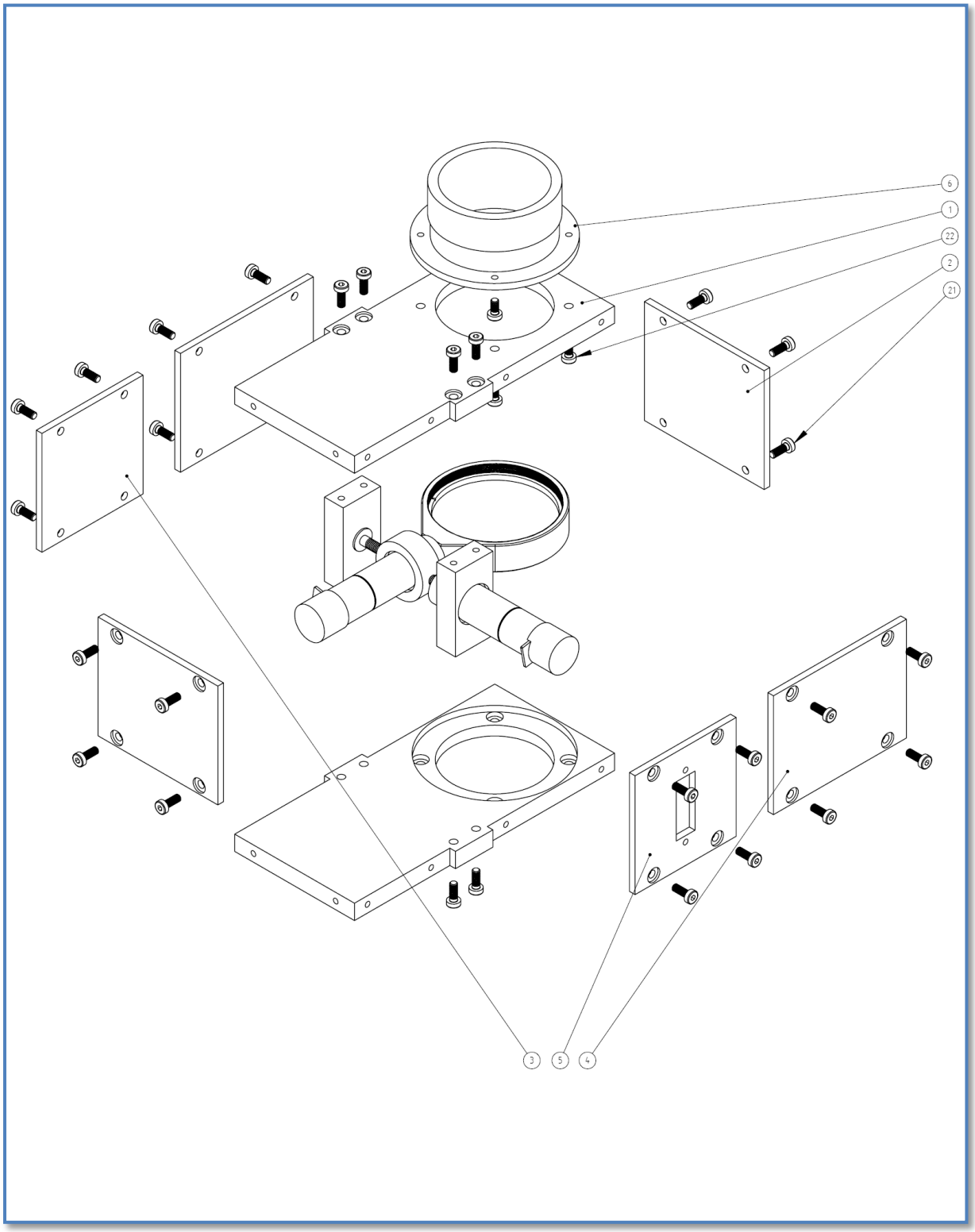


Figure 42 : Vue éclatée de la boîte.

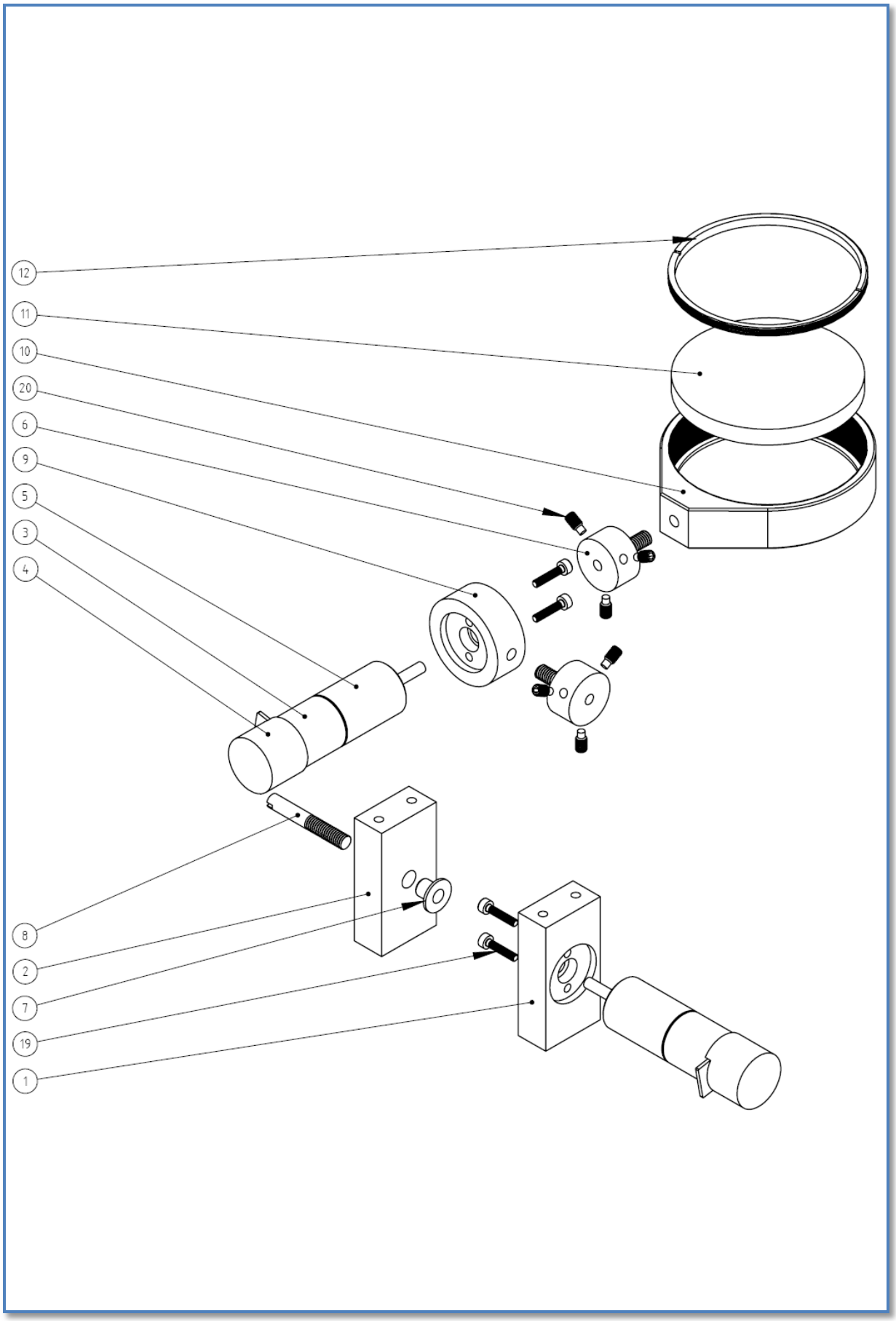


Figure 43 : Vue éclatée du système tip-tilt.

5.4. Nomenclature

Voici la liste de pièces utiles à la réalisation du tip-tilt. Les numéros d'articles sont en relation avec les deux vues éclaté du sous chapitre 5.3, *Vues éclatées*.

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	MATIERE	DESCRIPTION	QTE
1	Fixation_premier_étage1	Aluminium	39 x 20 x 10mm	1
2	Fixation_premier_étage2	Aluminium	39 x 20 x 10mm	1
3	Moteur	—	Faulhaber, AM1524-2R-V-6-35-73-0904	2
4	Encodeur	—	Faulhaber, AE23B6	2
5	Réducteur	—	Faulhaber, 15/A 152:1	2
6	Raccord	Acier	n15 x 18mm	2
7	Bague	Iglidur	Igus, JFM-0405-06	1
8	Tige_étage_1	Acier	n4 x 27mm	1
9	Fixation_deuxième_étage	Aluminium	n25 x 10mm	1
10	Fixation _lame	Aluminium	Thorlabs, LMR2/M	1
11	Lame_verre	Verre	Edmund, M47.836	1
12	Vis_axiale	Aluminium	Thorlabs, SM2RR	1
13	Boîte_face	Aluminium	139 x 70 x 8mm	2
14	Boîte_côté1	Aluminium	64 x 55 x 3mm	2
15	Boîte_côté2	Aluminium	55 x 54 x 3mm	1
16	Boîte_côté3	Aluminium	71 x 55 x 3mm	2
17	Boîte_côté4	Aluminium	55 x 54 x 3mm	1
18	Branchement_1	Aluminium	n64 x 28mm	1
19	DIN 912 M2 x 10 — 10S	Acier	Vis à tête cylindrique imbus M2x10	4
20	DIN 915 - M3 x 6-S	Acier	Vis sans tête imbus M3x6	6
21	DIN 7984 - M3 x 12 — 6.5S	Acier	Vis tête cylindrique basse imbus M3x12	32
22	DIN 7984 - M3 x 6 — 4.5S	Acier	Vis tête cylindrique basse imbus M3x6	4

Tableau 4 : Nomenclature de la partie mécanique.

5.5. Commande des moteurs

La commande des deux moteurs pas-à-pas va se faire au moyen du logiciel LabVIEW et d'une interface NI USB-6008. Puis, afin de faciliter la commande, l'utilisation d'un driver de moteur a été choisi.

5.5.1. Driver de moteur pas-à-pas

La commande du moteur ce fait au moyen d'un driver de moteur pas-à-pas. Le SAA1042 du fabriquant Motorola dont la datasheet se trouve en annexe. Voyons maintenant, au moyen de la figure ci-dessous, qu'elles sont ses entrées et sorties importantes pour notre cas de commande.

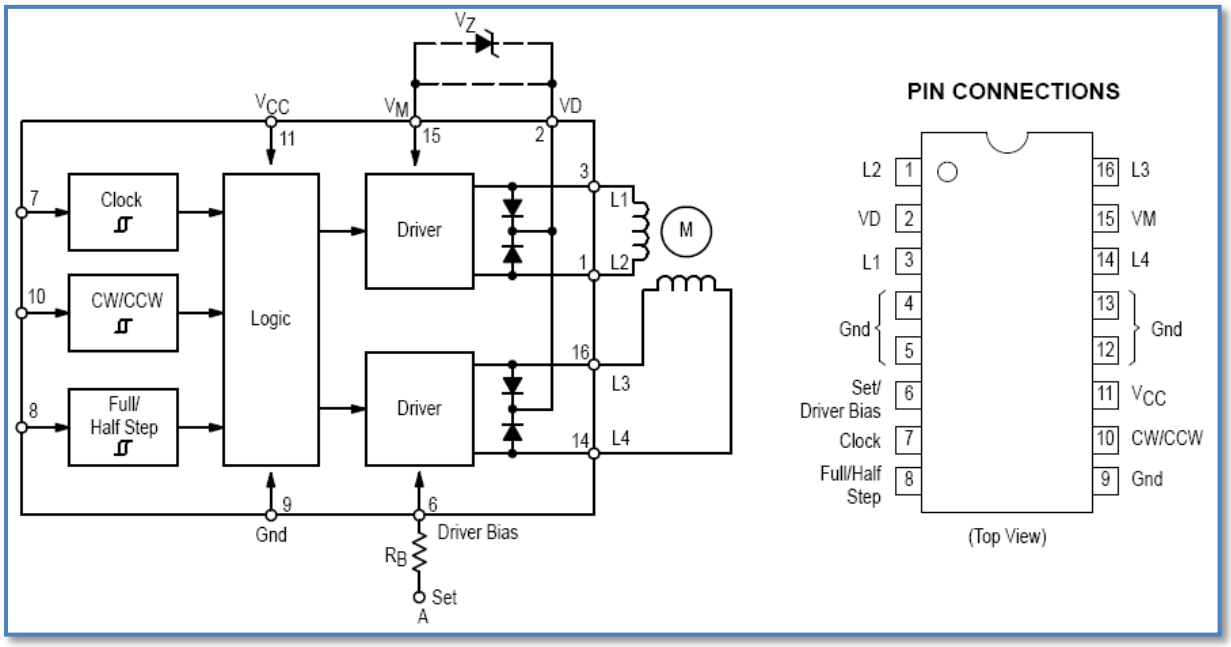


Figure 44 : Schéma du driver.

- L'alimentation se fait par la pine *11-Vcc* et *9-Gnd*.
- Le choix du sens du moteur ce fait au moyen de la pine *10-CW/CCW*. Etat logique "0" pour CW, sens horaire, et "1" pour CCW, sens anti-horaire.
- Ensuite, le choix de faire des pas entiers, ou des demi pas, ce fait par la pines *8-Full/Half Step*. Etat logique "0" pour des pas entiers, et "1" pour des demi pas.
- Puis, l'ordre d'avancé d'un pas est donné sur la pine *7-Clock*. Cette entrée doit être un signal carré dont l'état logique "1" est utilisé pour transmettre l'ordre de faire un pas.
- Et pour finir, l'alimentation des deux bobines du moteur ce fait au moyen des pines *3-L1*, *1-L2*, *16-L3* et *14-L4*.

5.5.2. Carte d'interface PC-driver moteur

Sur la figure suivante, se trouve une représentation de la vue d'ensemble de l'interface entre le pc et le driver des deux moteurs.

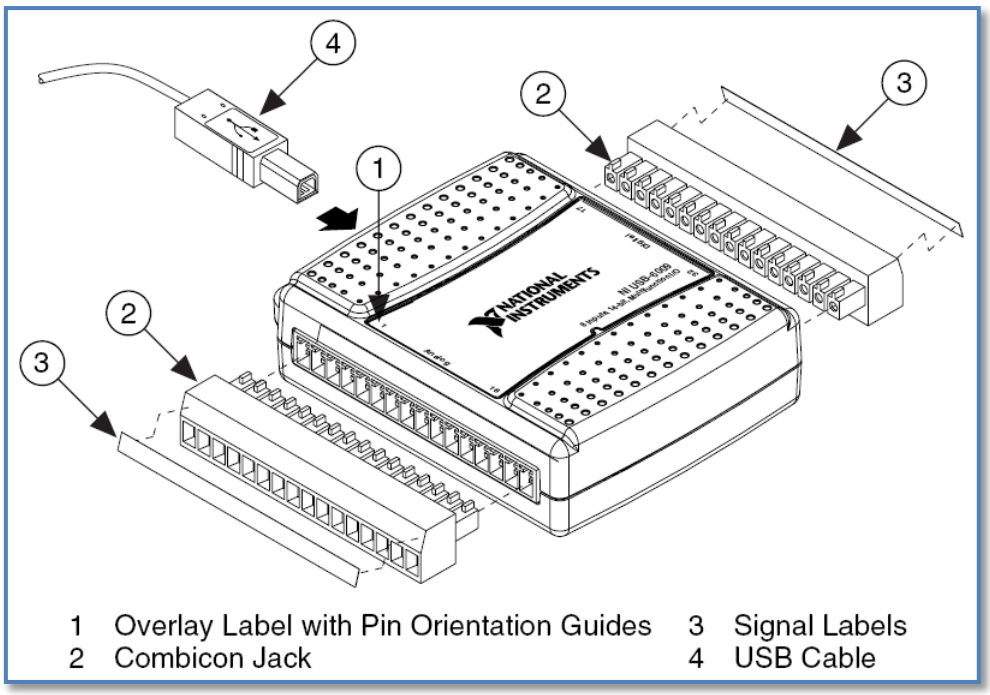


Figure 45 : Interface NI USB-6008.

Puis, la programmation de cette interface au moyen de l'outil DAQ Assistant du logiciel LabVIEW.

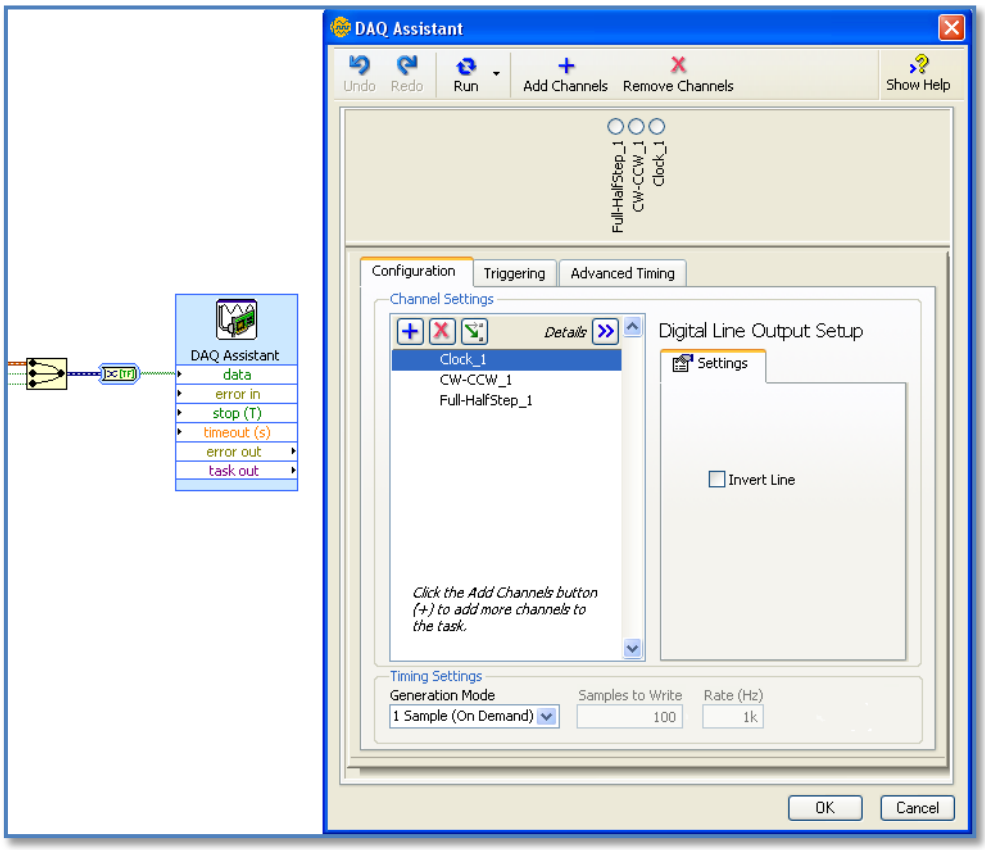


Figure 46 : Programmation de l'interface sur LabVIEW.

Et pour finir, voici un tableau représentant les différentes entrées et sorties de cette interface.

Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode	Dénomination
	1	GND	GND	
	2	AI 0	AI 0+	
	3	AI 4	AI 0-	
	4	GND	GND	
	5	AI 1	AI 1+	
	6	AI 5	AI 1-	
	7	GND	GND	
	8	AI 2	AI 2+	
	9	AI 6	AI 2-	
	10	GND	GND	
	11	AI 3	AI 3+	
	12	AI 7	AI 3-	
	13	GND	GND	
	14	AO 0	AO 0	
	15	AO 1	AO 1	
	16	GND	GND	
	17	P0.0		Clock_1
	18	P0.1		CW-CCW_1
	19	P0.2		Full-HalfStep_1
	20	P0.3		
	21	P0.4		Clock_2
	22	P0.5		CW-CCW_2
	23	P0.6		Full-HalfStep_2
	24	P0.7		
	25	P1.0		
	26	P1.1		
	27	P1.2		
	28	P1.3		
	29	PFI 0		
	30	+2.5 V		
	31	+5 V		
	32P	GND		

Tableau 5 : Entrées-sorties de l'interface NI USB-6008.

5.5.3. Programmation LabVIEW

Le principal avantage d'utiliser le logiciel LabVIEW est de garantir, contrairement à un autre code, une meilleur lisibilité de la par de personne qui n'ont pas une grande habitude dans le domaine de la programmation.

Passons maintenant au but de ce programme. Celui-ci est de commander le déplacement des deux moteurs pas-à-pas par le biais du driver moteur. Ces fonctions sont donc les suivantes :

- Commande des deux moteurs de manières séparées.
- Rotation du moteur d'un pas.
- Choix du sens de rotation.
- Choix de commande en pas complet ou en demi-pas.
- Indication de la position sur le quatre-quadrants.
- Remise à zéro de l'indication de position sur le quatre-quadrants.
- Indication des trois canaux d'entrée du driver moteur.

5.5.3.1. Interface utilisateur

Ci-dessous se trouve l'interface graphique réalisé au moyen du logiciel LabVIEW ainsi qu'une brève explication de son utilisation.

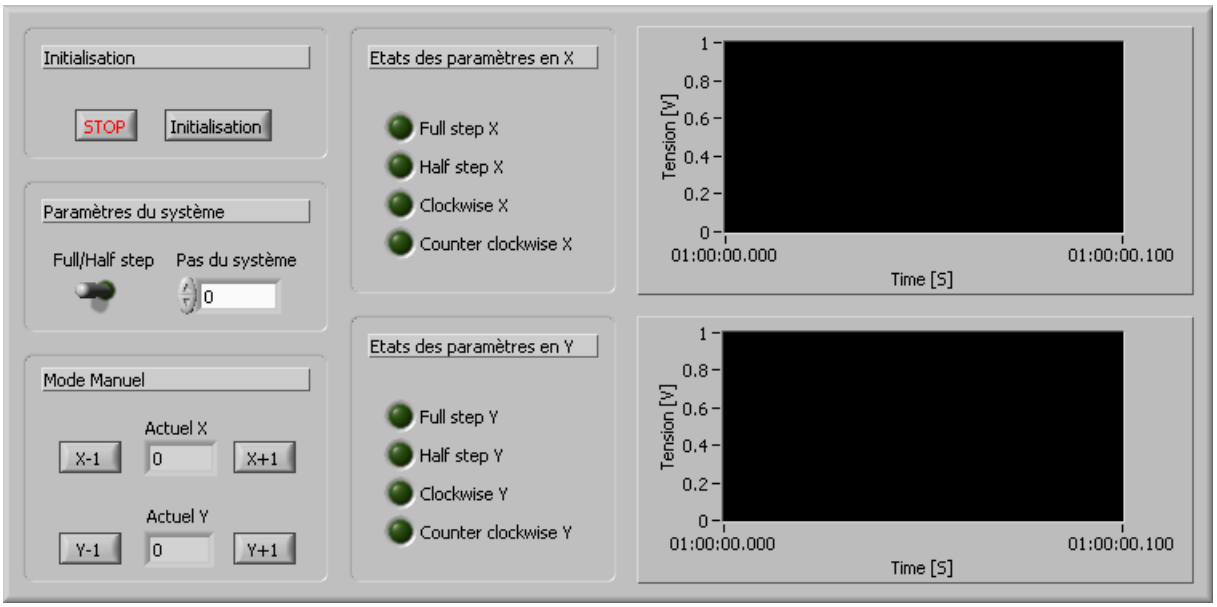


Figure 47 : Interface LabVIEW.

La section *"Initialisation"* a pour but de mettre à zéro les indicateurs théoriques de position sur le quatre-quadrants de la section *"Mode manuel"*.

Puis, la section " Paramètres du système" consiste à définir deux paramètres qui sont : le déplacement en micron sur le quatre-quadrants pour un pas moteur ainsi que du choix de la commande des moteurs en mode pas entier ou demi-pas.

Ensuite, la section *"Mode manuel"* permet le contrôle de la rotation du premier moteur sur l'axe X et du second sur l'axe Y du système. Les indices *"-1"* ou *"+1"* sur les boutons sont destinés à définir les sens de la rotation à effectuer et ceci pour un pas par pression sur le bouton. *"+1"* pour le sens horaire et *"-1"* pour l'opposé. On peut voir deux indicateurs, un pour chaque axe, destiné à donner la position théorique de l'arrivée des rayons sur le quatre-quadrants.

Et pour finir, les sections "Etat des paramètres en X" et "Etats des paramètres en Y" donne les états logiques des entrés du driver moteur pour les axes respectifs. On y voit le canal du choix de la commande du moteur en pas entier ou demi-pas, le canal du choix du sens de rotation du moteur ainsi qu'un graphique qui va représenter le signal carré délivré au driver moteur pour l'ordre de faire un pas.

5.5.3.2. Programme

Voyons maintenant ce qui se cache dernière l'interface du chapitre précédent 5.5.3.1, *Interface utilisateur*. La figure ci-dessous représente le programme qui va permettre la commande des deux moteurs du système.

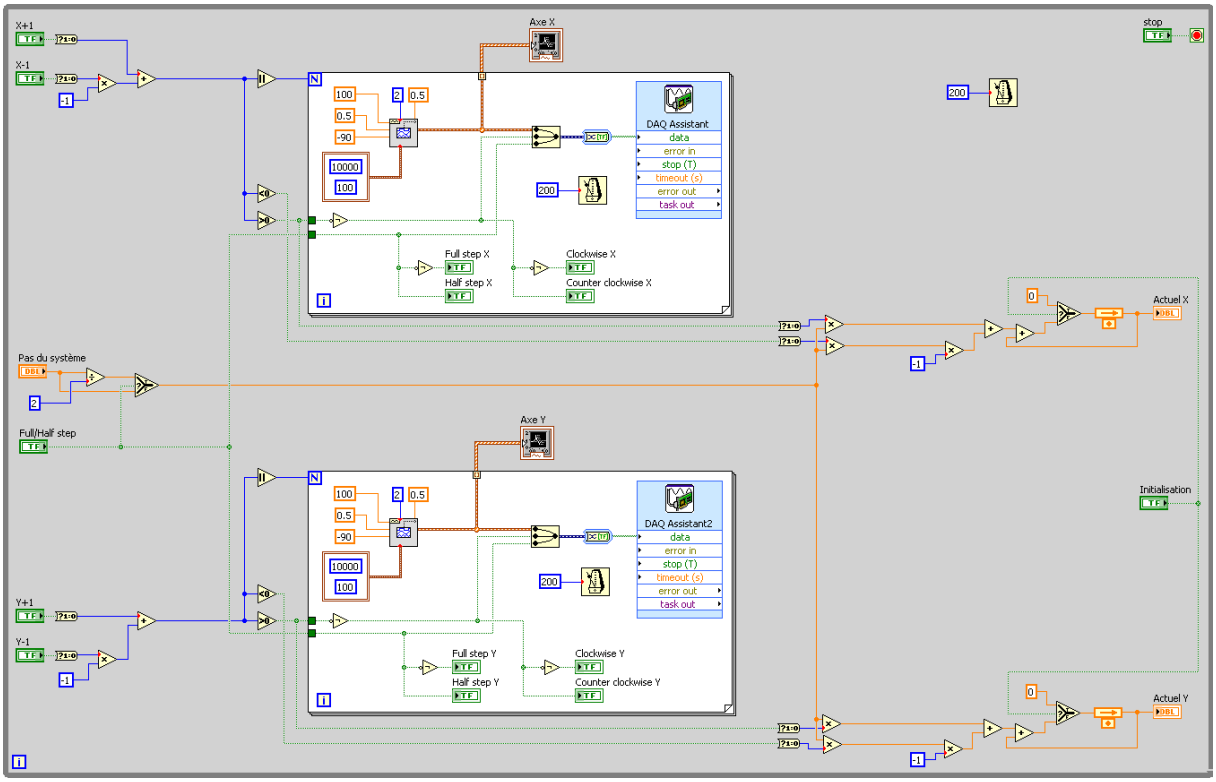


Figure 48 : Programmation LabVIEW.

Le nerf du programme se trouve dans la boucle "for", bloque à fond blanc. Son but est de générer les trois signaux utiles au driver moteur afin de commander les moteurs. Il utilise donc les valeurs de l'interface utilisateur pour générer un signal carré d'enclenchement du moteur d'un pas, le choix du sens de rotation des moteurs et le choix entre les modes pas complet et demi-pas.

Dans le but d'une meilleure visibilité durant son fonctionnement, des indicateurs tels que les Leds d'états des paramètres des moteurs ainsi qu'un plot du signal carré ont été intégré.

Et pour finir, à droite de la boucle while, bloque en gris, se trouvent le compteur qui indique la position actuelle sur le quatre-quadrants ainsi que du code de réinitialisation du compteur.

6. Essais

En cette fin de projet, la commande des moteurs n'est malheureusement pas arrivée. Ce qui est d'ailleurs étonnant venant du faite que les six semaines de délais de livraison aurait dues-être largement suffisantes.

Ce chapitre va donc se dérouler en deux temps. Dans un premier temps, il va s'agir d'élaborer la procédure de test ainsi que du banc d'essais afin que, dans un futur travail, quand les commandes arriveront la validation du système puisse se faire plus rapidement. Puis, dans un second temps, afin de vérifier le travail effectué, il a été choisi de faire le montage des éléments déjà disponible.

6.1. Objectifs

Lors des essais ainsi que de la validation du système, les principaux objectifs à remplir consistent à tester le fonctionnement des moteurs ainsi que des effets du passage d'un faisceau convergent au travers de la lame de verre à face parallèle du système.

En résumé le premier objectif est de valider le fonctionnement de la motorisation du système. Il s'agit donc de tester la partie logicielle, électronique et câblage des moteurs.

Puis, le deuxième va permettre de mesurer les effets de la lame de verre dans le système tel que la correction maximale du système, le pas de la correction ainsi que la fréquence des corrections apportées.

6.2. Procédures

6.2.1. Premier objectif : Test moteurs

Pour ce qui est du premier objectif, celui-ci ne demande pas de matériel en plus que le matériel qu'il s'agit de tester. C'est-à-dire des deux moteurs, des deux drivers moteurs, de l'interface PC-driver, d'un PC avec LabVIEW installé ainsi que du programme du chapitre 5.5.3, *Programmation LabVIEW*.

Cet essai se déroule en contrôlant le fonctionnement de l'interface utilisateur réalisé sur le logiciel LabVIEW, c'est-à-dire en testant les points suivants.

a) Commande des deux moteurs de manière séparé.
b) Rotation du moteur d'un pas.
c) Choix du sens de rotation.
d) Choix de commande en pas complet ou en demi-pas.

6.2.2. Deuxième objectif : Simulation de la lame de verre

Ce deuxième objectif nécessite l'utilisation du système complet ainsi que du banc d'essais du chapitre 6.2.3. On peut le considérer comme le dernier test de validation du système mécanique avant sa mise en application dans un cas pratique.

Cet essai va permet de déterminer de façon pratique quelques valeurs déterminées dans la partie 4.2, *Prévisions théoriques du tip-tilt*, c'est-à-dire en mesurant les points suivants sur le quatre-quadrants et ceci pour les deux axes de rotation du système tip-tilt.

a) Correction maximale du système
b) Pas de correction
c) Fréquence des corrections

6.2.3. Banc d'essais

6.2.3.1. Contexte et objectifs

Comme son nom l'identique, le banc d'essais a pour but de caractériser et valider le fonctionnement du système tip-tilt. Pour ce faire, il devra pouvoir répondre efficacement aux différentes fonctions suivantes lors de son élaboration.

Premièrement, ce dernier doit être capable de simuler le passage d'un faisceau convergent au travers de la lame de verre du tip-tilt. Il faut donc créer une source lumineuse capable de focaliser ses rayons selon un angle β qui doit être le même que celui de sortie du télescope Meade LX200.

Et deuxièmement, un procédé doit être trouvé afin de révéler la capacité du tip-tilt à corriger l'erreur due au désaxage du faisceau parallèle. Ici, il s'agit de garder la source fixe et de simplement actionner le système tip-tilt, puis, de trouver un moyen de mesurer le désaxage de la focal en fonction de l'angle α du tip-tilt.

6.2.3.2. Solutions

Dans le but de répondre au premier point, on utilise une source lumineuse qui va être créée au moyen d'une LED. Ensuite, afin de focaliser ces rayons selon un angle β adéquat, nous plaçons deux lentilles convergentes après la source de lumière.

Puis, pour ce qui du deuxième point, l'utilisation d'un quatre-quadrants a été retenu. La principale raison d'un tel choix est qu'un autre travail de Bachelor était en cours. Ce qui permit de considérablement simplifier le travail de recherche ainsi que d'utilisation de l'appareille.

6.2.3.3. Schéma du banc d'essais

On peut voir sur la figure suivante, le montage des différents éléments utiles à la réalisation du banc d'essai.

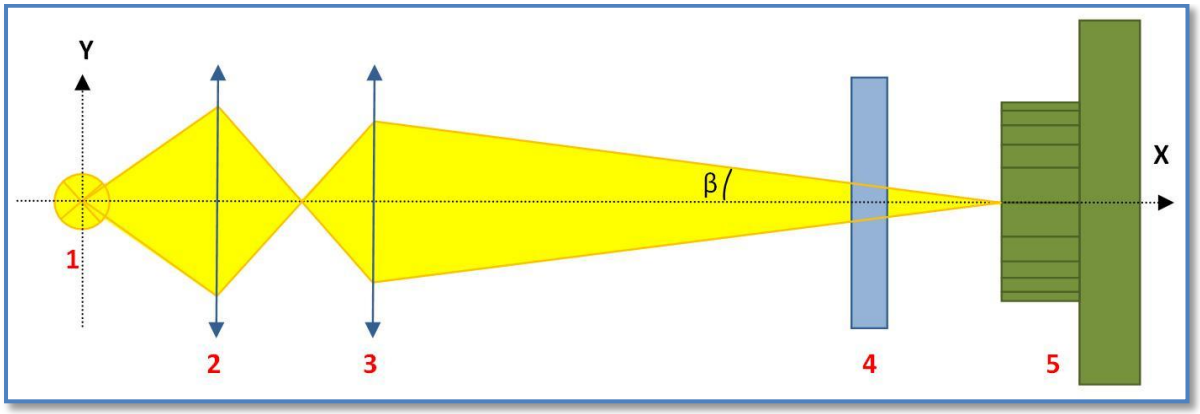


Figure 49 : Schéma du banc d'essai.

Et voici la liste des ses éléments.

1. Source LED
2. Première lentille convergente
3. Deuxième lentille convergente
4. Tip-tilt à tester
5. Quatre-quadrants

Et pour finir, la figure suivante représente un exemple de parcours des différents rayons lumineux lors du fonctionnement du banc d'essai.

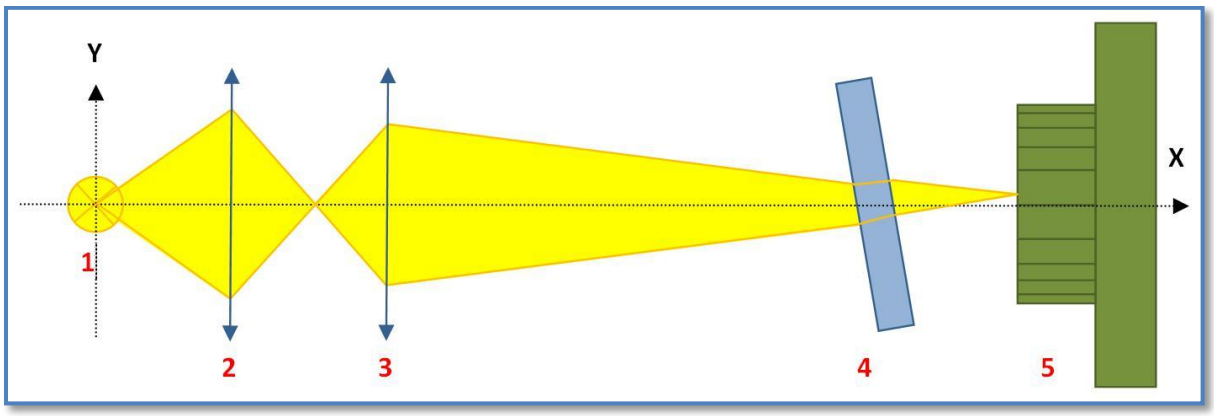


Figure 50 : Schéma du principe de fonctionnement.

6.3. Montage de système tip-tilt

Dans le but de clore ce travail de Bachelor, voici quelques photos du prototype réalisé. La photo ci-dessous illustre le système tip-tilt.

Figure 51 : Mécanique du système tip-tilt.

Puis, la photo suivante représente le mécanisme interne du tip-tilt ainsi que sa fixation sur le beam splitter.

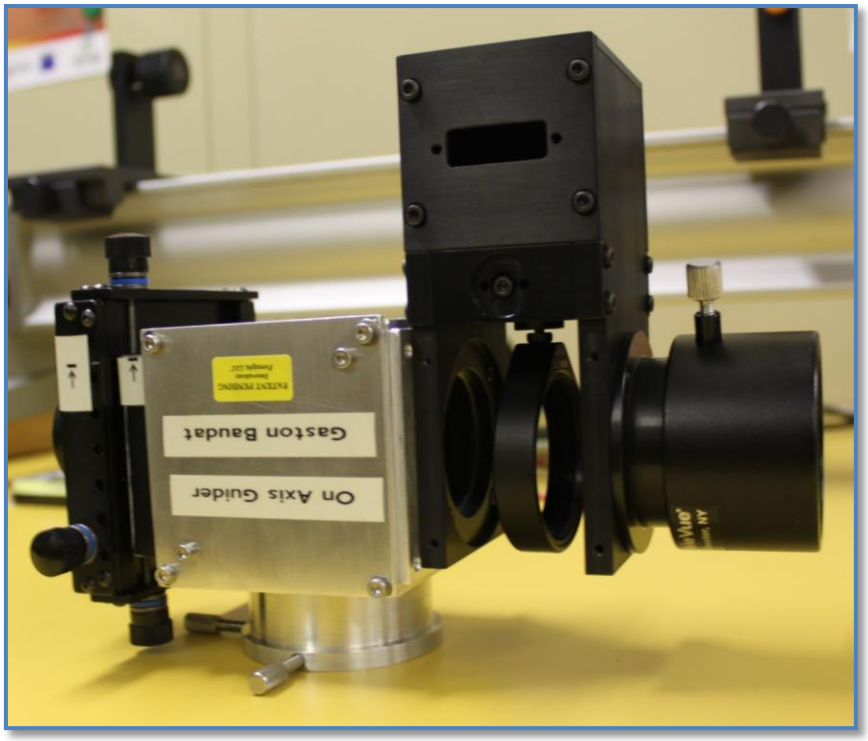


Figure 52 : Mécanisme interne.

Ensuite, voici le montage du tip-tilt, de l'autoguider et de la CCD de prise d'image sur le beam splitter.

Figure 53 : Montage du tip-tilt, beam splitter, autoguider et de la CCD.

Et pour finir, le montage des différents éléments cités plus haut sur le télescope.

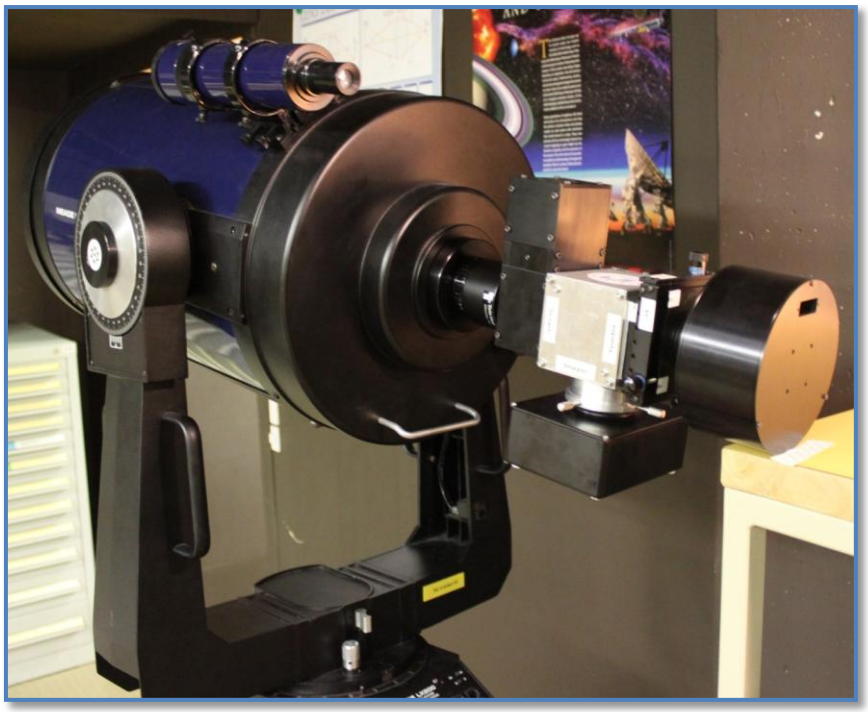


Figure 54 : Montage sur le télescope.

7. Synthèse et conclusions

Afin de conclure ce travail de Bachelor, voici la synthèse du travail qui a été effectué et qui se repartie sur les cinq chapitres qui précédent. Le premier, *Contextes et objectifs du projet*, va introduire le sujet de ce travail de Bachelor. Il comprend les objectifs généraux, une brève introduction au domaine de l'astronomie amateur, une recherche sur les différents types d'erreur qui interviennent dans de tel système ainsi qu'une première approche du système de correction tip-tilt. Le deuxième, *Télescope Meade LX200 et CCD SBIG ST-402 ME*, comprend la description du télescope cible, de ses dimensions ainsi que de ses propriétés optique. Le troisième, *Conception générale du système*, contient toute la partie théorique de ce projet. C'est-à-dire le principe de fonctionnement, les différentes prévisions théoriques ainsi qu'une explication sur les éléments utiles lors d'une prise d'image. La quatrième, *Description du système tip-tilt*, traite de la réalisation du prototype. Elle comprend donc le catalogue des solutions, les divers calculs de dimensionnement du système, la vue éclaté et la nomenclature de la partie mécanique du projet ainsi que la méthode retenue de commande des moteurs. Et pour finir la cinquième et dernière partie, *Essais*, comprend comme son nom l'indique la procédure de test du système, le banc d'essais ainsi que des photos de ce projet.

Comme on peut s'y attendre, le principal problème rencontré lors de la réalisation de ce projet fut le temps mis à disposition. Car comme on le sait, pour bien faire, il faudrait au moment même du début du projet passer la commande des éléments nécessitent un long délai de livraison. Ce qui n'est malheureusement pas possible du faite, que pour éviter des erreurs, il faut prendre du temps pour le dimensionnement et autres réflexion visant au bon fonctionnement du système.

Durant l'avancement de ce projet, le système a été porté sur la réalisation d'un prototype. On remarque que le programme développé au moyen du logiciel LabVIEW sert à tester le système et n'est pas exploitable pour une application de prise d'image au moyen d'un télescope. La suite de ce projet consiste donc en l'intégration du système sur un télescope afin de garantir une prise d'image optimal.

En conclusion, ce travail de la fin de mes études de Bachelor en microtechnique m'a donné l'opportunité d'appliquer la théorie vue aux cours et m'a aussi permis de découvrir un domaine d'application passionnent.

Yverdon-les-Bains, le 23 juillet 2010

David GLOOR

Références

Différents polycopiés

Bases d'optique : Cours d'Optique - Orientation MI à HEIG-VD - Prof. Lorenzo Zago.

Systèmes optique pour l'imagerie : Cours d'Optique - Orientation MI à HEIG-VD - Prof. Lorenzo Zago.

Site internet

http://fr.wikipedia.org/wiki/Lunette_astronomique → Les lunettes astronomiques

http://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9lescope → Les télescopes

http://www.astrosurf.com/luxorion/rapport-quel-tel-acheter-optique.htm → Caractéristiques du télescope

http://www.regulusastro.com/regulus/papers/ccdfaq/index.html → Imagerie CCD

http://www.skyandtelescope.com/howto/astrophotography/3304266.html → Système de guidage

http://astro.neutral.org/articles/autoguiding/tracking_autoguiding.html → Autoguidage avec une webcam pour l'astronomie

http://media4.obspm.fr/public/FSU/instrumentation/instrument/oa/seeing/SEXERCER.html → Explication sur le seeing

http://www.sbig.com → Fabricant de caméra ainsi que d'instrument de correction dédié à l'astronomie

http://www.galileo.cc/francais/imprimer_ccd.php?ref=SBAO8&type=ccd → Système d'optique adaptative SBIG AO-8

http://www.meade.com → Fabricant de télescope

http://www.edmundoptics.com → Fournisseur de matériel optique

http://www.thorlabs.de → Fournisseur de matériel optique

http://www.faulhaber.com → Fabriquant de moteur

https://www.distrelec.ch → Fournisseur d'électronique

Index

Index des figures

Figure 1 : Schéma de la lunette astronomique....4
Figure 2 : Schéma des trois types fondamentaux de télescope. 4
Figure 3 : Types de monture....5
Figure 4 : Fonction d'étalement de point, PSF. 7
Figure 5 : Exemple de seeing. 8
Figure 6 : Guidage et prise d'image au moyen d'un CCD. 9
Figure 7 : Guidage hors axe. 9
Figure 8 : Guidage distinct....10
Figure 9 : Erreurs dans la prise d'image. 10
Figure 10 : Correction d'erreurs au moyen d'une lame de verre. 11
Figure 11 : Système SBIG AO-7. [9] 11
Figure 12 : Système SBIG AO-8. [9] 12
Figure 13 : Mécanisme interne AO-8. [9] 12
Figure 14 : Système SBIG AO-L. 12
Figure 15 : Mécanisme interne AO-L. [9]....12
Figure 16 : Deux profile d'étoile sans (gauche) et avec (droite) AO-L. [9]....13
Figure 17 : Passage d'un rayon à travers d'une lame. 17
Figure 18 : Calcul du déplacement latéral Δx. 17
Figure 19 : Calcul du déplacement latéral Δ_y....18
Figure 20 : Calcul du déplacement latéral Δ....18
Figure 21 : Fonctionnement du tip-tilt avec α = 0 [°]....19
Figure 22 : Fonctionnement du tip-tilt avec α = 10 [°]....19
Figure 23 : Zoom sur les déplacements en x et y de la focal....20
Figure 24 : Dimensionnement du diamètre de la lame de verre....24
Figure 25 : Dimensionnement de la lame de verre avec correction CCD. 24
Figure 26 : Model théorique du principe de fonctionnement....26
Figure 27 : Schéma optique du télescope. 26
Figure 28 : Montage du télescope avec flip miroir et CCD....27
Figure 29 : Schéma du beam splitter. 28
Figure 30 : Rotation de la lame de verre....29
Figure 31 : Système mécanique du premier concept. 30
Figure 32 : Système mécanique du deuxième concept. 30
Figure 33 : Support Lentille LH2/M de chez THORLABS....31
Figure 34 : Support lentille LMR2/M de chez THORLABS.[10] 31
Figure 35 : Support lentille FMP2/M de chez THORLABS.[10] 32
Figure 36 : Raccord moteur. 32
Figure 37 : Premier prototype de boîte. 33
Figure 38 : Deuxième prototype de la boîte....33
Figure 39 : Raccord entre le tip-tilt et le télescope. 34
Figure 40 : Première étage du tip-tilt....36
Figure 41 : Deuxième étage du tip-tilt. 37

Figure 42 : Vue éclatée de la boîte. 39
Figure 43 : Vue éclatée du système tip-tilt.....40
Figure 44 : Schéma du driver.....42
Figure 45 : Interface NI USB-6008.....43
Figure 46 : Programmation de l'interface sur LabVIEW.....43
Figure 47 : Interface LabVIEW. 45
Figure 48 : Programmation LabVIEW.....46
Figure 49 : Schéma du banc d'essai. 49
Figure 50 : Schéma du principe de fonctionnement.....49
Figure 51 : Mécanique du système tip-tilt. 50
Figure 52 : Mécanisme interne.....50
Figure 53 : Montage du tip-tilt, beam splitter, autoguider et de la CCD. 51
Figure 54 : Montage sur le télescope.....51

Index des graphiques

Graphique 1 : Déplacement latéral des rayons après passage dans une lame de verre. 18
Graphique 2 : Déplacement latéral des rayons après passage dans un tip-tilt.....20
Graphique 3 : Résolution angulaire de α en fonction de la distance Dy.....21
Graphique 4 : Effet de la variation de l'épaisseur de la lame de verre de 1, 2, 3, 4 et 5 mm. 23

Index des tableaux

Tableau 1 : Spécifications techniques du télescope Meade LX200 et de la CCD SBIG ST-402ME. 15
Tableau 2 : Spécifications techniques du système. 25
Tableau 3 : Choix du système de fixation de la lame de verre.....31
Tableau 4 : Nomenclature de la partie mécanique. 41
Tableau 5 : Entrées-sorties de l'interface NI USB-6008. 44
Tableau 6 : Commande de pièces.....XIII

Annexes

Annexe A : Plan de travail

Travail	Complément de formation et recherche documentaire sur les télescopes pour amateurs et tous les aspects techniques et technologiques impliqués: ❖ Familiarisation avec tous les détails du LX200. Schéma optique du télescope (avec support d'un assistant). Modèle CAO des composants à l'arrière du télescope. ❖ Visite de l'observatoire de Monsieur C. D'Eramo (astronome amateur): cderamo@bluewin.ch Complément de formation et recherche documentaire sur les mécanismes tip-tilt et en particulier les produits pour télescopes d'amateur (ex. SBIG AO-8). Compréhension et résumé des objectifs du travail de diplôme.
Délivrable	Rapport introductif avec schémas optiques, modèles Solidworks et objectifs détaillés du travail.
Délai	10.03.2010

Travail	Conception du schéma fonctionnel du tip-tilt et identification de tous ses éléments mécaniques, électroniques et logiciels. Revue des diverses alternatives techniques. Sélection du concept en fonction du coût et la faisabilité rapide. Identification des parties qui peuvent demander un support en électronique et/ou logiciel par un assistant de l'IAI. Identification des éléments de long approvisionnement (long lead items) dont la commande et/ou fabrication doit être avancée. Conception du banc d'essai pour la validation du prototype.
Délivrable	Schémas, croquis et modèles CAO 3D, revue des alternatives techniques possibles, calcul des performances, liste des sous-systèmes et éléments, ébauche de la procédure de montage et essai. Eventuellement: dessins de fabrications et commandes des *long lead items*.
Délai	26.03.2010

Travail	Conception et dessins du tip-tilt et du banc d'essais Conception générale et design CAO. Identification et spécification détaillée des capteurs et autres éléments de contrôle, des électroniques de commande ainsi que des câbles et autre éléments de connexion électrique. Dessins de fabrications et/ou spécifications d'achat de tous les composants.
Délivrable	Modèle CAO, calculs de dimensionnement. Rapport: description de tous les systèmes, éléments, pièces à acquérir ou fabriquer. Dessins de fabrications. Spécifications d'achat et commandes de matériel et composants.
Délai	23.04.2010

Travail	Achat, fabrication des composants et montage. Réalisation du logiciel de commande et de test. Une interface graphique, par exemple en LabVIEW ou Matlab, est désirable.
Délivrable	Rapport
Délai	4.06.2010

Travail	Premiers essais.
Délivrable	Rapport complet intermédiaire.
Délai	11.06.2010

Travail	Mise au point, essais, rédaction du rapport final.
Délivrable	Rapport final draft
Délai	9.07.2010

Travail	Rapport final officiel
Délivrable	Rapport final officiel
Délai	23.07.2010

Annexe B : Code MatLab

TDB Tip-tilt

```
Modélisation du système tip-tilt
David GLOOR
3 avril 2010
```

Initialisation

```
close all;
clear all;
clc;
```

Paramètres

```
r_d       = 180/pi;                 % passage de radian en degré

n1        = 1;                      % indice de réfraction du premier milieu (air)
n2        = 1.5;                    % indice de réfraction du deuxième milieu (verre)
Ep        = [1 2 3 4 5]';           % épaisseur de la lame de verre
alpha_max = 45 *pi/180;             % inclinaison maximale de la lame
pas       = 0.1;

ccd       = 15;                     % longueur max de la CCD

f         = 3048;                   % focal du télescope
D         = 305;                    % diamètre du télescope
d         = 160;                    % position du tip-tilt
beta      = atan(D/(2*f));          % angle du faisceau à la sortie du télescope
```

Lame de verre à face parallèle

```
% Diamètre de la lame de verre
beta = atan((D-ccd)/(2*f));         % angle du faisceau à la sortie du télescope
Dmin = 2*d*tan(beta)+ccd;           % diamètre minimale de la lame (alpha = 45°)
Dmax = Dmin/sin(alpha_max);         % diamètre maximale de la lame (alpha = 0°)

% Epaisseur de la lame de verre
i     = linspace(0, pi/2, 91);      % vecteur de l'angle du rayon incident
r     = asin(n1/n2 * sin(i));       % vecteur de l'angle du rayon réfractent
alpha = i * 180/pi;
delta_x = Ep * (1 - tan(r)./tan(i));
for o=1:5
    delta_y(o,:) = delta_x(o,:) .* tan(i);
    delta(o,:)   = delta_x(o,:) .* sin(i);
end

% Met en évidence rouge tous les 10 degrés
for red=0:10:90
    rouge_x(:,red/10+1) = delta_x(:,red+1);
    rouge_y(:,red/10+1) = delta_y(:,red+1);
    rouge(:,red/10+1)   = delta(:,red+1);
end

% Graphique déplacement des rayons pour une épaisseur de 5 [mm]
s = 5;      % Série de valeurs, 1:Ep=1, 2:Ep=2, 3:Ep=3, 4:Ep=4, 5:Ep=5
figure;
subplot(121);
plot(alpha, delta(s,:), 'b.', alpha, delta_x(s,:),'g.', alpha, delta_y(s,:),'r.'), grid
xlabel('angle d''incidence sur la lame [°]')
ylabel('delta [mm], delta_x [mm] et deta_y [mm]')
title('Déplacement lattéral des rayons en fonction d''angle d''incidence')
legend('delta', 'delta_x', 'delta_y')
set(gca,'xtick',0:5:90);
set(gca,'ytick',0:0.1:6);
axis([0 90 0 6]);
subplot(122);
plot(delta_x(s,:), delta_y(s,:), 'b.', rouge_x(s,:), rouge_y(s,:), 'r.'), grid
xlabel('Delta_x [mm]')
ylabel('Delta_y [mm]')
title('Déplacement lattéral des rayons après passage dans une lame de verre')
set(gca,'xtick',0:0.1:6);
set(gca,'ytick',0:0.1:6);
axis([0 3.2 0 6]);
```

Système tip-tilt

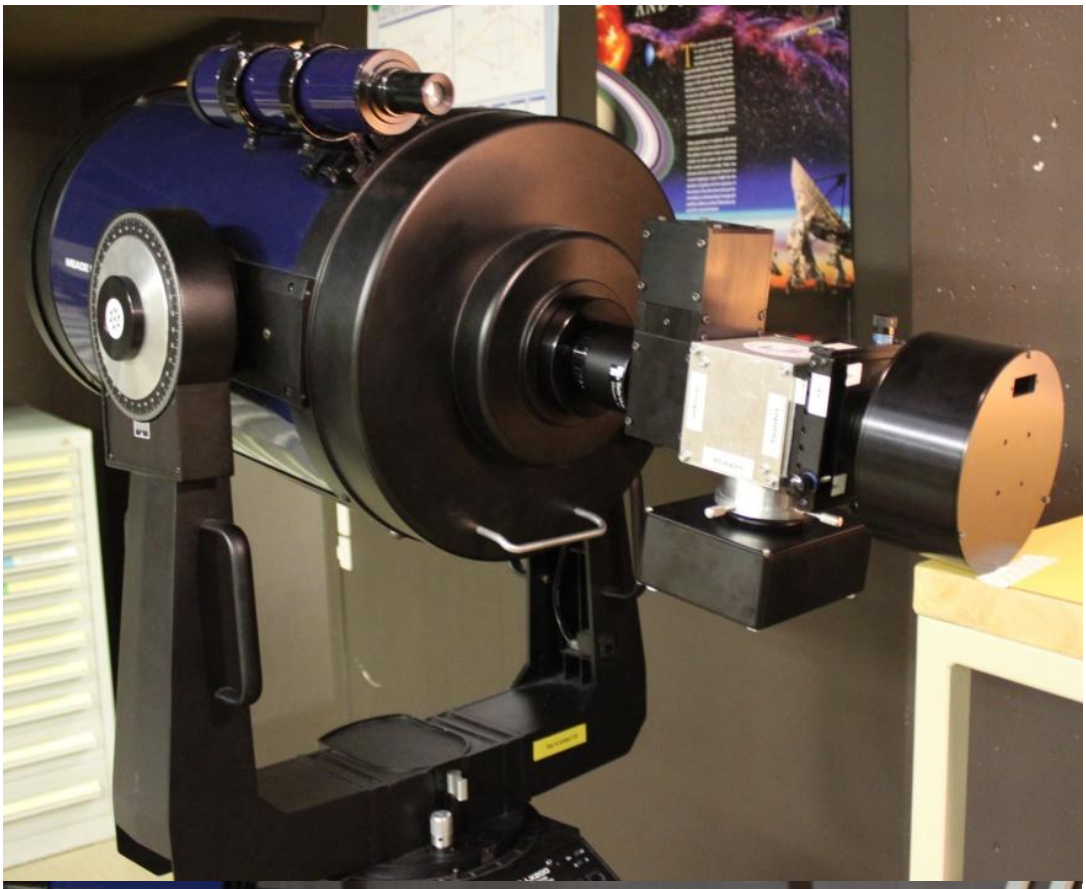
```
alpha     = linspace(-45, 45, 90/pas+1) * pi/180; % variation de l'angle de la lame de verre
i1        = beta-alpha;                           % vecteur de l'angle du rayon incident en haut
i2        = beta+alpha;                           % vecteur de l'angle du rayon incident en bas
r1        = asin(n1/n2 * sin(i1));                % vecteur de l'angle du rayon réfractent en haut
r2        = asin(n1/n2 * sin(i2));                % vecteur de l'angle du rayon réfractent en haut
delta1    = Ep * (sin(i1 - r1)./cos(r1));
delta2    = Ep * (sin(i2 - r2)./cos(r2));
delta_y1  = delta1/cos(beta);
delta_y2  = delta2/cos(beta);
d_y       = (delta_y1-delta_y2)/2;
d_x       = (delta_y1-d_y)/sin(beta);

% Met en évidence rouge tous les 5 degrés
for red=-45:5:45
    rouge_x(:,(red+45)/5+1) = d_x(:,(red+45)/pas+1);
    rouge_y(:,(red+45)/5+1) = d_y(:,(red+45)/pas+1);
end

% Graphiques déplacement des rayons après passage dans le tip-tilt
figure;
subplot(121);
plot(alpha*r_d, d_x(s,:),'g.', alpha*r_d, d_y(s,:),'b.'), grid
xlabel('angle d''incidence sur la lame [°]')
ylabel('delta_x [mm] et deta_y [mm]')
title('Déplacement lattéral des rayons en fonction d''angle de la lame de verre')
legend('d_x', 'd_y')
set(gca,'xtick',-45:5:45);
set(gca,'ytick',-1.7:0.1:3.1);
axis([-45 45 -1.7 3.1]);
subplot(122);
plot(d_x(s,:), d_y(s,:), 'b.', rouge_x(s,:), rouge_y(s,:), 'r.'), grid
xlabel('D_x [mm]')
ylabel('D_y [mm]')
title('Déplacement lattéral des rayons après passage dans une lame de verre')
set(gca,'xtick',0:0.1:3.1);
set(gca,'ytick',-1.7:0.1:1.7);
axis([0 3.1 -1.7 1.7]);

% Graphiques résolution angulaire du système
figure;
subplot(2,2,[1 3]);
plot(d_x(s,:), d_y(s,:), 'b.', rouge_x(s,:), rouge_y(s,:), 'r.'), grid
xlabel('D_x [mm]')
ylabel('D_y [mm]')
title(['Déplacement du point focal après une lame en fonction de l''angle alpha et un pas de ',num2str(pas),' [°]'])
set(gca,'xtick',0:0.1:3.1);
set(gca,'ytick',-1.7:0.1:1.7);
axis([0 3.1 -1.7 1.7]);
subplot(222);
plot(d_x(s,:), d_y(s,:), 'bo', rouge_x(s,:), rouge_y(s,:), 'ro'), grid
xlabel('D_x [mm]')
ylabel('D_y [mm]')
title('Zoom sur l''angle alpha = 10 [°]')
set(gca,'xtick',0:0.1:2.6);
set(gca,'ytick',-1.6:0.002:1.6);
axis([0 2.6 0.13 0.15]);
subplot(224);
plot(d_x(s,:), d_y(s,:), 'bo', rouge_x(s,:), rouge_y(s,:), 'ro'), grid
xlabel('D_x [mm]')
ylabel('D_y [mm]')
title('Zoom sur l''angle alpha = 0 [°]')
set(gca,'xtick',0:0.1:2.6);
set(gca,'ytick',-1.6:0.002:1.6);
axis([0 2.6 -0.01 0.01]);

% Graphique déplacement des rayons en fonction de l'épaisseur de la lame
figure;
subplot(121);
plot(alpha*r_d, d_x,'g.', alpha*r_d, d_y,'b.'), grid
xlabel('angle d''incidence sur la lame [°]')
ylabel('delta [mm], delta_x [mm] et deta_y [mm]')
title('Déplacement lattéral des rayons en fonction d''angle d''incidence')
legend('d_x', 'd_y')
set(gca,'xtick',-45:5:45);
set(gca,'ytick',-1.7:0.1:3.1);
axis([-45 45 -1.7 3.1]);
subplot(122);
plot(d_x, d_y, 'b.', rouge_x, rouge_y, 'r.'), grid
xlabel('Delta_x [mm]')
ylabel('Delta_y [mm]')
title('Déplacement lattéral des rayons après passage dans une lame de verre')
set(gca,'xtick',0:0.1:3.1);
set(gca,'ytick',-1.7:0.1:1.7);
axis([0 3.1 -1.7 1.7]);
```

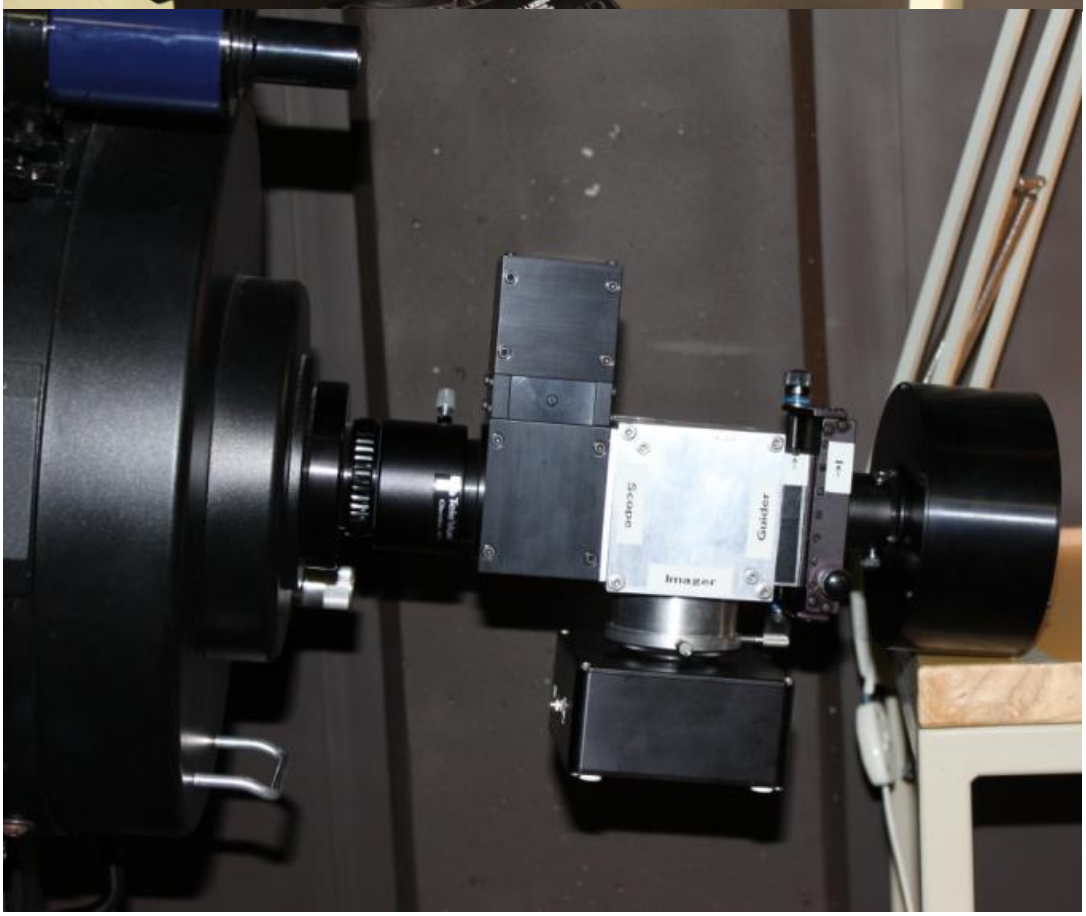
Annexe C : Photos du projet

Annexe C.1 : Mécanique du système tip-tilt

Annexe C.2 : Montage du tip-tilt, du beam splitter, de l'autoguider et de la CCD

Annexe C.3 : Montage sur le télescope





Annexe D : Liste des composants

Désignation	Fabricant	Types	Prix/pièce	Qte
Moteur pas-à-pas	Faulhaber	AM1524-2R-V-6-35-73-0904	142.50 CHF	2
Réducteur planétaire	Faulhaber	15A-152:1	20.10 CHF	2
Codeur magnétique	Faulhaber	AE23B8	133.40 CHF	2
Carte sortie PC	NI	NI USB-6008	249.00 CHF	1
Carte moteur	Littlediode	IC stepper motor SAA1042	37.50 CHF	2
Lame de verre à face parallèle	Edmund	Techspec 1/10 Wave Fused Silica Windows NT47-836	147.25 Euro	1
Support lame	Thorlabs	LMR2/M – Lens Mount for D2" Optics, one Retaining Ring Inclued	20.90 Euro	1
Palier lisse	Ignus	JFM-0405-06	4.00 CHF	1
Fiche	Distrelec	Connecteur D-Sub HD-D26 PY/2, Art n° 124988	6.00 CHF	3
Câble USB	Distrelec	fiche USB plate et fiche USB carrée	10.00 CHF	1
			~ 1'220 CHF	14

Tableau 6 : Commande de pièces.

Annexe D.1 : Datasheet moteur

FAULHABER

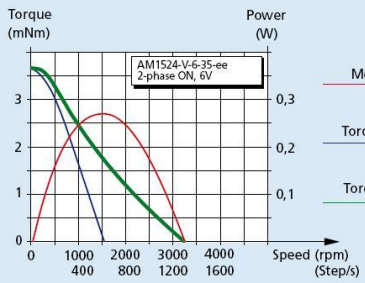
Stepper Motors 6,0 mNm

Two phase, 24 steps per revolution
PRECIstep® Technology

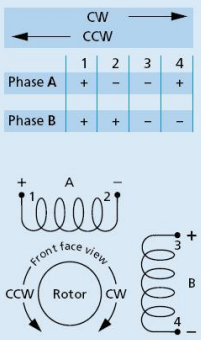
AM1524-ww-ee

	ww =	V-6-35		V-12-150		A-0,25-12,5		A-0,45-3,6		
		Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current	Drive mode
1	Nominal voltage	6	–	12	–	3,5	–	2	–	V DC
2	Nominal current per phase (both phases ON)	–	0,15	–	0,075	–	0,25	–	0,45	A
3	Phase resistance (at 20°C)	35		138		12,5		3,6		Ω
4	Phase inductance (1kHz)	15		65		5,5		1,7		mH
5	Back-EMF amplitude	6		12		3,5		2,0		V/k step/s
6	Holding torque [1] (at nominal current in both phases)	6,0								mNm
7	Holding torque [1] (at twice the nominal current)	10								mNm
8	Step angle (full step)	15								degree
9	Angular accuracy [2]	± 10								% of full step
10	Residual torque	0,9								mNm
11	Rotor inertia	45								$\cdot 10^{-9}$ kgm²
12	Resonance frequency (at no load)	120								Hz
13	Electrical time constant	0,4								ms
14	Ambient temperature range	–35 … +70								°C
15	Winding temperature tolerated, max.	130								°C
16	Thermal resistance winding-ambient air	37								°C/W
17	Thermal time constant	220								s
18	Shaft bearings	sintered bronze sleeves (standard)				ball bearings, preloaded (optional)				
19	Shaft load, max.:									
	– radial (3 mm from bearing)	0,5				6,0				N
	– axial	0,5				3,0				N
20	Shaft play, max.:									
	– radial (0,2N)	15				12				µm
	– axial (0,2N)	150				~0				µm
21	Isolation test voltage	200								V DC
22	Motor dimensions:									
	– diameter	15								mm
	– length	16,5								mm
	– shaft diameter	1,5								mm
23	Weight	12								g

[1] with bipolar driver
[2] 2 phases ON, balanced phase currents
[3] Curves measured with a load inertia of $10 \cdot 10^{-9}$ kgm²
[4] Testing the motor at lower supply voltages in current mode will result in a decrease in torque at higher speed, even with the same current setting



Mechanical Power (W)
Torque Start/Stop (mNm)
Torque Slew rate (mNm)



Voltage mode (V) [3]
Driver AD VM M1S

Current mode (A) [3] [4]
Driver AD CM M1S

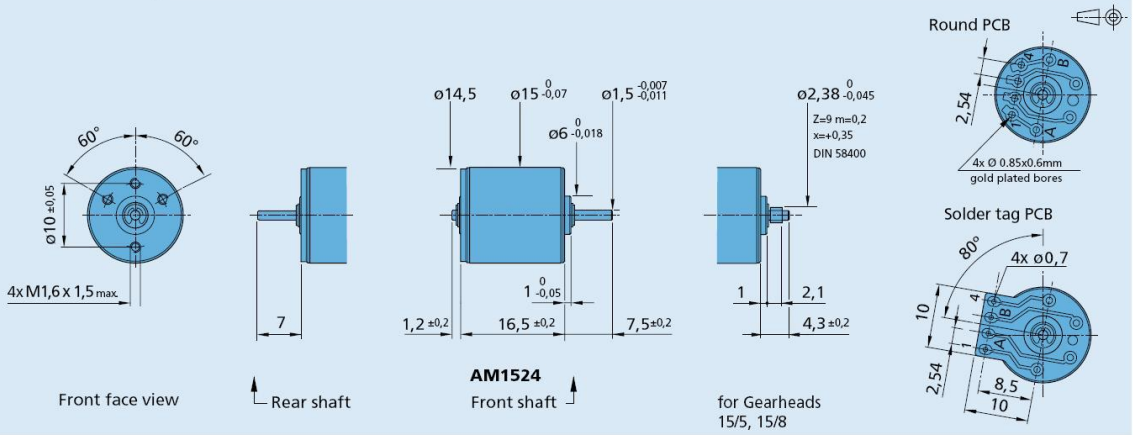
For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2010 – 2011

Page 1/2

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.
www.faulhaber.com

FAULHABER

Dimensional drawing



Combinations

Drive Electronics	Encoders	Stepper Motors	Gearheads / Lead screws
AD VL M_S	**AE 23B8**	**AM1524**	**15A**
AD VM M_S			**15/5**
AD CM M_S			**15/8***
			16/7
			Lead screws M2
			Lead screws M2,5
			Lead screws M3

* Zero Backlash Gearheads

Ordering information

Example: **AM1524-2R-V-24-590-57**

Motor type AM = Motor design 15 = Motor diameter (mm) 24 = Steps per revolution	Bearings (rr) Special lubricant options available	Winding (ww)	Motor execution (ee)		
			Only front output shaft	With double output shaft	Front output shaft
AM1524	**-** (sleeve bearings)	**-V-3-10** [1]	**-55 (-05)**	**-54 (-04)**	Plain shaft, L=7,5 mm[2]
	-2R (2 ball bearings)	**-V-6-35**	**-57 (-07)**	**-56 (-06)**	Pinion 15/5, 15/8
		-V-12-150	**-70 (-72)**	**-71 (-73)**	Plain shaft, L=4,3 mm[3]
		-V-24-590 [1]		**-04-0904** [4]	Idem -04
		-A-0,25-12,5		**-06-0904** [4]	Idem -06
		-A-0,45-3,6		**-73-0904** [4]	Idem -73
			-83 (-23)	**-82 (-22)**	Plain shaft [5]
			( ) Designation for motors with solder tag PCB		

[1] Non-standard windings, for data please inquire with your point of sales

[2] Designations for assembly with gearhead 16/7

[3] Designations for assembly with gearhead 15A

[4] Designations for assembly of encoder AE 23B8

[5] Prepared for assembly of lead screws size M2, M2,5 and M3

For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2010 – 2011

Page 2/2

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.
www.faulhaber.com

Annexe D.2 : Datasheet réducteur

FAULHABER

Planetary Gearheads

0,25 Nm

For combination with
DC-Micromotors:
1516, 1524, 1624, 1717, 1724
Stepper Motors:
AM1524

Series 15A

	15A	15AC	15AK
Housing material	plastic	plastic	plastic
Geartrain material	plastic	plastic	plastic
Recommended max. input speed for:			
– continuous operation	5 000 rpm	5 000 rpm	5 000 rpm
Backlash, at no-load	≤ 4°	≤ 4°	≤ 4°
Bearings on output shaft	sintered sleeve bearings	ceramic bearings	ball bearings
Shaft load, max.:			
– radial (5 mm from mounting face)	≤ 3 N	≤ 10 N	≤ 15 N
– axial	≤ 1 N	≤ 2 N	≤ 5 N
Shaft press fit force, max.	≤ 10 N	≤ 10 N	≤ 10 N
Shaft play:			
– radial (5 mm from mounting face)	≤ 0,06 mm	≤ 0,08 mm	≤ 0,09 mm
– axial	≤ 0,25 mm	≤ 0,25 mm	≤ 0,25 mm
Operating temperature range	– 30 … + 65 °C	– 20 … + 85 °C	– 30 … + 85 °C

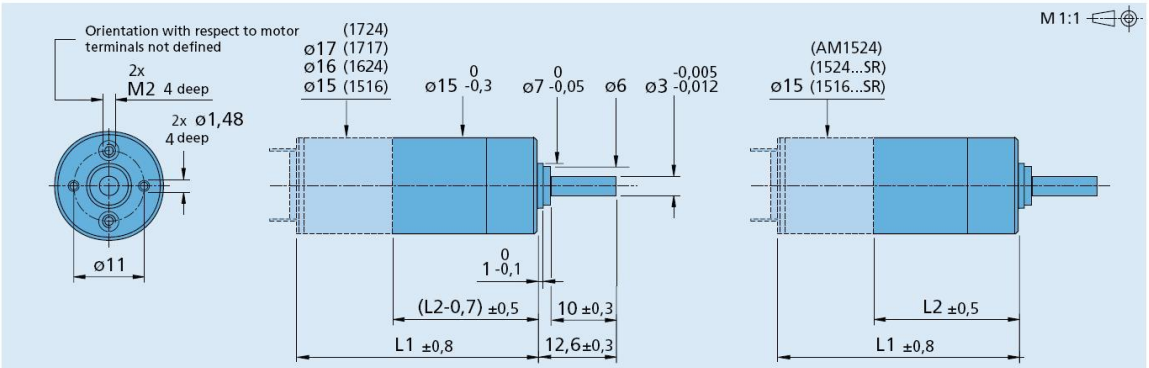
Specifications

reduction ratio (nominal)	motor ordering code [1]	number of gear stages	weight without motor g	length without motor L2 mm	length with motor [2] 1516 L1 mm	1524 1624 L1 mm	1717 L1 mm	1724 L1 mm	output torque continuous operation M max. mNm	intermittent operation M max. mNm	direction of rotation (reversible)	efficiency %
5,33 :1	A	1	4	14,8	29,9	37,9	31,1	38,1	50	100	=	87
14 :1	B	2	5	18,4	33,5	41,5	34,7	41,7	100	200	=	78
19 :1	B	2	5	18,4	33,5	41,5	34,7	41,7	100	200	=	78
28 :1	A	2	5	18,4	33,5	41,5	34,7	41,7	100	200	=	77
52 :1	B	3	5	22,0	37,1	45,1	38,3	45,3	100	200	=	68
69 :1	B	3	5	22,0	37,1	45,1	38,3	45,3	100	200	=	69
102 :1	A	3	5	22,0	37,1	45,1	38,3	45,3	100	200	=	68
152 :1	A	3	5	22,0	37,1	45,1	38,3	45,3	150	300	=	67
249 :1	B	4	6	25,6	40,7	48,7	41,9	48,9	200	400	=	62
369 :1	A	4	6	25,6	40,7	48,7	41,9	48,9	200	400	=	61
546 :1	A	4	6	25,6	40,7	48,7	41,9	48,9	200	400	=	60
809 :1	A	4	6	25,6	40,7	48,7	41,9	48,9	200	400	=	59
896 :1	B	5	6	29,2	44,3	52,3	45,5	52,5	200	400	=	55
1 327 :1	A	5	6	29,2	44,3	52,3	45,5	52,5	200	400	=	54
1 966 :1	A	5	6	29,2	44,3	52,3	45,5	52,5	200	400	=	53
2 913 :1	A	5	6	29,2	44,3	52,3	45,5	52,5	250	400	=	52
3 225 :1	B	6	7	32,8	47,9	55,9	49,1	56,1	250	400	=	49
4 315 :1	A	5	6	29,2	44,3	52,3	45,5	52,5	250	400	=	51
4 778 :1	A	6	7	32,8	47,9	55,9	49,1	56,1	250	400	=	48
7 078 :1	A	6	7	32,8	47,9	55,9	49,1	56,1	250	400	=	47
10 486 :1	A	6	7	32,8	47,9	55,9	49,1	56,1	250	400	=	46
15 534 :1	A	6	7	32,8	47,9	55,9	49,1	56,1	250	400	=	46

[1] Example of ordering information: 1516 **B** 012 SR + 15A 19:1

[2] Length L1 with Stepper Motors AM1524 = L2 + 16,5 mm.

Note: The reduction ratios are rounded, the exact values are available on request. These gearheads are available only with motors mounted.



15A, 15AC, 15AK **15A, 15AC, 15AK**

For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2010 – 2011

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.
www.faulhaber.com

Annexe D.3 : Datasheet encodeur

FAULHABER

Encoders

Magnetic Encoders

For combination with:
Stepper Motor: AM1524

Series AE 23B8

		AE 23B8	
Lines per revolution	N	12	
Signal output, square wave		2 channels	
Supply voltage	V cc	5 … 15	V DC
Current consumption, typical (V CC = 5 V DC)	I cc	5	mA
Pulse width	P	180 ±45	°e
Phase shift, channel A to B	Φ	90 ±45	°e
Logic state width	S	90 ±45	°e
Cycle	C	360 ±30	°e
Signal rise/fall time, typical	tr / tf	5 / 0,2	µs
Frequency range [1]	f	up to 7,2	kHz
Inertia of code disc	J	20	$\cdot 10^{-9}$ kgm^2
Operating temperature range		–20 … +85	°C

[1] Velocity (rpm) = f (Hz) x 60/N

Features / Output signals / Circuit diagram

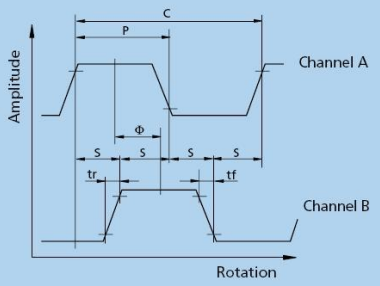
These incremental shaft encoders are designed for indication and control of shaft velocity and direction of rotation as well as for position verification.

Solid state Hall sensors and a low inertia magnetic disc provide two channels with 90° phase shift.

The supply voltages for the encoder and the stepper motor as well as the two channel output signals are interfaced through a cable and 8-pin connector.

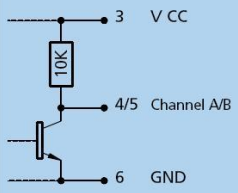
Details for the stepper motors and suitable reduction gearheads are on the corresponding data sheets.

Output signals



Valid for clockwise rotation, seen from the shaft end.

Circuit diagram

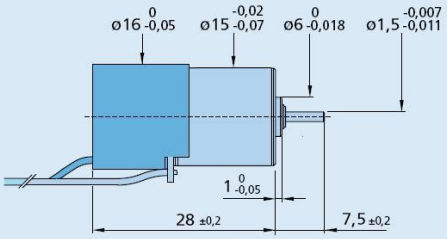


Recommendation:
Please use a latch to capture the outputs.

Cable connection

Pin	Function
1	Motor Phase B –
2	Motor Phase B +
3	Vcc
4	Channel A
5	Channel B
6	GND
7	Motor Phase A –
8	Motor Phase A +

Connector type Molex serie 40312
Ribbon cable, 120 mm - PVC
8 conductors - 0,09 mm²



AE 23B8

For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2010 – 2011

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.
www.faulhaber.com

Annexe D.4 : Datasheet carte moteur

Order this document by SAA1042/D

MOTOROLA

SAA1042

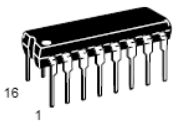
Stepper Motor Driver

The SAA1042 drives a two–phase stepper motor in the bipolar mode. The device contains three input stages, a logic section and two output stages. The IC is contained in a 16 pin dual–in–line heat tab plastic package for improved heatsinking capability. The center four ground pins are connected to the copper alloy heat tab and improve thermal conduction from the die to the circuit board.

- Drive Stages Designed for Motors: 6.0 V and 12 V: SAA1042V
- 500 mA/Coil Drive Capability
- Built–In Clamp Diodes for Overvoltage Suppression
- Wide Logic Supply Voltage Range
- Accepts Commands for CW/CCW and Half/Full Step Operation
- Inputs Compatible with Popular Logic Families: MOS, TTL, DTL
- Set Input Defined Output State
- Drive Stage Bias Adaptable to Motor Power Dissipation for Optimum Efficiency

STEPPER MOTOR DRIVER

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



V SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648C

PIN CONNECTIONS

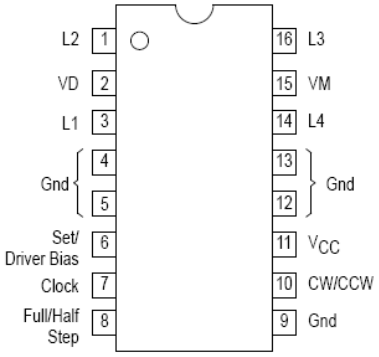
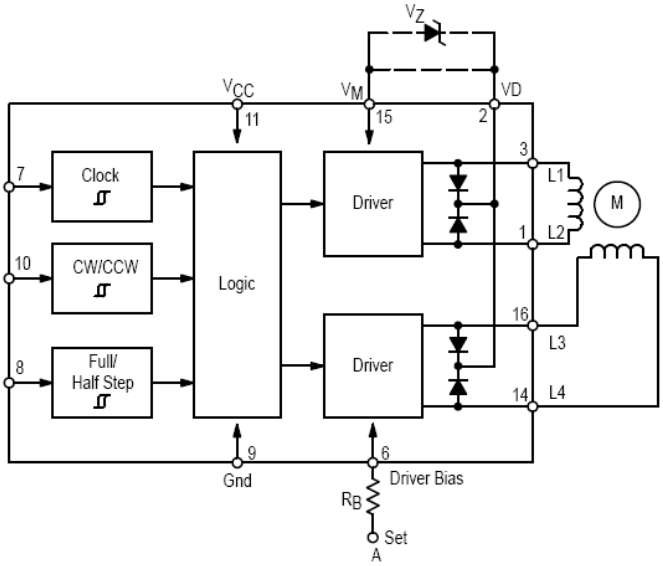


Figure 1. Representative Block Diagram



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
SAA1042V	T_J = – 30° to +125°C	Plastic DIP

© Motorola, Inc. 1996 Rev 2

SAA1042

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	SAA1042V	Unit
Clamping Voltage (Pins 1, 3, 14, 16)	V_{clamp}	20	V
Over Voltage ($V_{OV} = V_{clamp} - V_M$)	V_{OV}	6.0	V
Supply Voltage	V_{CC}	20	V
Switching or Motor Current/Coil	I_M	500	mA
Input Voltage (Pins 7, 8, 10)	V_{in} clock V_{in} Full/Half V_{in} CW/CCW	V_{CC}	V
Power Dissipation (Note 1) Thermal Resistance, Junction–to–Air Thermal Resistance, Junction–to–Case	P_D θJA θJC	2.0 80 15	W °C/W
Operating Junction Temperature Range	T_J	–30 to +125	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	–65 to +150	°C

NOTE: 1. The power dissipation (P_D) of the circuit is given by the supply voltage (V_M and V_{CC}) and the motor current (I_M), and can be determined from Figures 3 and 5. $P_D = P_{drive} - P_{logic}$.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C, unless otherwise noted.)

Characteristics	Pin(s)	Symbol	V_{CC}	Min	Typ	Max	Unit
Supply Current	11	I_{CC}	5.0 V 20 V	— —	— —	3.5 8.5	mA
Motor Supply Current ($I_{Pin\ 6}$ = –400 µA, Pins 1, 3, 14, 16 Open) V_M = 6.0 V V_M = 12 V V_M = 24 V	15	I_M	 5.0 V 5.0 V 5.0 V	 — — —	 25 30 40	 — — —	mA
Input Voltage, High State	7, 8, 10	V_{IH}	5.0 V 10 V 15 V 20 V	2.0 7.0 10 14	— — — —	— — — —	V
Input Voltage, Low State		V_{IL}	5.0 V 10 V 15 V 20 V	— — — —	— — — —	0.8 1.5 2.5 3.5	
Input Reverse Current, High State ($V_{in} = V_{CC}$)	7, 8, 10	I_{IR}	5.0 V 10 V 15 V 20 V	— — — —	— — — —	2.0 2.0 3.0 5.0	µA
Input Forward Current, Low State (V_{in} = Gnd)		I_{IF}	5.0 V 10 V 15 V 20 V	–10 –25 –40 –50	— — — —	— — — —	
Output Voltage, High State (V_M = 12 V) I_{out} = –500 mA I_{out} = –50 mA	1, 3, 14, 16	V_{OH}	5.0 – 20 V	 — —	 V_M – 2.0 V_M – 1.2	 — —	V
Output Voltage, Low State I_{out} = 500 mA I_{out} = 50 mA		V_{OL}	5.0 – 20 V	 — —	 0.7 0.2	 — —	
Output Leakage Current, Pin 6 = Open ($V_M = V_D = V_{clamp\ max}$)	1, 3, 14, 16	I_{DR}	5.0 – 20 V	–100	—	—	µA
Clamp Diode Forward Voltage (Drop at I_M = 500 mA)	2	V_F	—	—	2.5	3.5	V
Clock Frequency	7	f_c	5.0 – 20 V	0	—	50	kHz
Clock Pulse Width	7	t_w	5.0 – 20 V	10	—	—	µs
Set Pulse Width	6	t_s	—	10	—	—	µs
Set Control Voltage, High State Low State	6	—	—	V_M —	— —	— 0.5	V

SAA1042

INPUT/OUTPUT FUNCTIONS

Clock — (Pin 7) This input is active on the positive edge of the clock pulse and accepts Logic '1' input levels dependent on the supply voltage and includes hysteresis for noise immunity.

CW/CCW — (Pin 10) This input determines the motor's rotational direction. When the input is held low, (OV, see the electrical characteristics) the motor's direction is nominally clockwise (CW). When the input is in the high state, Logic '1', the motor direction is nominally counter clockwise (CCW), depending on the motor connections.

Full/Half Step — (Pin 8) This input determines the angular rotation of the motor for each clock pulse. In the low state, the motor will make a full step for each applied clock pulse, while in the high state, the motor will make half a step.

V_D — (Pin 2) This pin is used to protect the outputs (1, 3,14, 16) where large positive spikes occur due to switching the motor coils. The maximum allowable voltage on these pins is the clamp voltage (V_{clamp}). Motor performance is improved if a zener diode is connected between Pin 2 and 15, as shown in Figure 1.

The following conditions have to be considered when selecting the zener diode:

$$V_{clamp} = V_M + 6.0\ V$$
$$V_Z = V_{clamp} - V_M - V_F$$

where: V_F = clamp diodes forward voltage drop (see Figure 4)

V_{clamp}: ≤ 20 V for SAA1042V ≤ 30 V for SAA1042AV

Pins 2 and 15 can be linked, in this case V_Z = 0 V.

Set/Bias Input — (Pin 6) This input has two functions:

1) The resistor R_B adapts the drivers to the motor current.
2) A pulse via the resistor R_B sets the outputs (1, 3, 14, 16) to a defined state.

The resistor R_B can be determined from the graph of Figure 2 according to the motor current and voltage. Smaller values of R_B will increase the power dissipation of the circuit and larger values of R_B may increase the saturation voltage of the driver transistors.

When the "set" function is not used, terminal A of the resistor R_B must be grounded. When the set function is used, terminal A has to be connected to an open–collector (buffer) circuit. Figure 7 shows this configuration. The buffer circuit (off–state) has to sustain the motor voltage (V_M). When a pulse is applied via the buffer and the bias resistor (R_B), the motor driver transistors are turned off during the pulse and after the pulse has ended, the outputs will be in defined states. Figure 6 shows the Timing Diagram.

Figure 7 illustrates a typical application in which the SAA1042 drives a 12 V stepper motor with a current consumption of 200 mA/coil. A bias resistor (R_B) of 56 kΩ is chosen according to Figure 2.

The maximum voltage permitted at the output pin is V_M + 6.0 V (see Maximum Ratings table), in this application V_M = 12 V, therefore the maximum voltage is 18 V. The outputs are protected by the internal diodes and an external zener connected between Pins 2 and 15.

From Figure 4, it can be seen that the voltage drop across the internal diodes is about 1.7 V at 200 mA. This results in a zener voltage between Pins 2 and 15 of:

$$V_Z = 6.0\ V - 1.7\ V = 4.3\ V.$$

To allow for production tolerances and a safety margin, a 3.9 V zener has been chosen for this example.

The clock is derived from the line frequency which is phase–locked by the MC14046B and the MC14024. The voltage on the clock input is normally low (Logic '0'). The motor steps on the positive going transition of the clock pulse.

The Logic '0' applied to the Full/Half input (Pin 8) operates the motor in Full Step mode. A Logic '1' at this input will result in Half Step mode. The logic level state on the CW/CCW input (Pin 10), and the connection of the motor coils to the outputs determines the rotational direction of the motor.

These two inputs should be biased to a Logic '0' or '1' and not left floating. In the event of non–use, they should be tied to ground or the logic supply line, V_{CC}.

The output drivers can be set to a fixed operating point by use of the Set input and a bias resistor, R_B. A positive pulse to this input turns the drivers off and sets the logic state of the outputs.

After the negative going transition of the Set pulse, and until the first positive going transition of the clock, the outputs will be:

L1 = L3 = high and L2 = L4 = low, (see Figure 6).

The Set input can be driven by a MC14007B or a transistor whose collector resistor is R_B. **If the input is not used, the bottom of R_B must be grounded.**

The total power dissipation of the circuit can be determined from Figures 3 and 5:

$$P_D = 0.9\ W + 0.08\ W = 0.98\ W.$$

The junction temperature can then be computed using Figure 8.

SAA1042

Figure 2. Bias Resistor R_B versus Motor Current

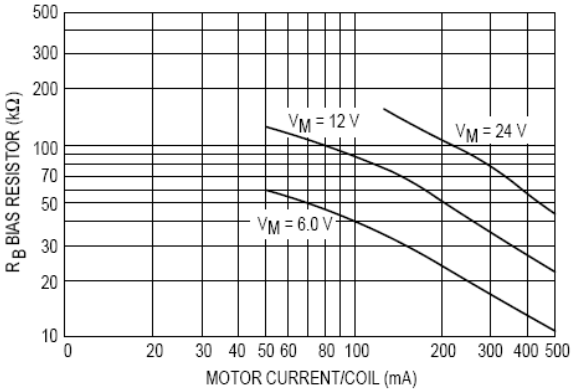


Figure 3. Drive Stage Power Dissipation

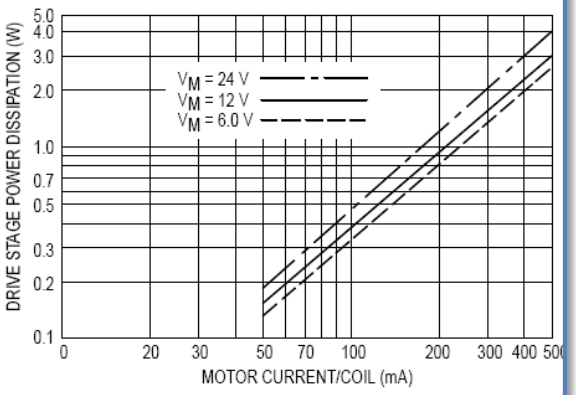


Figure 4. Clamp Diode Forward Current versus Forward Voltage

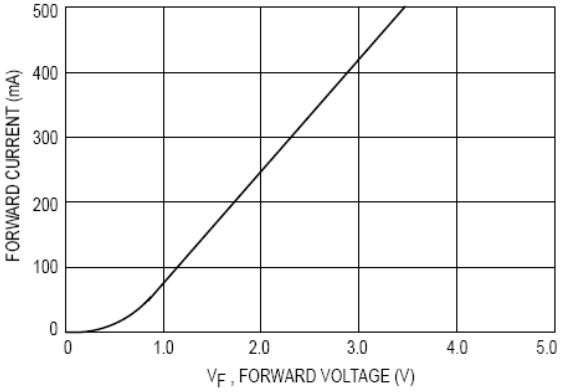


Figure 5. Power Dissipation versus Logic Supply Voltage

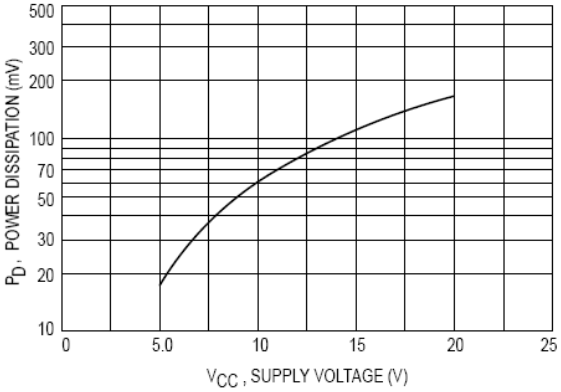
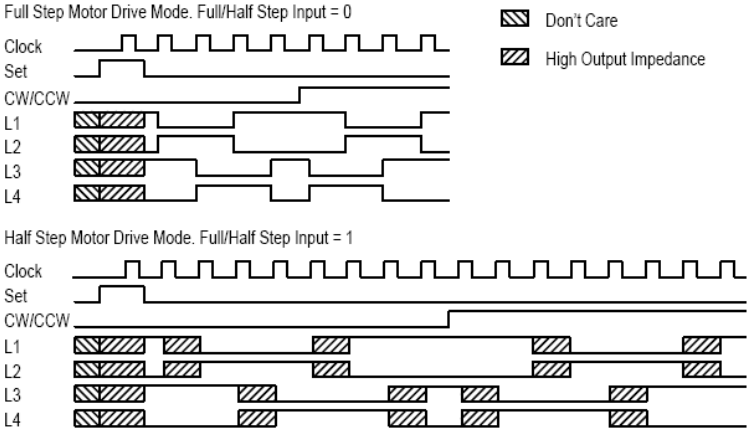


Figure 6. Timing Diagram



SAA1042

Figure 7. Typical Application
Selectable Step Rates with the Time Base Derived from the Line Frequency

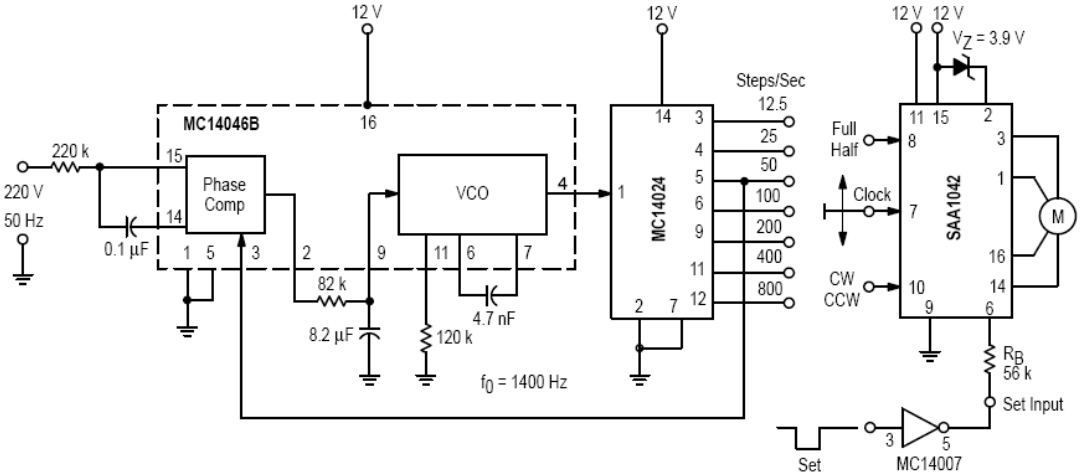
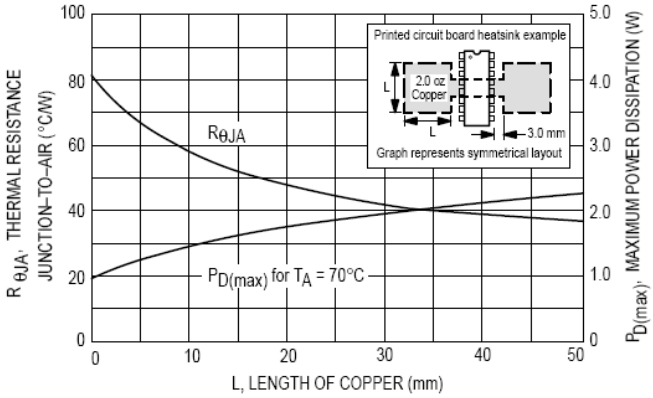


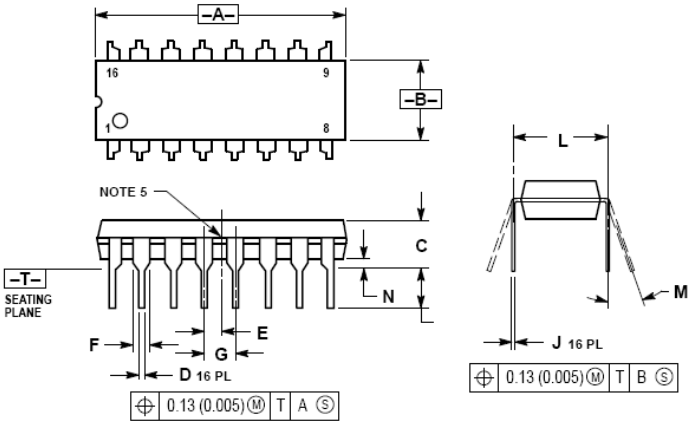
Figure 8. Thermal Resistance and Maximum Power Dissipation versus P.C.B. Copper Length



SAA1042

OUTLINE DIMENSIONS

V SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648C–03
ISSUE C



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. INTERNAL LEAD CONNECTION BETWEEN 4 AND 5, 12 AND 13.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.840	18.80	21.34
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.145	0.185	3.69	4.69
D	0.015	0.021	0.38	0.53
E	0.050 BSC		1.27 BSC	
F	0.040	0.70	1.02	1.78
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.008	0.015	0.20	0.38
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	10°	0°	10°
N	0.015	0.040	0.39	1.01

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and Ⓜ are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:
USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution; P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1–800–441–2447 or 602–303–5454

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 602–244–6609
INTERNET: http://Design–NET.com

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi–SPD–JLDC, 6F Seibu–Butsuryu–Center, 3–14–2 Tatsumi Koto–Ku, Tokyo 135, Japan. 03–81–3521–8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park, 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852–26629298

MOTOROLA

◊

SAA1042/D

Annexe D.5 : Datasheet lame de verre à face parallèle

WORLD'S LARGEST INVENTORY OF OPTICAL COMPONENTS

Switzerland > Change

Edmund optics | worldwide

Log In | My Account | Express Order | Cart: 0 Items +49 (0) 721 6273730

Enter keywords or stock no.

HOME | PRODUCTS | TECHNICAL SUPPORT | CAPABILITIES | APPLICATIONS | ABOUT EO

products : optics : windows and diffusers : ultraviolet (uv) and infrared (ir) windows

TECHSPEC® 1/10 Wave Fused Silica Windows

- UV-VIS and UV-AR Anti-Reflection Coated Versions Available
- Precision Substrates
- High Tolerance

Our precision TECHSPEC® UV Fused Silica windows feature laser-grade surface quality and parallelism. In addition, these windows will limit the transmitted wavefront distortion to 1/10 wave. Available uncoated, or with AR coatings optimized for the UV or visible spectrum, the superior transmission characteristics and excellent thermal properties combined with high tolerance manufacturing specifications make these windows an excellent choice for more demanding applications.

Products | Technical Images | Documents/Downloads

View Legend

Description	Stock No.	Price	In Stock	
25mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, Uncoated	NT47-195	€90.25	✓	BUY
25mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, VIS AR Coated	NT47-199	€99.75	✓	BUY
25mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, UV-VIS AR Coated	NT48-066	€99.75	✓	BUY
25mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, UV-AR Coated	NT65-875	€99.75	✓	BUY
30mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, Uncoated	NT47-834	€104.50	✓	BUY
30mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, VIS AR Coated	NT47-838	€118.75	✓	BUY
30mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, UV-VIS AR Coated	NT48-067	€118.75	✓	BUY
30mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, UV-AR Coated	NT65-876	€118.75	✓	BUY
40mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, Uncoated	NT47-835	€118.75	✓	BUY
40mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, VIS AR Coated	NT47-839	€133.00	✓	BUY
40mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, UV-VIS AR Coated	NT48-068	€133.00	EMAIL	BUY
40mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, UV-AR Coated	NT65-877	€133.00	✓	BUY
50mm Dia. 1/10 Wave Fused Silica Window, Uncoated	**NT47-836**	€147.25	✓	BUY

Dimensional Tolerance (mm)	+0.00/-0.20
Clear Aperture (%)	80
Thickness (mm)	5.0
Thickness Tolerance (mm)	±0.10
Surface Quality	20-10
Parallelism (arcseconds)	<5
Transmitted Wavefront, RMS (λ)	1/10
Substrate	Fused Silica UV Grade
Coating	None
RoHS	Compliant

Annexe D.6 : Datasheet support lame de verre

THORLABS

Create an account

PRODUCTS | RAPID ORDER | REQUEST CATALOG New! | SERVICE | THE COMPANY

Products Home >> Mechanics >> Fixed Optic Mounts >> LMR Lens Mounts >> LMR2

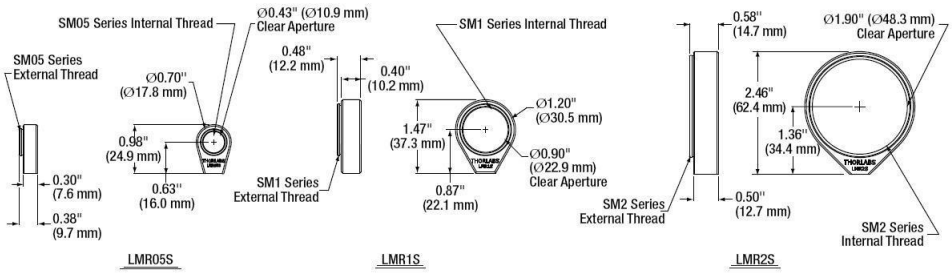
LMR2 - Lens Mount for Ø2" Optics, One Retaining Ring Included

Part Number:	LMR2 - Ask a technical question
Weight:	0.02 kg / Each
Available/Ships:	Today
RoHS:	RoHS ✓
Price:	€ 20,90
Add To Cart:	QTY : 1 Add to Basket

Lens Mounts with External Threads

In addition to the LMR Series featured on the previous page, Thorlabs offers our most popular lens mounts with external SM series threads. These mounts allow lens tubes (see page 117) to be directly attached to both sides of the fixed lens mount, which is ideal for multi-element optical systems that require all optics to be in close proximity to one another.

- Available for Ø1/2", Ø1.00", and Ø2.00" Optics
- Bottom-Located #8-32 (M4 x 0.7) Hole for Post Mounting
- Both Internally and Externally Threaded



Annexe D.7 : Datasheet palier lisse

igus® Les plastiques pour la vie

iglidur® J

- Traitement de commande en 24-48h
- Traitement de commande en 2-5 jours ouvrables
- Délai sur demande

iglidur® J : Le spécialiste du fast-et-slow-motion

Palier associant parfaitement la résistance à l'usure à charges faibles à élevées et les meilleurs coefficients de frottement. Stabilité dimensionnelle même en milieux humides

Variantes

○ Forme S (métrique)

◉ Forme F (métrique)

○ Forme T (métrique)

○ Forme S (pouces)

○ Forme F (pouces)

iglidur® J, forme F (métrique)

Réf. :	JFM-0405-06
Diamètre de l'arbre d1 [mm]:	4
Largeur du palier b1 [mm]:	6
Epaisseur de la colorette b2 [mm]:	0.75
Diamètre extérieur d2 [mm]:	5.5
Diamètre de la colorette d3 [mm]:	9.5
Tolérance min. d1 [mm]:	+0,020
Tolérance max. d1 [mm]:	+0,068
b1-Tolérance :	h13
b2-Tolérance :	-0,14
d3-Tolérance :	d13

La tolérance d1 indiquée résulte après l'emmanchement.
» Procédé de vérification

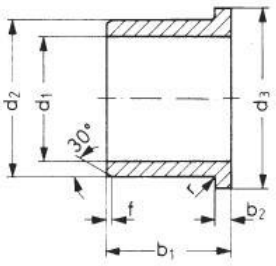
(Cotes selon ISO 3547-1 et cotes spéciales) Tolérances de montage recommandées : alésage tolérancé H7, arbre tolérancé h9. Champ de tolérance pour d1 après emmanchement dans un alésage H7. Pour d3, le champ de tolérance est d13; pour b1, le champ de tolérance est h13; pour b2, la tolérance est de -0,14.

Plus:

Demande / commande

> 1 Pc.	4,21 CHF/Pc.	> 10 Pc.	2,41 CHF/Pc.
> 25 Pc.	1,44 CHF/Pc.	> 50 Pc.	0,99 CHF/Pc.
> 100 Pc.	0,76 CHF/Pc.	> 200 Pc.	0,61 CHF/Pc.
> 500 Pc.	» Sur demande		

1 Pc. Ajouter au panier

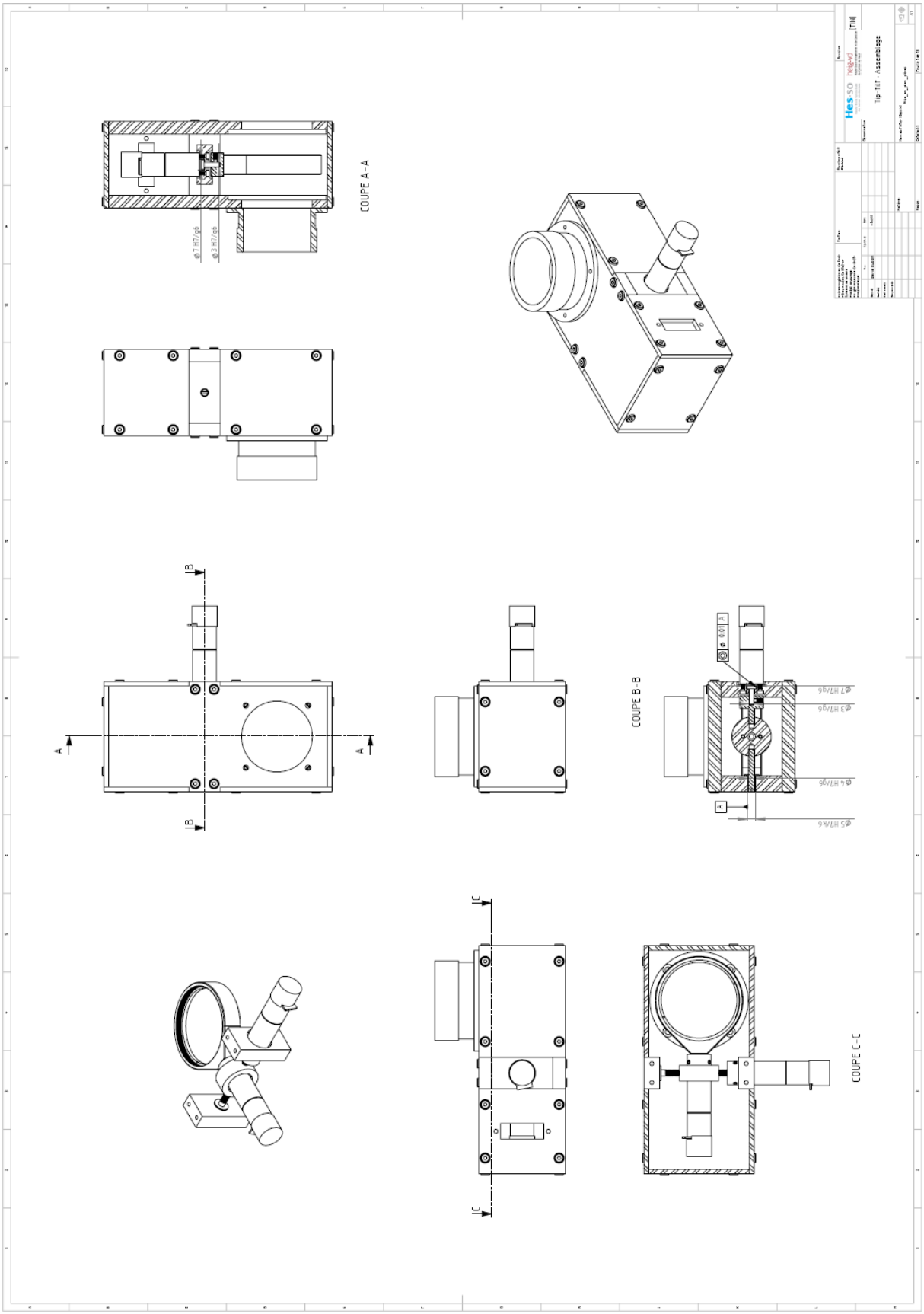


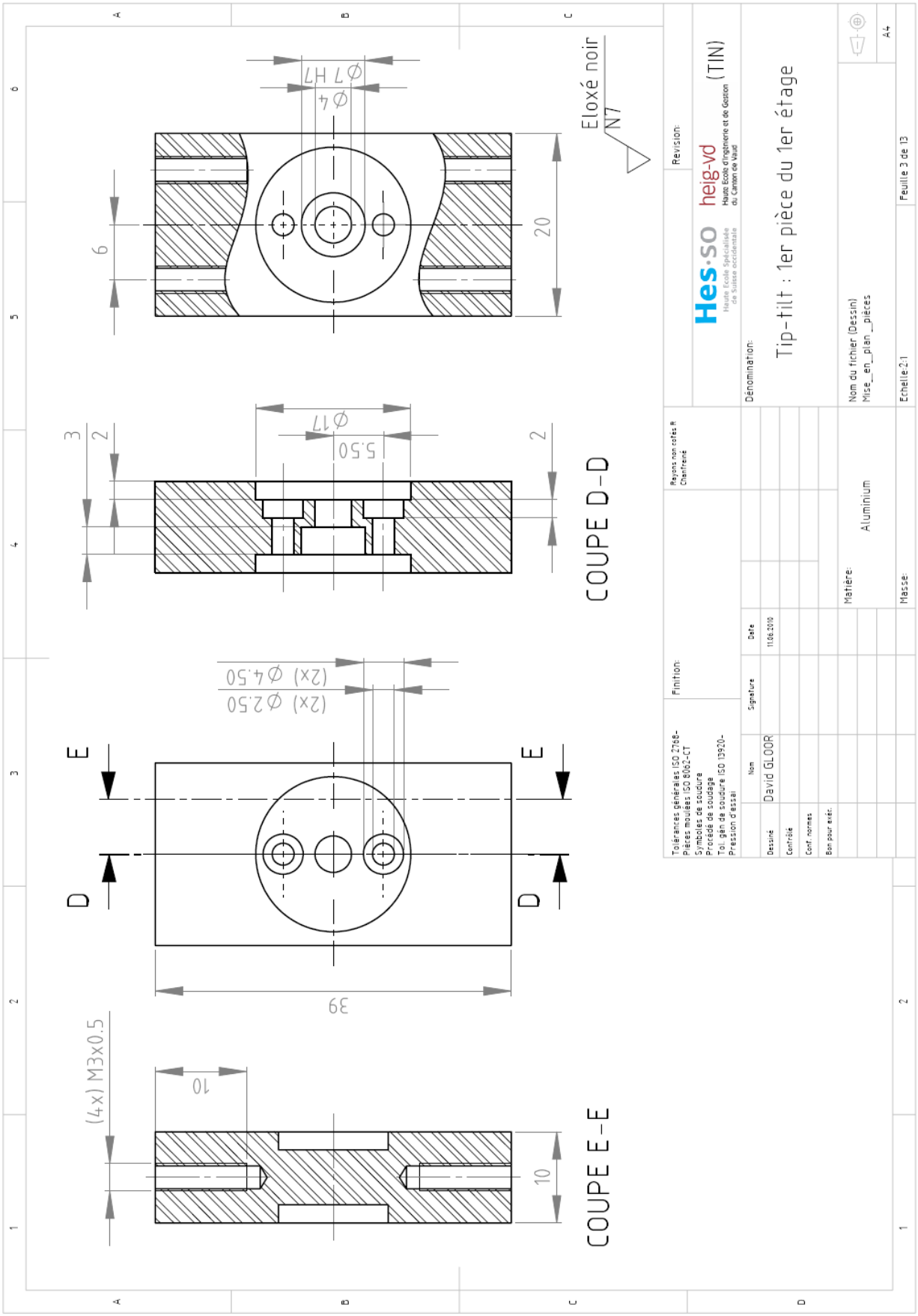
r = 0,5 mm maxi

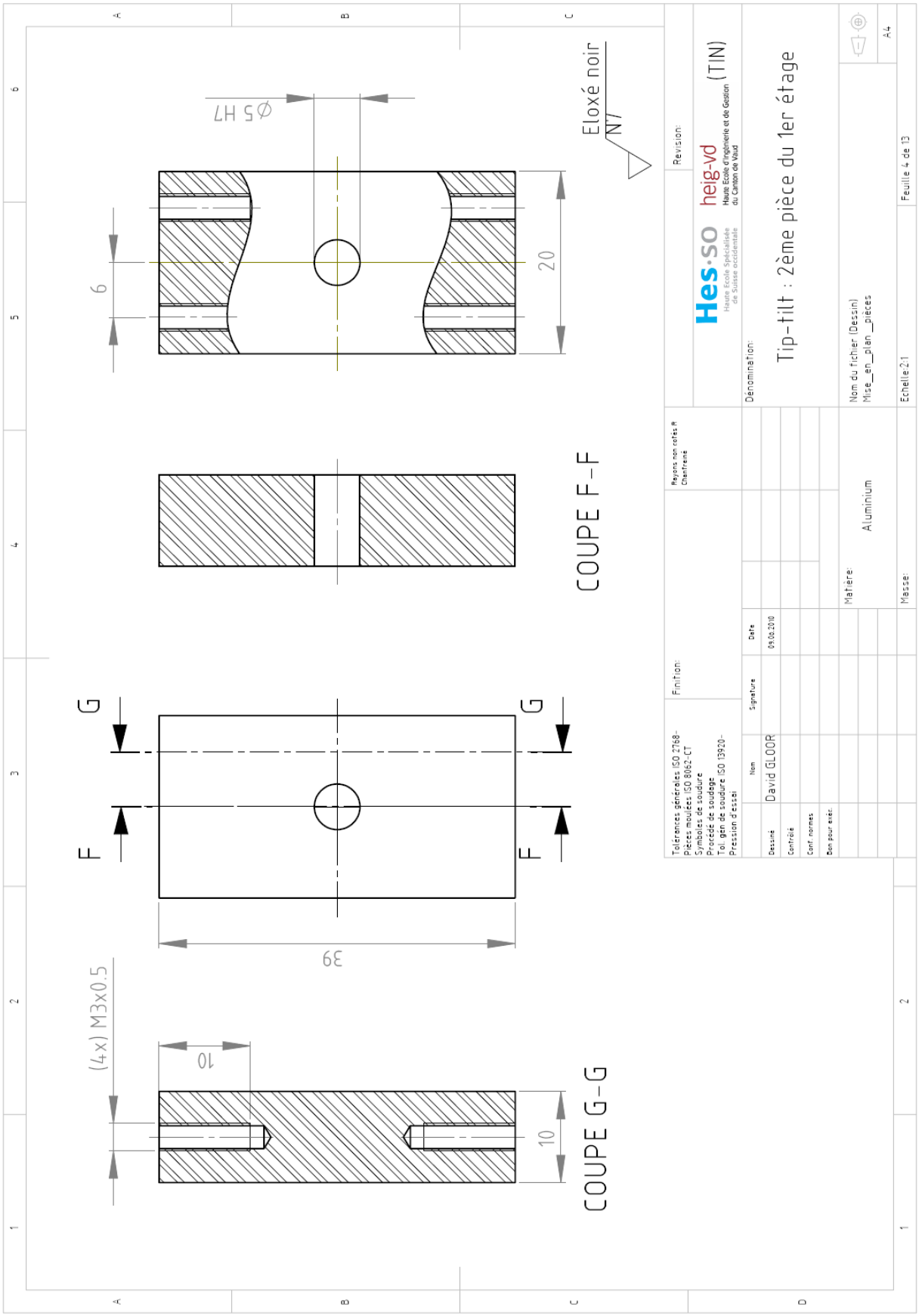
Chanfrein en fonction du d1

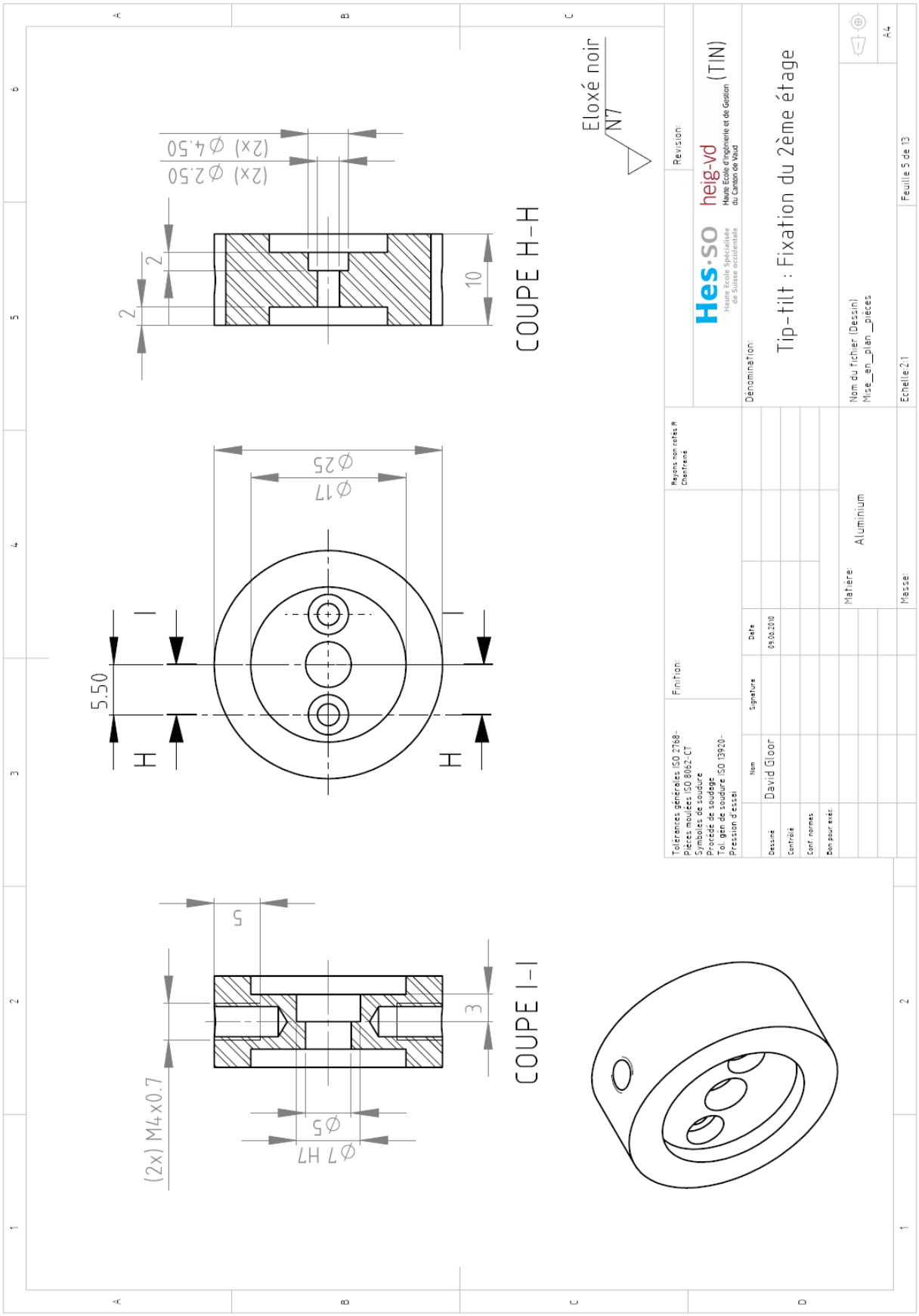
d1 [mm]:	Ø 1-6	Ø 6-12	Ø 12-30	Ø > 30
f [mm]:	0,3	0,5	0,8	1,2

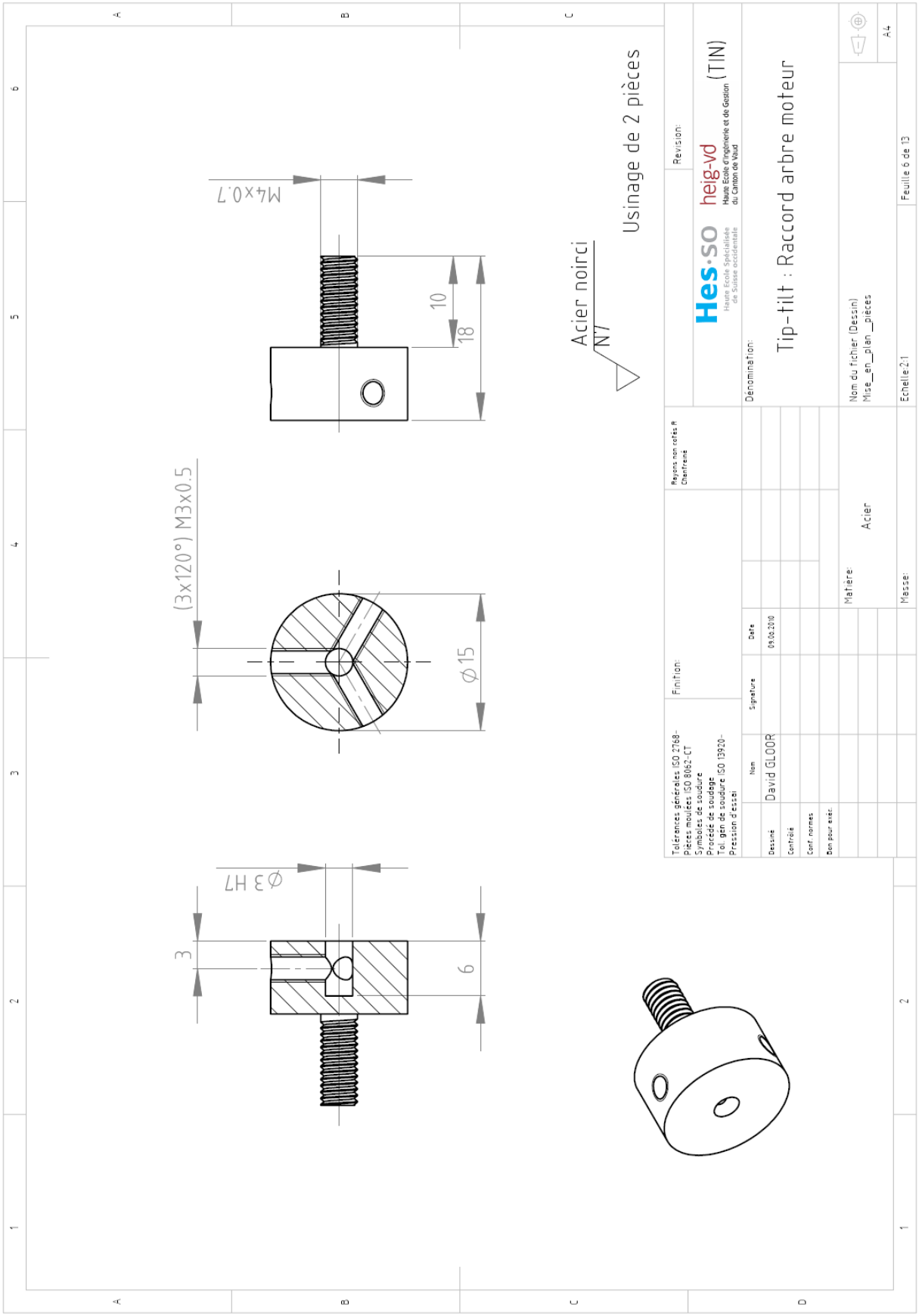
Annexe E : Mise en plan

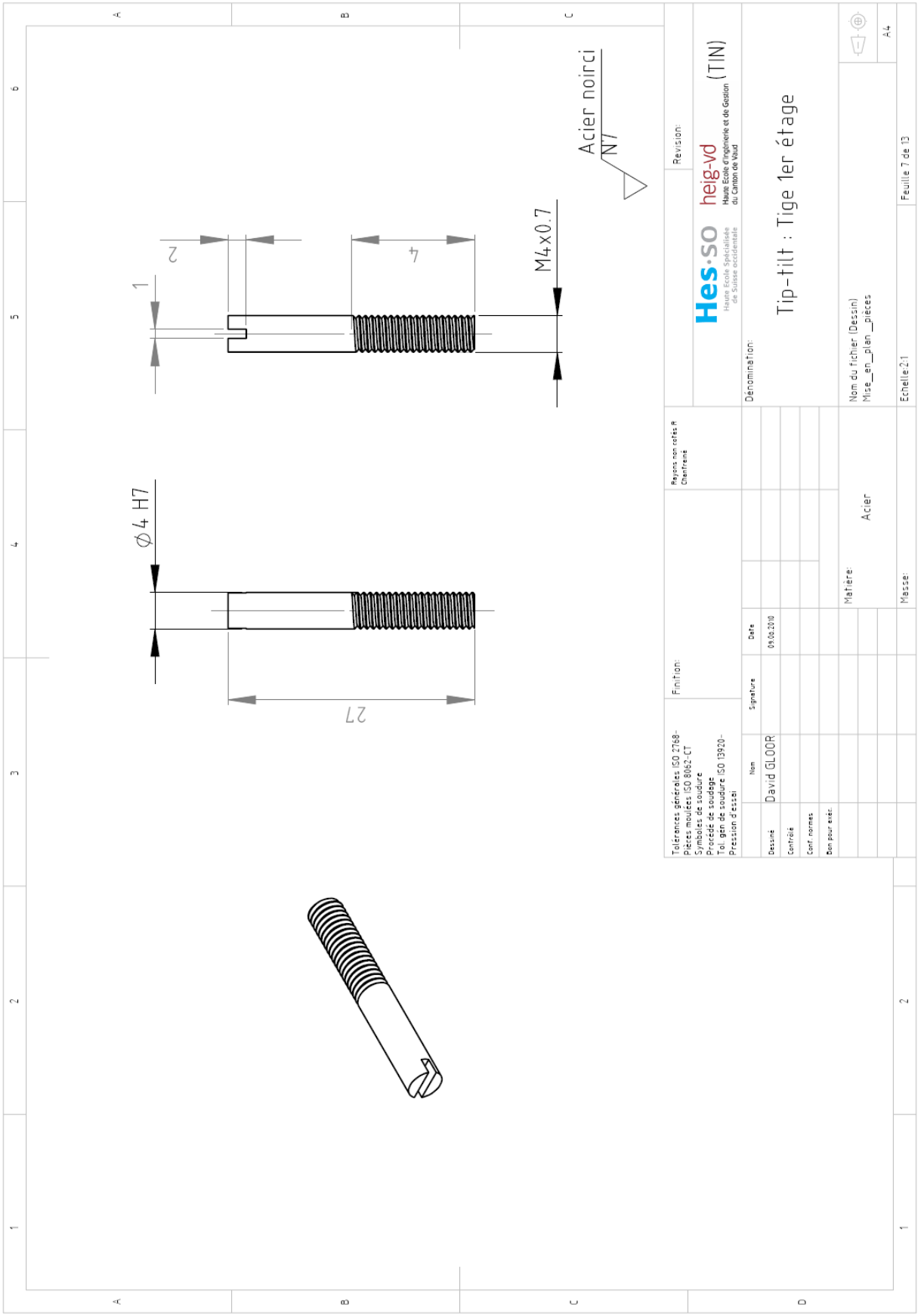


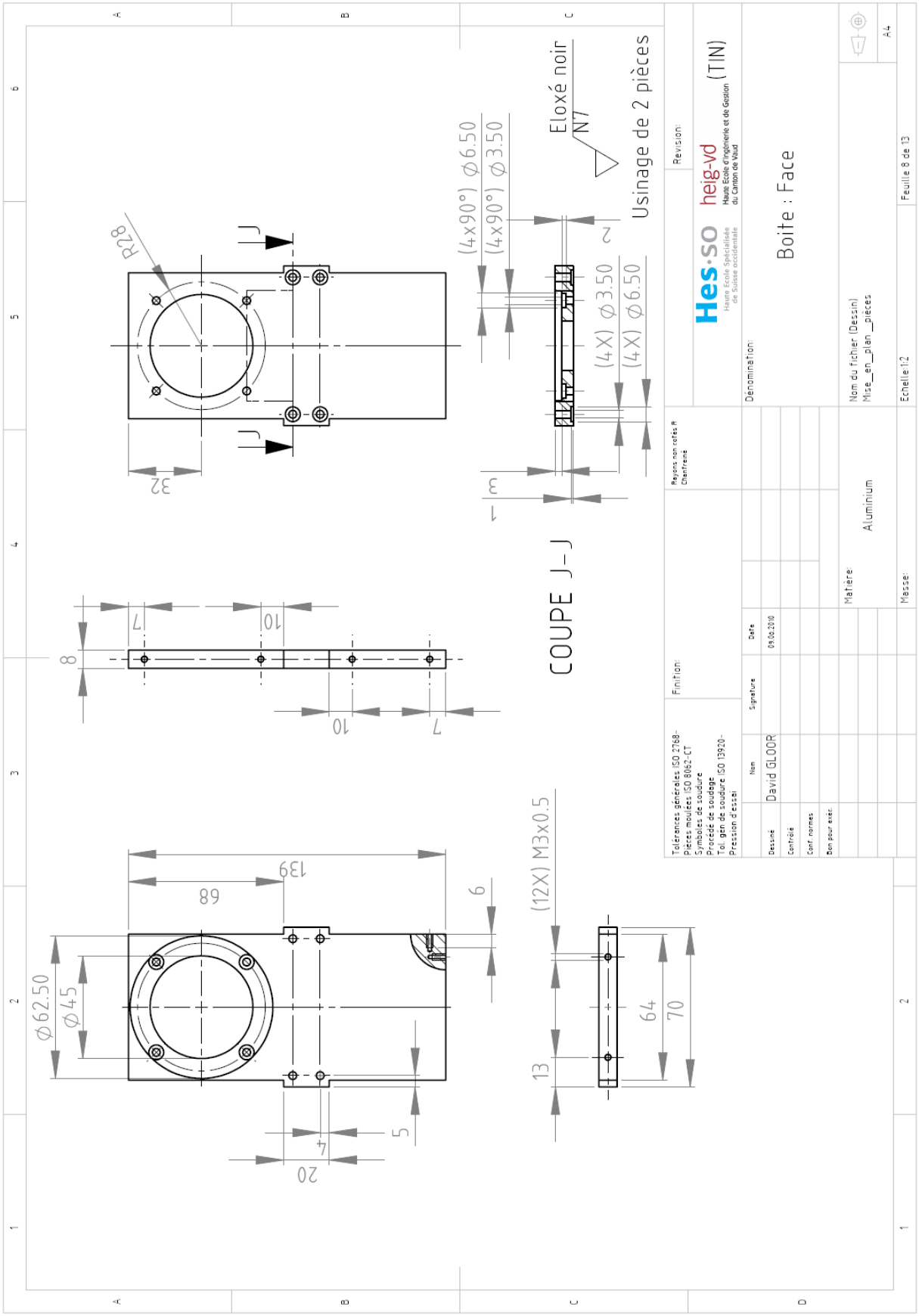

Eloxé noir
N7
Ø7 H7
Ø4
6
20
3
2
Ø17
5.50
2
COUPE D-D
(2x) Ø2.50
(2x) Ø4.50
D
E
E
D
39
(4x) M3x0.5
10
10
COUPE E-E
Revision:
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Tip-tilt : 1er pièce du 1er étage
Rayons non cotés R Chanfreiné
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
11.06.2010
Contrôle
Conf. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Masse:
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
Echelle 2:1
Feuille 3 de 13
A4

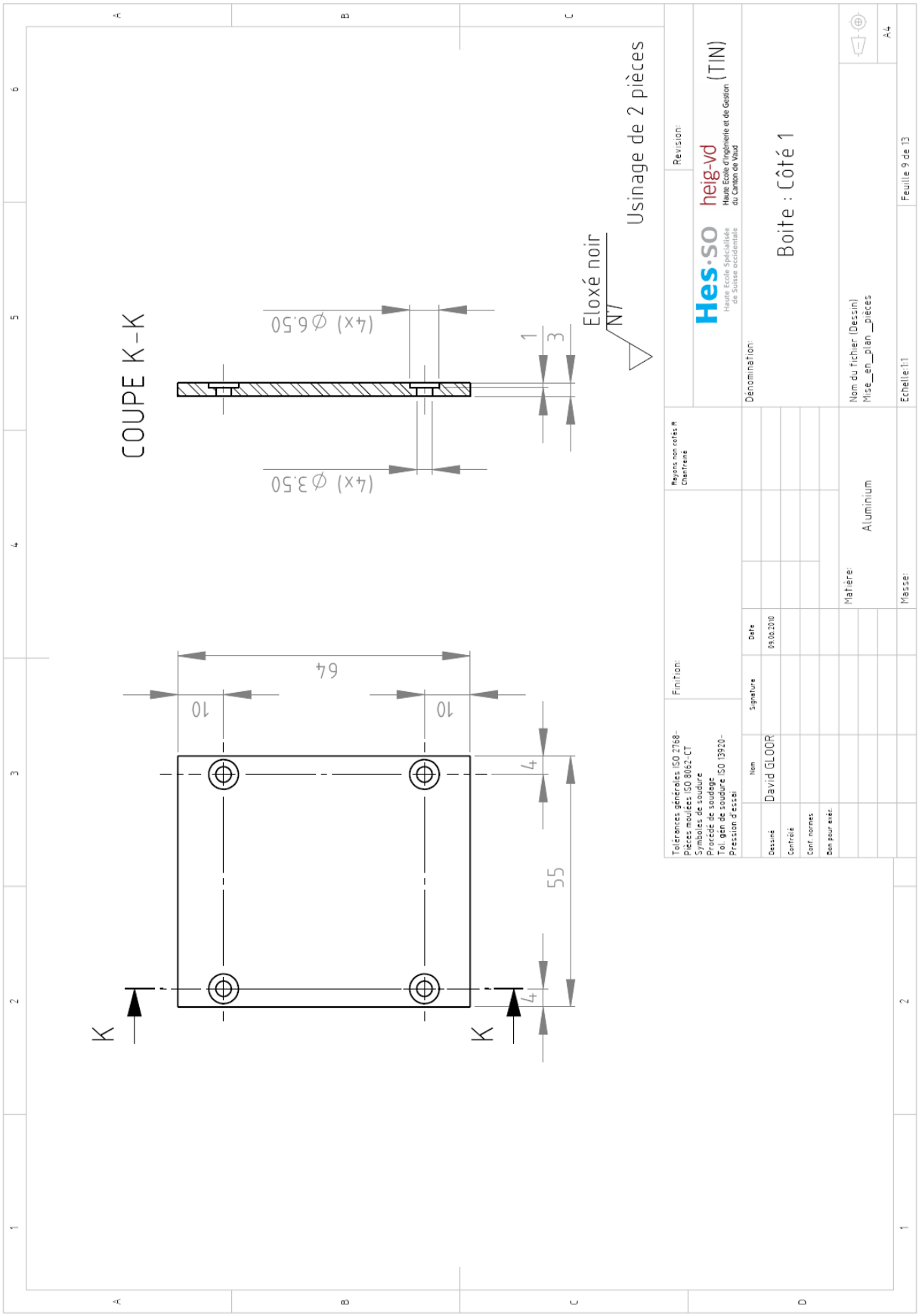

Eloxé noir
N7
Ø5 H7
6
20
COUPE F-F
G
F
39
(4x) M3x0.5
10
10
COUPE G-G
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Finition:
Rayons non cotés R
Chanfreine
Revision:
Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Tip-tilt : 2ème pièce du 1er étage
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Cont. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
A4
Echelle:2:1
Masse:
Feuille 4 de 13

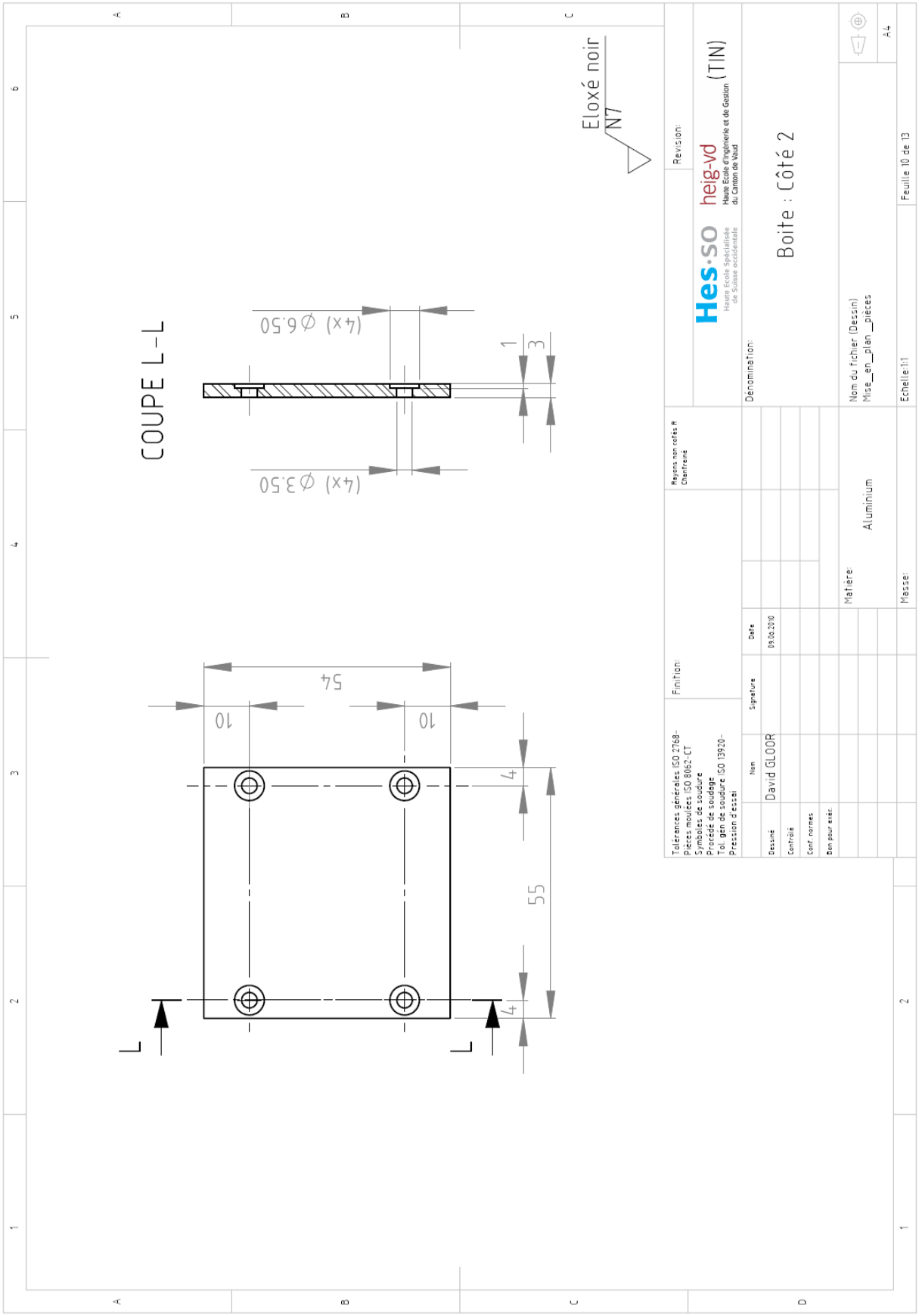

Eloxé noir
N7
COUPE H-H
(2x) Ø4.50
(2x) Ø2.50
2
2
10
Ø25
Ø17
5.50
H
H
I
I
COUPE I-I
(2x) M4x0.7
Ø7 H7
Ø5
5
3
Revision:
Hes·so
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
heig-vd
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Tip-tilt : Fixation du 2ème étage
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
A4
Feuille 5 de 13
Echelle 2:1
Rayons non cotés: R
Chanfreins
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David Gloor
09.06.2010
Contrôlé
Conf. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Masse:

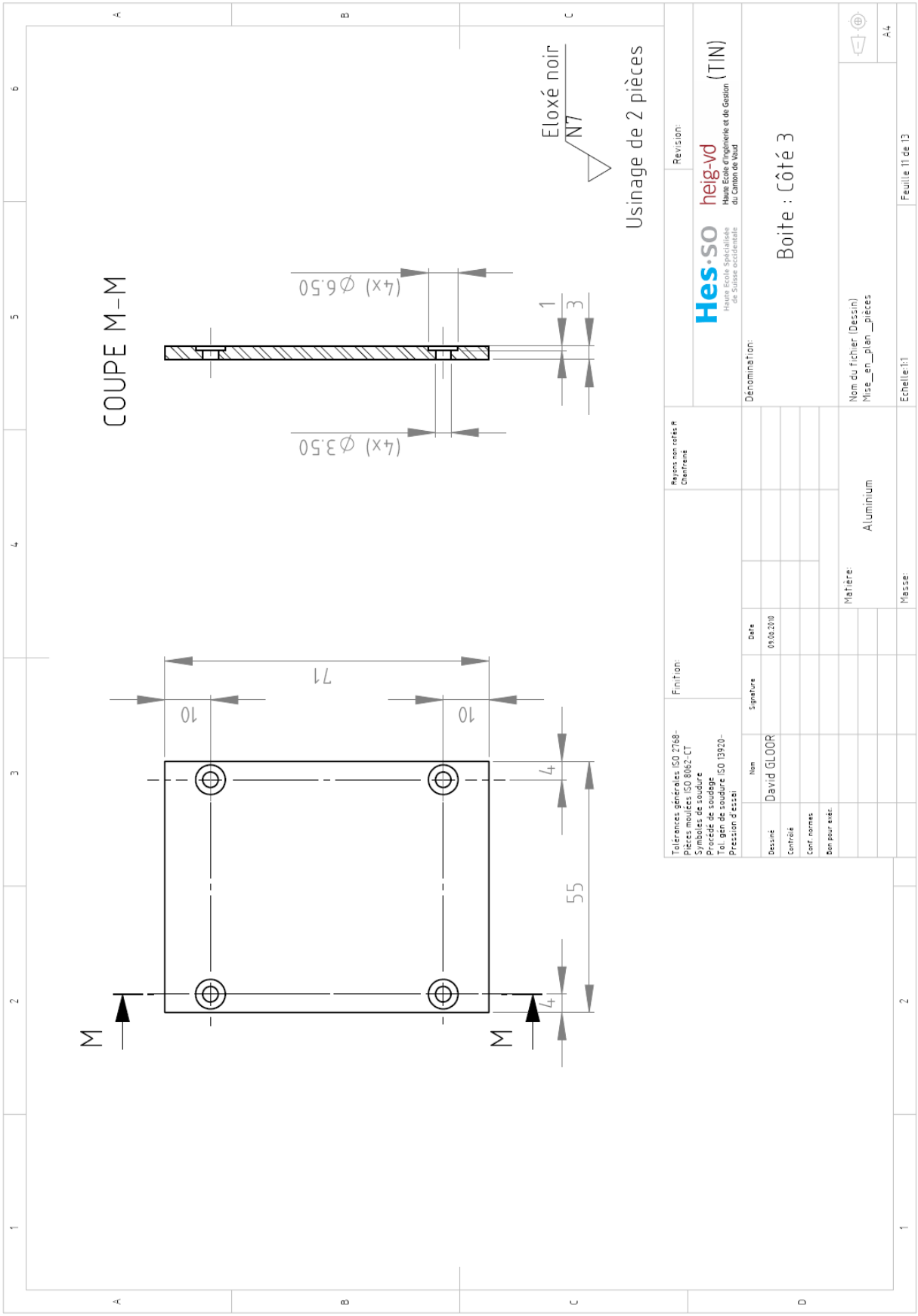

M4x0.7
10
18
Acier noirci
N7
Usinage de 2 pièces
(3x120°) M3x0.5
Ø15
Ø3 H7
3
6
Revision:
Hes·so heig-vd
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale
(TIN)
Dénomination:
Tip-tilt : Raccord arbre moteur
Rayons non notés: R Chanfreins
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Cont. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Acier
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pieces
Masse:
Echelle:2:1
Feuille 6 de 13
A4

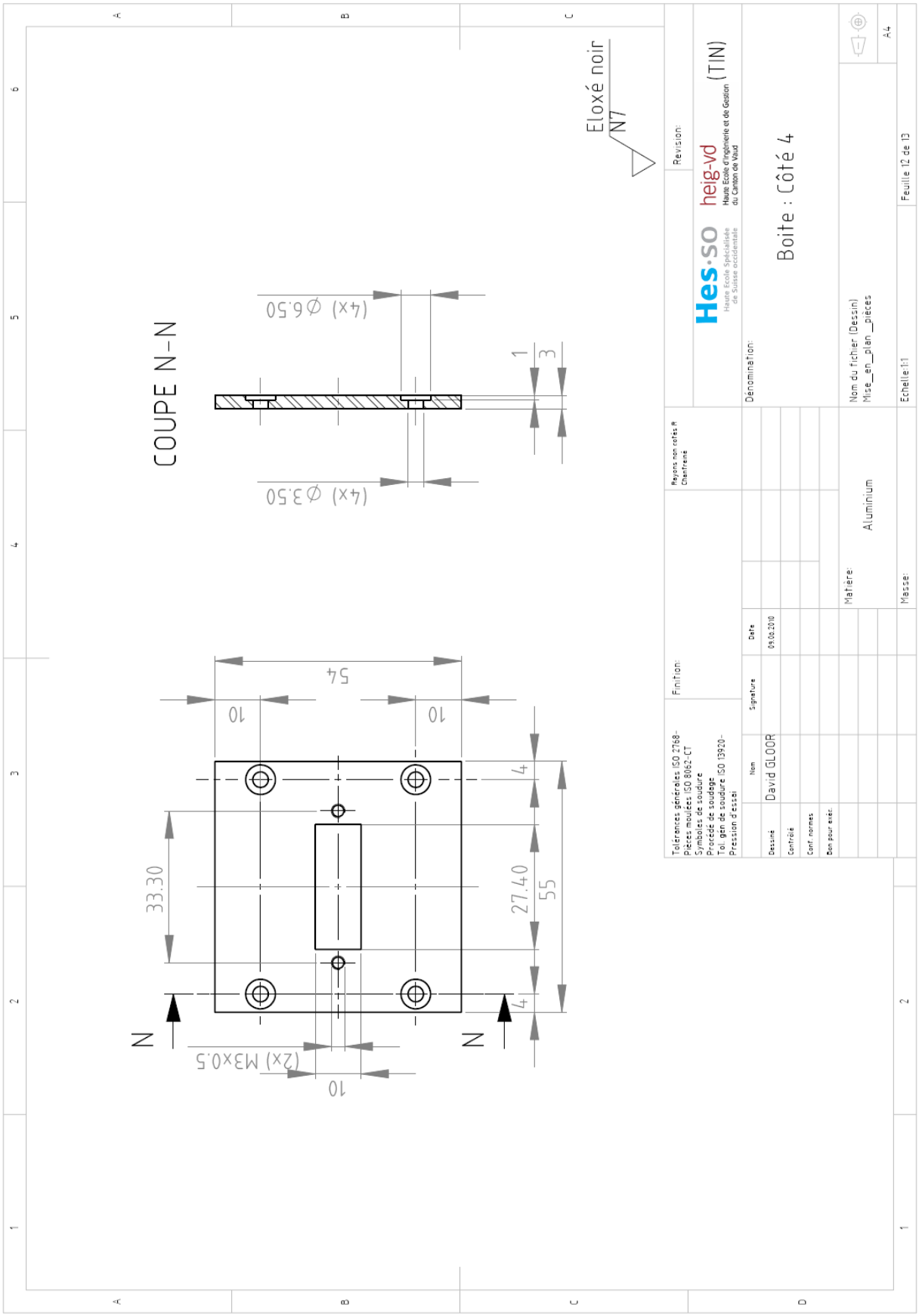

Acier noirci
N7
M4x0.7
2
4
1
Ø4 H7
27
Revision:
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Tip-tilt : Tige 1er étage
Rayons non cotés: R
Chanfreins
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Conf. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Acier
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
A4
Echelle 2:1
Feuille 7 de 13
Masse:

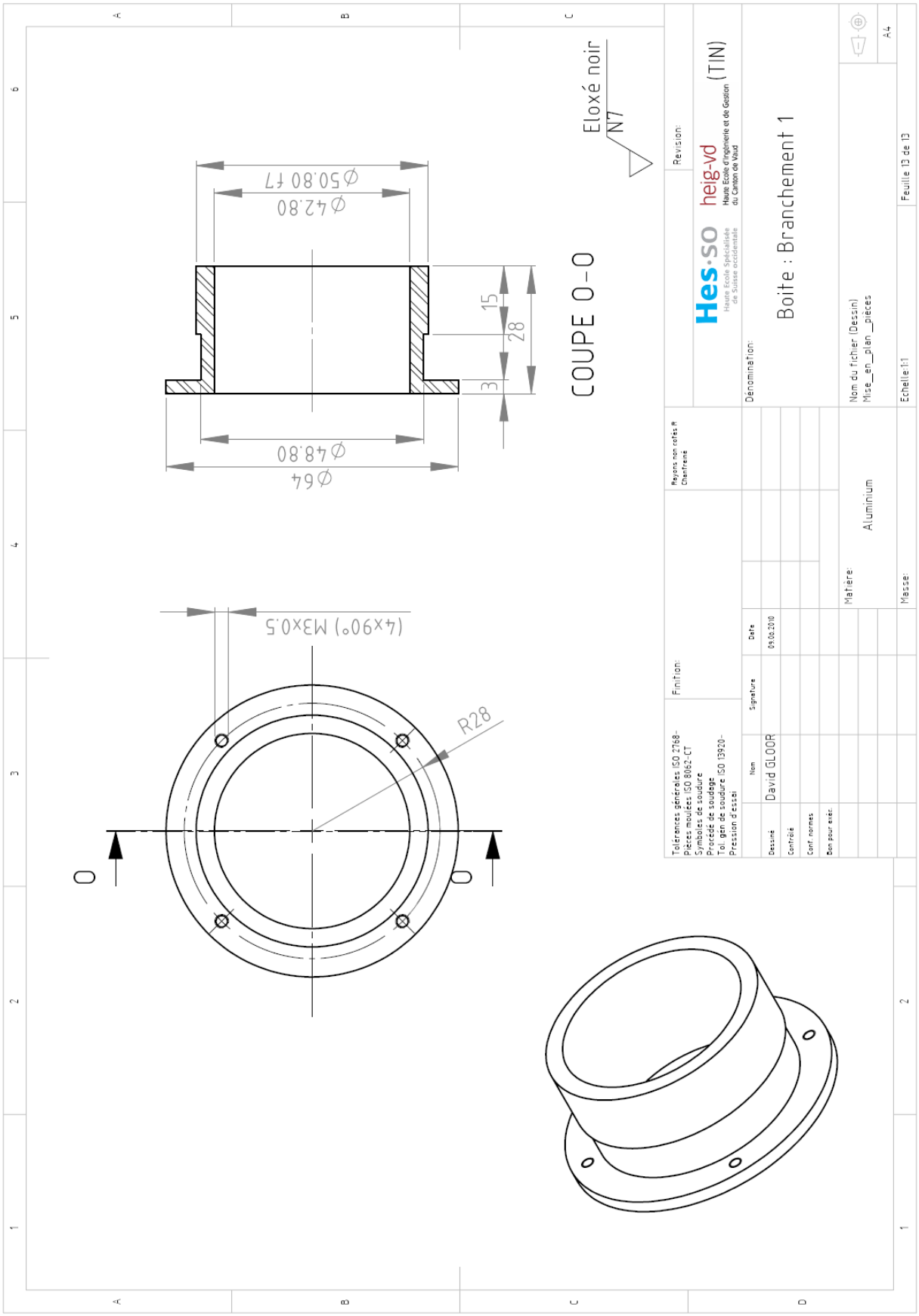

Usinage de 2 pièces
Eloxé noir
N7
(4x90°) ⌀6.50
(4x90°) ⌀3.50
(4X) ⌀3.50
(4X) ⌀6.50
R28
COUPE J-J
(12X) M3x0.5
⌀62.50
⌀45
139
68
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Boite : Face
Aluminium
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pieces
Feuille 8 de 13
Echelle:1:2
A4
David GLOOR
09.06.2010


COUPE K-K
(4x) Ø6.50
(4x) Ø3.50
1
3
Eloxé noir
N7
Usinage de 2 pièces
64
10
10
4
55
4
K
K
Revision:
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Boite : Côté 1
Rayons non cotés: R Chanfreine
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Conf. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
A4
Feuille 9 de 13
Echelle:1:1
Masse:


Eloxé noir
N7
COUPE L-L
(4x) Ø6.50
(4x) Ø3.50
1
3
54
10
10
4
55
4
L
L
Revision:
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Boite : Côté 2
Rayons non cotés: R
Chanfreins
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Cont. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Masse:
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pieces
Echelle:1:1
Feuille 10 de 13
A4


COUPE M-M
Eloxé noir
N7
Usinage de 2 pièces
(4x) Ø6.50
(4x) Ø3.50
1
3
71
10
10
4
55
4
M
M
Revision:
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Boite : Côté 3
Rayons non cotés R
Chanfreins
Finition:
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Conf. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Masse:
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
Echelle 1:1
Feuille 11 de 13
A4


COUPE N-N
(4x) Ø6.50
(4x) Ø3.50
1
3
54
10
10
33.30
27.40
55
4
4
N
N
(2x) M3x0.5
10
Eloxé noir
N7
Revision:
Hes·so
heig-vd
Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
(TIN)
Dénomination:
Boite : Côté 4
Rayons non cotés: R
Chanfreins
Finition:
Tolérances générales: ISO 2768-
Pièces moulées: ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure: ISO 13920-
Pression d'essai:
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôlé
Conf. normes
Bon pour exéc.
Matière:
Aluminium
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
A4
Feuille 12 de 13
Echelle: 1:1
Masse:


Eloxé noir
N7
COUPE O-O
Ø64
Ø48.80
Ø42.80
Ø50.80 f7
15
28
3
(4x90°) M3x0.5
R28
O
O
Hes·so
heig-vd
(TIN)
Boîte : Branchement 1
Aluminium
Nom du fichier (Dessin)
Mise_en_plan_pièces
Feuille 13 de 13
A4
Echelle 1:1
Masse:
Matière:
Dénomination:
Revision:
Finition:
Rayons non cotés: R
Chanfreine
Tolérances générales ISO 2768-
Pièces moulées ISO 8062-CT
Symboles de soudure
Procédé de soudage
Tol. gén de soudure ISO 13920-
Pression d'essai
Nom
Signature
Date
Dessiné
David GLOOR
09.06.2010
Contrôle
Cont. normes
Bon pour exéc.