

-DEVELOPPEMENT D'UN AUTOGUIDER POUR TELESCOPE-

TRAVAIL DE BACHELOR

JONATHAN MARTIN
ETUDIANT EN MICROTECHNIQUES, 3^{EME} ANNEE, CURSUS BACHELOR

23.07.2010

Résumé

Lors de prises de vues photographiques à l'aide d'un télescope, de nombreuses perturbations apparaissent, ce qui rend l'image floue. Afin de pallier à ce problème, une étoile lumineuse dans le champ de vue est choisie et en mesurant son déplacement, on réaligne le télescope afin que l'étoile soit tout le temps à la même position. La majorité des astronomes amateurs utilisent une webcam et un logiciel mesurant la déviation de l'étoile, notre objectif est d'utiliser un autre principe, permettant de suivre des étoiles moins lumineuses.

La solution choisie consiste à mesurer l'écart de position de l'étoile par un capteur photodiode 4 cadrans standard positionné sur l'étoile par une table xy de positionnement motorisée. Une optimisation est prévue en modifiant la photodiode standard 4 cadrans par une photodiode à effet avalanche 4 cadrans. Ceci améliorerait nettement le suivi d'étoiles de faible luminosité. Une fois le déplacement mesuré par le capteur, une correction est faite par un système tip-tilt, réalisé dans le cadre d'un second travail de diplôme par David Gloor.

Le système développé comprend un module complet *autoguider* pouvant se monter sur le beamsplitter (séparateur de faisceau) du télescope. Le déplacement du capteur sur l'étoile est réalisé par une micro-platine xy au foyer du télescope avec une précision absolue inférieure 20 microns, motorisée par 2 moteurs pas-à-pas. La gestion totale de l'*autoguider* est réalisée par une interface Labview.

Un banc d'essai optique a été réalisé et a démontré que l'on pouvait mesurer le déplacement d'une étoile de taille standard grâce à une photodiode 4 cadrans. Un second banc d'essai a validé l'efficacité d'une optimisation par une photodiode à avalanche, afin d'améliorer la détectivité du système. Cependant, une électronique d'amplification doit être développée pour atteindre la détectivité souhaitée. Le système mécanique développé et construit a pu être testé et validé, ainsi que son interface.

La finalisation du système pourra être faite ultérieurement en montant la photodiode sur la platine.

1 Table des matières

Résumé	2
1 Table des matières	4
2 Cahier des charges	6
3 Introduction	7
4 Contexte et objectifs	8
4.1 Contexte – problématique	8
4.2 Perturbations subies et limite de diffraction d'un télescope.....	9
4.2.1 Limite de diffraction	9
4.2.2 Perturbations dues aux tolérances mécaniques	10
4.2.3 Perturbations dues aux turbulences atmosphériques	11
4.3 Principe général de détection et de correction des perturbations.....	14
4.4 Propriétés du mesurande.....	16
4.4.1 Taille de l'étoile guide	16
4.4.2 Puissance lumineuse de l'étoile guide	16
4.4.3 Erreurs de positionnement de l'étoile guide.....	18
4.5 Etat de l'art des systèmes de détection	19
4.5.1 Webcam ou CCD.....	19
4.5.2 Système à photomultiplicateur à 4 anodes.....	21
4.5.3 Système à photodiode 4 cadrans (professionnel).....	21
4.6 Système de correction.....	22
5 Télescope Meade LX200 de la HEIG-VD	23
6 Conception générale du système.....	24
6.1 Principe de mesure.....	24
6.2 Conditionnement du capteur	26
6.3 Centrage de l'étoile sur le capteur	27
6.4 Isolement de l'étoile.....	29
6.5 Choix d'un capteur optique	30
6.5.1 Critères de choix.....	30
6.5.2 CCD	31
6.5.3 PSD.....	33
6.5.4 Photodiode à 4 cadrans.....	34
6.5.5 Photodiode APD à quatre cadrans	35
6.5.6 Photomultiplicateur à 4 cathodes	36
6.5.7 Synthèse	37
6.6 Exigences de la platine xy.....	38

6.6.1	Exigences générales.....	38
6.6.2	Choix de la motorisation	39
6.7	Récapitulatif de la conception de l'autoguidage	41
6.8	Spécifications techniques générales de l'autoguidage.....	42
7	Description de l'autoguidage	43
7.1	Positionnement du capteur.....	43
7.1.1	Première esquisse de la mécanique de la platine xy, sans guidage préconçu	43
7.1.2	Conception générale de la platine xy	43
7.1.3	Guidages	44
7.1.4	Entraînement.....	45
7.1.5	Dimensionnement des moteurs pas-à-pas.....	45
7.1.6	Boîtier	50
7.1.7	Montage sur le télescope	50
7.2	Interface utilisateur	51
7.2.1	Cahier des charges de l'interface	51
7.2.2	Interface réalisée	51
8	Essais	55
8.1	Objectifs.....	55
8.2	Capteurs optiques commandés.....	55
8.3	Mesure de déplacement d'une étoile	56
8.3.1	Banc d'essai optique n°1	56
8.3.2	Détermination du plan principal H de l'objectif 5x	61
8.3.3	Résultats	62
8.4	Mesure du gain de la photodiode APD	67
8.4.1	Banc d'essai optique n°2	67
8.4.2	Résultats	68
8.5	Essai mécanique et interface.....	69
8.6	Synthèse	72
9	Perspective de développement ultérieur	73
10	Conclusion.....	74
11	Références.....	75
12	Liste des figures.....	76
13	Remerciements	78
14	Annexes.....	79
15	Journal de travail.....	120

2 Cahier des charges

Le projet de diplôme consiste à développer et construire un système de guidage automatique pour télescope amateur, appelé plus communément « *autoguidage* ». Le système devra être conçu pour le télescope du laboratoire optique de la HEIG-VD, un Meade LX200.

- 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 laboratoire optique.
- Conception de l' *autoguidage* et identification de tous ses éléments mécaniques, optoélectroniques, 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 est désirable.
- Essais et validation du système.

3 Introduction

Afin de valider la formation Bachelor HES en microtechniques, un travail de Bachelor dans le domaine de la microtechnique doit être réalisé à la fin du cursus Bachelor.

Ce travail a pour objectifs d'acquérir de nouvelles connaissances nécessaires à la réalisation du travail de diplôme, et de mettre en pratique ces dernières ainsi que celles apprises durant le cursus Bachelor. Bien évidemment, un point capital est de réaliser un projet réel et concret, en travaillant de manière professionnelle, autonome, et en tenant compte d'un cahier des charges. Des aspects logistiques, organisationnels, et de communication seront aussi évalués. Le suivi du travail, ainsi que le « coaching » est assuré par un professeur.

De nombreux projets de diplôme nous ont été proposés par le biais de diverses entreprises, ou par des instituts de la HEIG-VD. Les sujets proposés concernant l'astronomie amateur m'ont immédiatement intéressé de part leur originalité et leur pluridisciplinarité. Le sujet choisi, à savoir la conception d'un système de guidage automatique pour télescope amateur, encadre non-seulement de l'optique, mais aussi de la micromécanique, de l'électronique, ainsi que de la programmation logicielle. Aussi, il était important pour moi de faire un travail de diplôme qui aboutit à la construction pratique de l'idée développée, soit par un banc de test, soit par la construction d'un prototype.

Le travail consiste premièrement en une recherche approfondie sur le concept et la problématique, étant donné nos faibles connaissances en astronomie. Puis, une approfondissement sur les différents capteurs optiques sera réalisé afin de sélectionner le plus approprié à l'application. Le concept de l'autoguideur sera ensuite défini, à savoir son système de mesure optique, ainsi que la mécanique le constituant. Finalement, l'*autoguideur* sera dimensionné, construit et testé à l'aide d'un banc d'essai et d'un interface graphique.

Le travail s'étendra sur 16 semaines, à raison de 1 jour par semaine, auxquelles s'ajouteront 4 semaines à plein temps après la période des examens finaux.

4 Contexte et objectifs

4.1 Contexte – problématique

L'astronomie amateur a évolué de manière significative depuis l'apparition des caméras CCD, webcam, et autres « nouvelles » technologies. Il était auparavant très difficile d'obtenir des photographies, en particulier des objets du ciel profond (planètes hors du système solaire, étoiles ou amas d'étoiles). Pour de telles observations, le temps de pose se doit d'être long afin de « récolter » assez de lumière, à savoir de quelques minutes à plusieurs heures, selon les régions observées et les sites astronomiques.

Durant ce laps de temps, non seulement la terre tourne, mais diverses autres perturbations, en particulier les perturbations atmosphériques, sont aussi présentes et génèrent alors des erreurs sur l'image observée. La rotation de la terre est relativement bien corrigée grâce à la motorisation des axes de la monture du télescope (1 à 2 axes motorisés selon le type de monture). Cependant, des erreurs significatives restent présentes à cause des imperfections dans les entraînements des axes du télescope, ainsi que des diverses perturbations non-corrigées. Parmi ces dernières, la perturbation atmosphérique, générant des variations de l'indice de réfraction de l'air entre les différentes zones de l'atmosphère et déviant ainsi la lumière.

La plupart des télescopes ayant une monture motorisée sont dotés d'un suivi automatique par calcul de la trajectoire de l'étoile, ce suivi est en boucle ouverte. Pour la photographie astronomique, il devient obligatoire de corriger les perturbations autre que la rotation de la terre, sous peine d'obtenir des images médiocres à long temps de pause. Une correction en boucle fermée est alors nécessaire.

Afin de suivre au mieux une étoile, la solution actuelle pour l'astronome amateur consiste au suivi d'une étoile guide à l'aide d'une webcam ou d'une CCD. Le logiciel « mesure » alors l'erreur entre la position initiale de l'étoile et sa position réelle et envoie la correction nécessaire à la motorisation de la monture du télescope. On a donc un système de régulation en boucle fermée, ce système est communément appelé « autoguideur ».

Ce principe fonctionne relativement bien et assure de bons résultats toutefois, on se retrouve limité à certaines étoiles guides d'une magnitude inférieure à 4 afin que la webcam CCD « emmagasine » assez de lumière pour le guidage. Si l'on souhaite observer une partie du ciel profond avec un faible champ pour augmenter le grossissement, alors il est très probable de ne pas trouver d'étoile avec une magnitude suffisante à bon guidage. De plus, la rapidité du système de correction est plus faible.

Pour les télescopes de plus grand diamètre, plus sensibles aux perturbations atmosphériques, une correction plus fine supplémentaire à la correction de la rotation de la terre est alors obligatoire. Une des solutions est de mesurer continuellement l'écart de position dans le champ de vue d'une étoile guide par un détecteur approprié, par exemple un 4 cadrans (matrice 2x2 de photodiodes), ainsi que d'un système de correction, appelé « tip-tilt ». Ce dernier corrige la trajectoire des rayons lumineux sur le système d'imagerie en inclinant sur 2 axes une lame de verre ou un miroir qui réfracte ou reflète les rayons lumineux. Nous obtenons alors un système de correction en boucle fermée sensible et rapide pour les perturbations atmosphériques de premier ordre. Le détecteur est monté sur un mécanisme XY afin d'être ciblé sur l'étoile guide.

La correction de l'erreur mesurée par le capteur est faite par un tip-tilt développé par David Gloor dans le cadre de son projet de diplôme.

4.2 Perturbations subies et limite de diffraction d'un télescope

Les télescopes sont perturbés par de nombreux phénomènes physiques. Certains phénomènes proviennent de l'atmosphère, d'autres de la géométrie du télescope même. Toutes ces perturbations forment donc une image déformée, flouée, au foyer du télescope. Ce sujet étant très vaste, il a été choisi de présenter uniquement les principales, à savoir :

- Perturbations dues aux tolérances mécaniques
- Perturbations dues aux turbulences atmosphériques

Il est important de bien comprendre d'où proviennent les erreurs à détecter afin de pouvoir par la suite les estimer quantitativement. A noter que le système de guidage réalisé a pour mission de détecter et mesurer ces perturbations en observant le déplacement d'une étoile guide.

Pour un télescope de relativement faible diamètre, la diffraction engendrée par le diamètre d'entrée du télescope est conséquente et non-négligeable sur l'image. Cependant ceci n'est pas à proprement parler une perturbation, c'est en réalité la limite intrinsèque du pouvoir de résolution du télescope.

4.2.1 Limite de diffraction

Les télescopes ont tous un diamètre fini, et donc forcément le phénomène de diffraction est présent. Plus le diamètre du télescope sera petit, plus l'effet de diffraction, principalement les taches de Airy dans le cas des télescopes, sera présent. Un grand diamètre de télescope permet donc de diminuer ces phénomènes de diffraction, et donc d'augmenter la résolution du télescope.

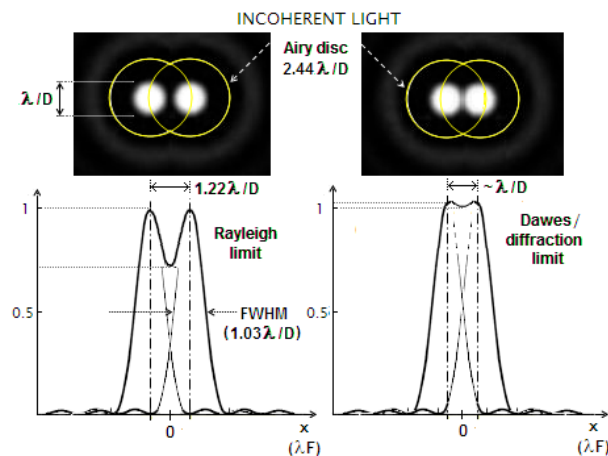


Figure 1 : effet de la diffraction sur la résolution d'un télescope

Ce phénomène est la cause principale de la limite du pouvoir de résolution d'un télescope. L'angle du premier anneau sombre, qui définit alors approximativement le diamètre angulaire du spot central est donné en fonction de la longueur d'onde de la lumière (λ) et du diamètre du télescope (D) par

$$\sin(\theta) = 1.22 * \frac{\lambda}{D}$$

Rapporter à une distance linéique, la limite de diffraction d'un télescope s'exprime alors, pour de petits angles,

$$r_a = 1.22 * f * \frac{\lambda}{D}$$

Où f est la focale du télescope.

On soulignera que **plus le diamètre (D) du télescope est grand, plus la limite théorique de diffraction est faible**. Il est donc inutile que la résolution d'un capteur au plan focal du télescope soit supérieure à cette limite. Cette limite ne peut bien évidemment pas être modifiée autrement qu'en agrandissant le diamètre du télescope.

4.2.2 Perturbations dues aux tolérances mécaniques

Tout instrument moderne d'observation astronomique est motorisé. Le système d'entraînement implique des tolérances mécaniques qui peuvent être gênantes lors de longues poses pour la photographie astronomique. Typiquement, dans une monture équatoriale, un axe est orienté dans l'axe de la terre (Nord-Sud), et tourne à l'opposé du sens de rotation de la terre afin d'annuler ce dernier. Lors de la rotation du système, une faible tolérance, pouvant être interprétée comme une simple erreur, va modifier la vitesse de rotation et l'on annulera plus de manière optimale la rotation de la terre. Ainsi, l'image observée lors d'une longue pause aura une « trainée ».

Les principales erreurs proviennent donc du système d'entraînement des axes du télescope. L'entraînement des axes est généralement réalisé avec un système d'entraînement roue et vis sans fin. Une erreur sur un des éléments de ce système (tolérance de concentricité, de rectitude du filet, etc.) sera donc répétée périodiquement lors de la rotation de l'élément. On peut donc obtenir, selon le nombre d'élément en rotation, plusieurs composantes périodiques de période et d'amplitude différentes. Toutes ces composantes peuvent être aperçues lors de la longue pose d'une photographie astronomique.

Considérons une monture équatoriale, le premier axe sera réglé parallèlement à l'axe de la terre, appelé axe polaire, sera motorisé afin de compenser la rotation de la terre. La vitesse de rotation de ce dernier sera alors de 1 tour par 24 heures. Le second, l'axe de déclinaison, sera lui réglé afin d'observer l'astre voulu, il reste fixe. L'étoile évoluant d'Est à l'Ouest (RA, ascension droite de l'étoile), l'erreur perçue sera donc d'Est en Ouest, soit dans le sens de rotation de l'axe polaire.

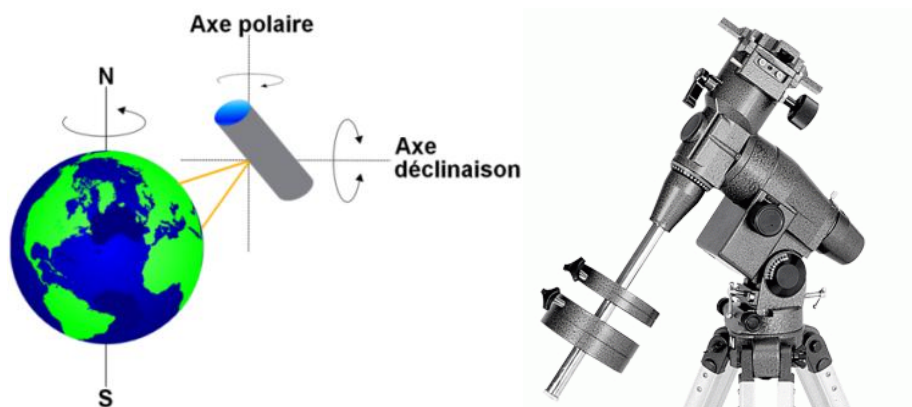


Figure 2: schématique et photo d'une monture équatoriale

En supposant que l'axe polaire de la monture soit parfaitement parallèle à l'axe polaire de la terre, et que l'on observe une étoile durant un certain temps, nous aurons une erreur de ce type pour une longue pose.

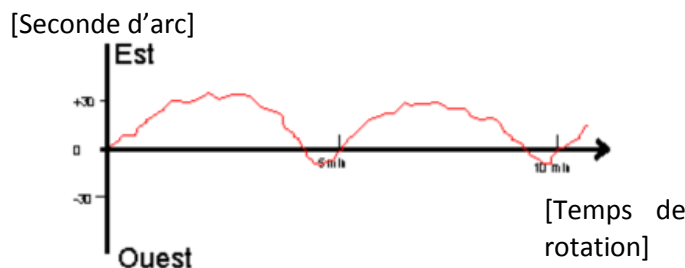
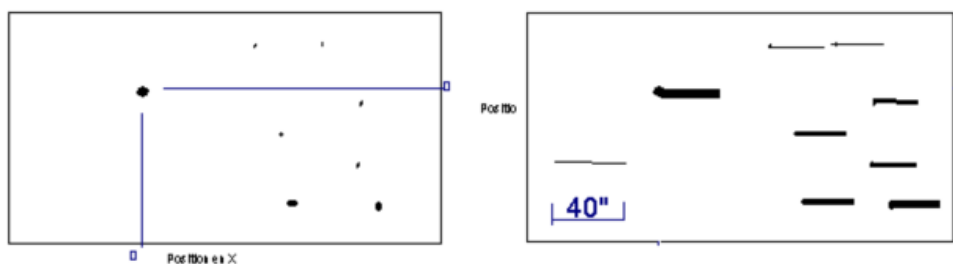


Figure 3 : exemple d'erreur périodique relevée sur une monture équatoriale

Le résultat sur l'image sera donc comme présenté ci-dessous.

Figure 4 : à gauche : image de départ $t=0$ s, à droite : image après 5min

Les traînées présentes sur la figure de droite font en réalité des « aller-retour », correspondant aux erreurs périodiques. Si, de plus, l'axe polaire du télescope n'est pas correctement parallèle avec l'axe polaire de la terre, on obtiendra une dérive de l'étoile (DEC, déclinaison de l'étoile), le résultat périodique est alors bien plus visible. Dans l'image ci-contre, la composition des 2 erreurs génère une traînée sinusoïdale.

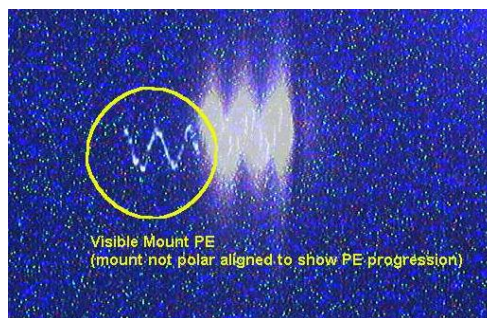


Figure 5 : erreur périodique dû au mauvais alignement de l'axe polaire et aux engrenages du télescope

Les perturbations mécaniques les plus importantes sont les basses fréquences, inférieures à 1 Hz.

4.2.3 Perturbations dues aux turbulences atmosphériques

L'ensemble des effets causés par les perturbations dues aux turbulences atmosphériques est appelé plus communément *seeing*. Les turbulences créent en réalité un indice de réfraction non homogène dans les différentes atmosphères que traverse la lumière provenant en particulier des astres célestes. Ce changement d'indice fait varier les ondes électromagnétiques en amplitude et en phase. La lumière est alors déviée par les atmosphères. Ces variations sont visibles à l'œil nu, notamment en constatant la variation de l'intensité lumineuse et la netteté d'une image formée après focalisation des fronts d'ondes (typiquement focalisation par l'œil des fronts d'ondes d'une étoile, on y voit le scintillement d'une étoile floue).

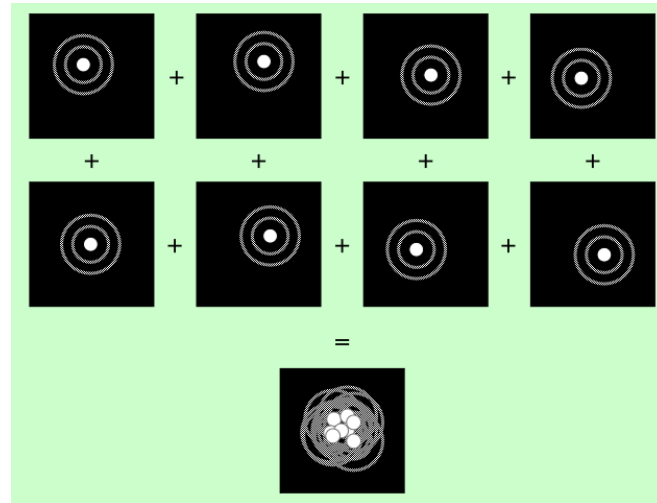


Figure 6 : effet du seeing sur le plan focal au fil du temps

Le seeing observé par un télescope terrestre est provoqué par 3 causes principales, chacune se trouvant dans une zone différente de l'atmosphère traversée par la lumière :

- La turbulence dans la haute atmosphère, à environ 12km d'altitude, cette couche est la cause principale de l'effet scintillant des astres observés.
- La turbulence dans la frontière de la couche atmosphérique, située entre 30 et 500 m
- La turbulence dans la couche se trouvant approximativement à la surface de la terre entre, 30 et 50m, et celle générée par les structures terrestres elles-mêmes, en particulier les structures des grands télescopes

Quantification du seeing

La quantification du seeing dépend de la durée d'exposition, en pratique, on admet pour un grand télescope une durée d'exposition de 10 à 30 secondes. Dès lors, la superposition des images avec le seeing va créer sur l'image un flou global. On peut quantifier le seeing de différentes manières :

- **selon le paramètre de Fried (r_0).**
Ce paramètre représente le degré de la turbulence. C'est une dimension à l'entrée du télescope qui mesure la distance horizontale typique sur laquelle l'onde incidente, provenant de l'étoile et déformée par les turbulences, reste juste assez longtemps en phase pour que son image ne soit limitée que par la diffraction du télescope. Pour des longueurs d'onde visibles, cette longueur se situe entre 5 et 30 cm.
- **selon le rapport de Strehl.**
Le rapport de Strehl peut être défini comme suit : « Rapport entre le pic d'intensité observé sur le plan de détection d'un télescope ou d'une autre source d'image et le pic théorique d'intensité maximum pour un système d'imagerie parfait travaillant à la limite de diffraction ».
- **selon le FWHM de la PSF obtenue de l'image d'une étoile.**

L'angle FWHM pour un télescope de grand diamètre ($D \gg r_0$) vaut

$$\theta = 2.013 * 10^5 * \frac{\lambda}{r_0} [\text{arcsec}]$$

λ est la longueur d'onde de la lumière.

- **selon le diamètre comprenant le 80% de l'énergie totale de la lumière reçue.**
pour un télescope de grand diamètre ($D \gg r_0$), de diamètre vaut

$$\varnothing_{80} = 3.812 * 10^5 * \frac{\lambda}{r_0} [m]$$

On peut aisément se rendre compte de l'effet du seeing grâce aux graphiques suivants. Ils représentent la PSF de l'image d'une étoile. Le premier graphe est obtenu de manière théorique pour un télescope de 8 m de diamètre avec une diffraction limitée parfaite, et dans le vide. Nous n'avons donc pas l'effet du seeing. Le second graphe est pour le même télescope dans une atmosphère avec un paramètre de Fried valant $r_0 = 0.25$ m à une longueur d'onde de 500nm. Le résultat de la FWHM est de 0.8 arcsec, de manière approximative. En calculant selon la formule, on obtient pour $D \gg r_0$ le demi-angle $\theta = 2.013 * 10^5 * \frac{500 * 10^{-9}}{0.25} \cong 0.4 [arcsec]$. Le résultat calculé correspond au demi-angle, d'où le facteur 2.

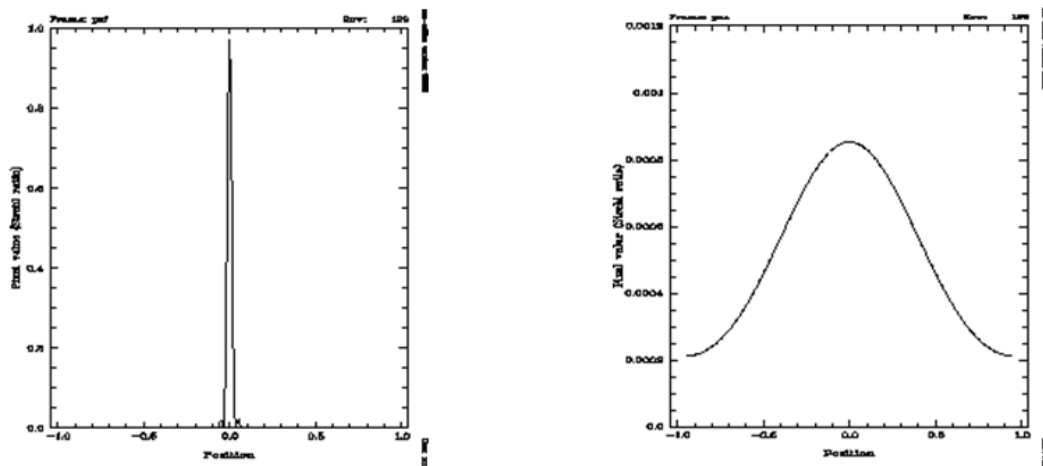


Figure 7 : à gauche : PSF pour un télescope dans le vide, à droite : PSF pour un télescope réel, avec seeing

L'axe y représente le rapport de Strehl, en x la position [arcsec].

On constate tout premièrement que la résolution de l'image est nettement diminuée si le seeing est élevé. En effet, le pouvoir de séparation sera plus faible. Par exemple, si deux étoiles sont trop proches, l'effet du seeing sur chacune se superposent et ne formera qu'une étoile flou (similaire au phénomène de diffraction, voir figure 1). **Selon le paramètre de Fried, on peut conclure que plus le diamètre du télescope est petit ou proche de ce paramètre, plus l'effet des perturbations atmosphériques sera diminué.**

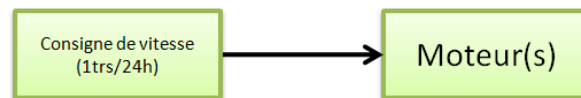
On soulignera que l'effet de la diffraction est très faible par rapport au seeing, car le diamètre du télescope est grand. Cependant, les télescopes amateurs de petit diamètre ont pour effet une augmentation de l'effet de diffraction et une diminution de l'effet du seeing.

4.3 Principe général de détection et de correction des perturbations

En astronomie amateur, les télescopes sont utilisés à 2 fins différentes, n'exigeant pas la même qualité de guidage et de correction :

- l'observation astronomique en visuel

Une simple correction de la rotation de la terre suffit. Les télescopes « GoTo » permettent de suivre l'étoile par calcul automatique de sa trajectoire. Lors d'une observation visuelle (par webcam ou à l'œil), ce suivi suffit et permet à l'étoile de rester dans le champ de vue lors d'une d'observation. **La régulation en boucle ouverte est alors suffisante.**

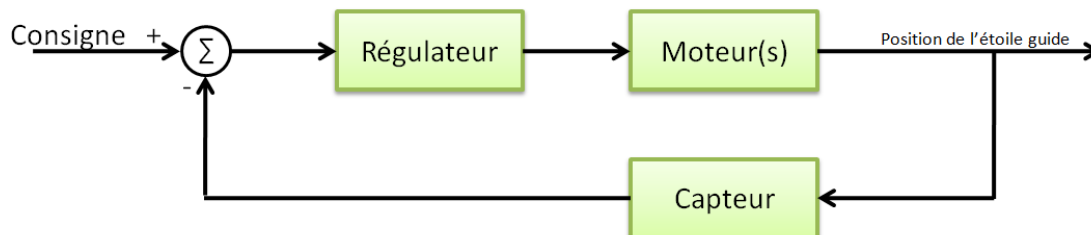


- la photographie astronomique

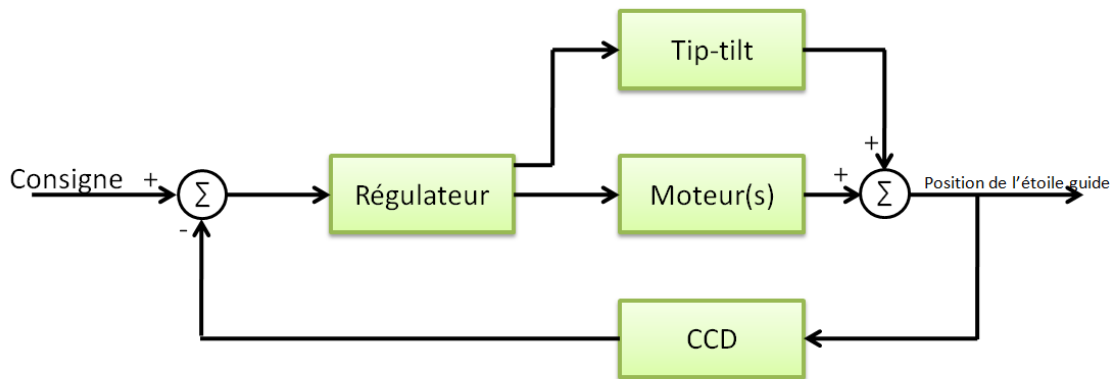
La correction fine des perturbations est très importante et doit être excellente car les images sont à long temps de pause et seront superposées afin d'obtenir l'image finale. Chaque image contient une partie de la bande passante de la lumière visible, grâce à des filtres. **Une régulation en boucle fermée est nécessaire.**

Pour la régulation en photographie astronomique, différents principes sont utilisés et représentés ci-dessous schématiquement :

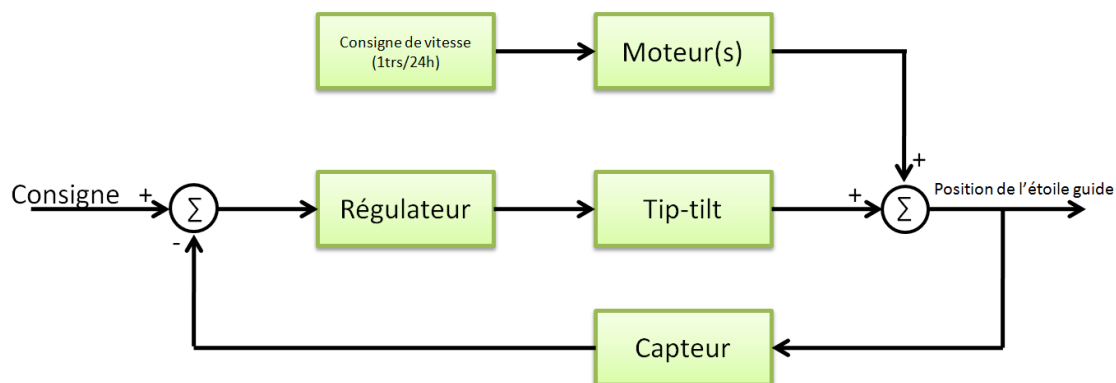
- 1) Détection des erreurs générées par la **rotation de la terre et des perturbations** par une CCD ou un capteur approprié, correction par **action sur les moteurs** des axes du télescope. A cause de l'inertie de la monture, cette régulation en boucle fermée n'est pas rapide et rend difficile la correction des perturbations atmosphériques.



- 2) Détection de la rotation de la terre et des perturbations par une CCD, correction en boucle fermée. Une double correction agissant sur les moteurs et un système tip-tilt est alors effectuée. Le régulateur assure la distribution de cette double correction (grosses corrections par les moteurs, fines corrections par le tip-tilt).



- 3) Corrections de la rotation de la terre en boucle ouverte. Détection des erreurs générées par les **perturbations** par un capteur approprié. La correction en boucle ouverte de la rotation de la terre **génère elle aussi des erreurs détectées par le capteur** (tolérances mécaniques). Une double correction est alors faite, la première sur **les moteurs des axes du télescopes** (suivi théorique de l'étoile, boucle ouverte), et la seconde **par un tip-tilt** (correction des erreurs détectées, boucle fermée). Cette régulation permet de corriger avec rapidité les perturbations atmosphériques et les tolérances mécaniques de l'engrenage grâce au tip-tilt, pouvant travailler avec des fréquences de l'ordre de 10Hz. **C'est cette méthode que nous utiliserons pour la régulation du télescope de la HEIG-VD.**



4.4 Propriétés du mesurande

Afin de développer un système de mesure précis, il est important de bien connaître le mesurande. Dans le cas d'un *autoguideur*, il s'agit d'une étoile guide observée par un télescope, focalisée sur un capteur. L'objectif est de donc de mesurer l'erreur de position générée par les perturbations. Plusieurs propriétés du mesurande, ainsi que l'ordre de grandeur de l'erreur de position sont donc nécessaires au choix du capteur.

4.4.1 Taille de l'étoile guide

L'étoile est un point à l'infini, sa taille peut être définie par son FWHM. Comme vu précédemment, le FWHM d'une étoile dépend du diamètre d'entrée du télescope, ainsi que du seeing au lieu d'observation. Le télescope sera monté sur le toit de l'école à Yverdon-les-Bains, il est donc judicieux de choisir cet endroit comme lieu d'observation pour estimer le paramètre de seeing. Aussi, les dimensions optiques et géométriques du télescope utilisé seront utilisées comme références.

Pour un lieu d'observation comme Yverdon, les astronomes amateurs s'accordent pour donner un seeing de l'ordre de 6". Le système développé doit diminuer ce seeing, et donc réduire la taille de l'étoile qui aurait sans système de correction un FWHM de 6". **La taille de l'étoile corrigée se retrouvera alors diminuée.** Il est évident que toutes les perturbations atmosphériques ne pourront pas être corrigées par le système. On peut espérer tout de même corriger les perturbations inférieures à 10Hz. On peut estimer la taille typique de l'étoile (FWHM) à **3 secondes d'arc** environ (correspond à une amélioration du seeing d'un facteur 2). A rappeler que dans tout les cas, la taille équivalente sur le capteur pourra être augmentée si nécessaire, par exemple en défocalisant légèrement l'image sur le capteur. La taille des étoiles étant extrêmement variable, ceci n'est qu'un ordre de grandeur.

Avec la focale du LX200 12" (focale = 3.048 m), on a donc une taille d'étoile sur le capteur de

$$d = \alpha * f = \frac{3}{60 * 60} * \frac{\pi}{180} * f = \frac{3}{60 * 60} * \frac{\pi}{180} * 3.048 * 10^6 = \mathbf{44.3 \mu m}$$

On rappellera tout de même qu'il est possible de modifier la focale du télescope par des lentilles de Barlow, la taille de l'étoile est alors proportionnelle à la focale. Sa taille maximum pourrait alors être supérieure jusqu'à un facteur 5 environ (au maximum), soit **221.5 μm** .

4.4.2 Puissance lumineuse de l'étoile guide

La puissance lumineuse transmise par l'étoile est importante. La magnitude apparente d'une étoile est une mesure permettant de quantifier la puissance de rayonnement électromagnétique par unité de surface. Cette échelle est une échelle logarithmique inverse, l'étoile paraîtra plus brillante si la magnitude est faible (par ex. : magnitude apparente du soleil : -26.73). L'éclairement d'un objet céleste E_2 est donné par

$$m_1 - m_2 = 2.5 * \log_{10} \left(\frac{E_2}{E_1} \right)$$

Où

- E_1 est l'éclairement d'un objet céleste de référence (Soleil)
- E_2 est l'éclairement d'un second objet céleste
- m_1 est la magnitude recherchée de l'objet céleste

- m_2 est la magnitude d'un objet céleste de référence (Soleil)

Et donc

$$E_2 = E_1 * 10^{\frac{m_1 - m_2}{2.5}} [W/m^2]$$

En fixant la référence au Soleil, on a $E_1 = 1350 W/m^2$ et $m_1 = -26.73$.

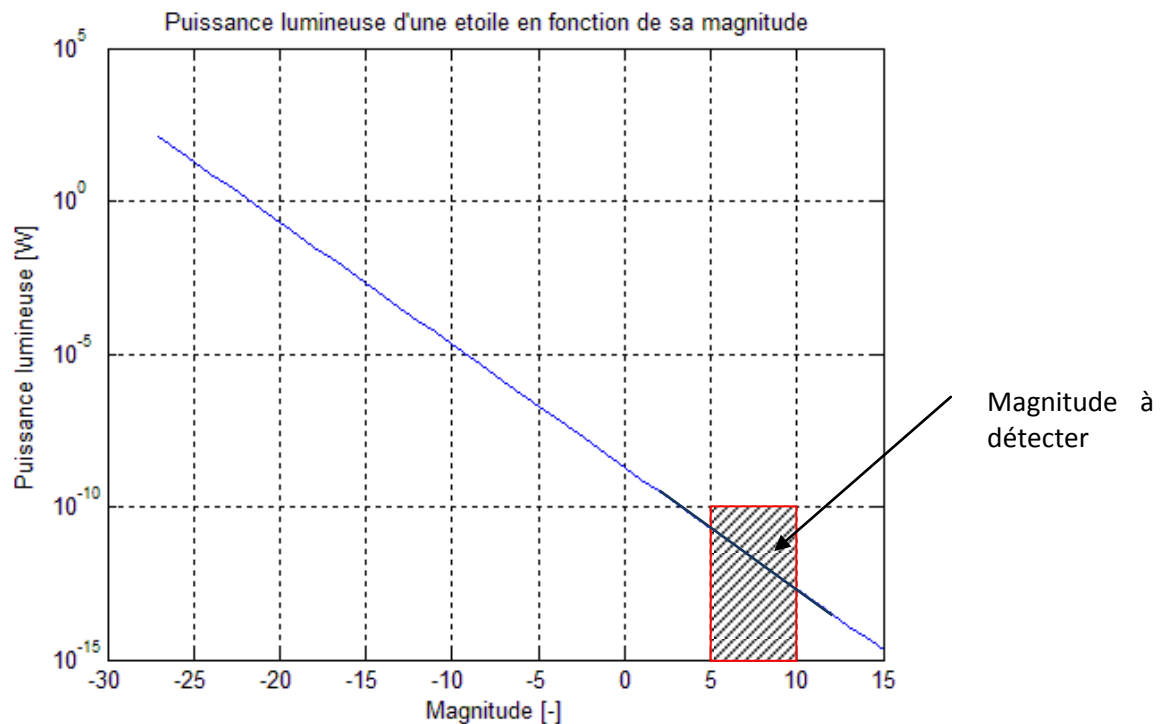
D'où

$$E_2 = 1350 * 10^{\frac{-26.73 - m_2}{2.5}} [W/m^2]$$

Connaissant la valeur de la magnitude m_2 d'une étoile, on connaît alors son éclairement E_2 . La puissance lumineuse vaut alors, pour un diamètre de télescope D :

$$P = E_2 * \pi * \frac{D^2}{4} = \frac{1350 * \pi * D^2}{4} * 10^{\frac{-26.73 - m_2}{2.5}} [W]$$

Le graphique¹ suivant permet de mieux se représenter la puissance lumineuse :



Une étoile de magnitude 5 a une puissance lumineuse de 20pW, pour une magnitude de 8, elle a 1.26pW. On remarquera que pour des étoiles de grandes magnitudes, la puissance émise est très faible et nécessitent alors des capteurs optiques très sensibles. L'objectif de la magnitude à détecter se trouve relativement haut par rapport à la zone de détection d'une CCD ordinaire (jusqu'à une magnitude 5). Cette zone est un critère de détection permettant alors de détecter des étoiles guides plus faibles. **Cet objectif nous informe sur la nécessité d'envisager un concept autre que le suivi par un capteur CCD.**

¹ Code Matlab annexe 1

4.4.3 Erreurs de positionnement de l'étoile guide

Comme précité dans le chapitre concernant les perturbations subies par un télescope, l'étoile va « bouger », un ordre de grandeur du déplacement est nécessaire au choix d'un capteur. Le suivi grossier étant réalisé par le télescope, l'annulation de la rotation de la terre n'est pas à prendre en compte si la mise en station du télescope est bien réalisée, on se focalisera plutôt sur les perturbations de la mécanique de l'engrenage et certaines composantes fréquentielles du seeing.

Fréquence maximum des perturbations

Le système de correction réalisé (tip-tilt) ne permettra pas une correction supérieure à **10 Hz**, que l'on considérera comme la fréquence maximum des perturbations à prendre en compte.

Ordre de grandeur des perturbations

Les perturbations périodiques de l'engrenage sont corrigées en partie par le système PEC du télescope. Ce système enregistre les erreurs sur un tour complet de la monture et les corrige en boucle ouverte lors du guidage. Cela permet de réduire les erreurs mécaniques de manière significative, d'environ 30" pic à pic à 10" pic à pic pour un télescope Meade LX200. (Valeurs approximatives)

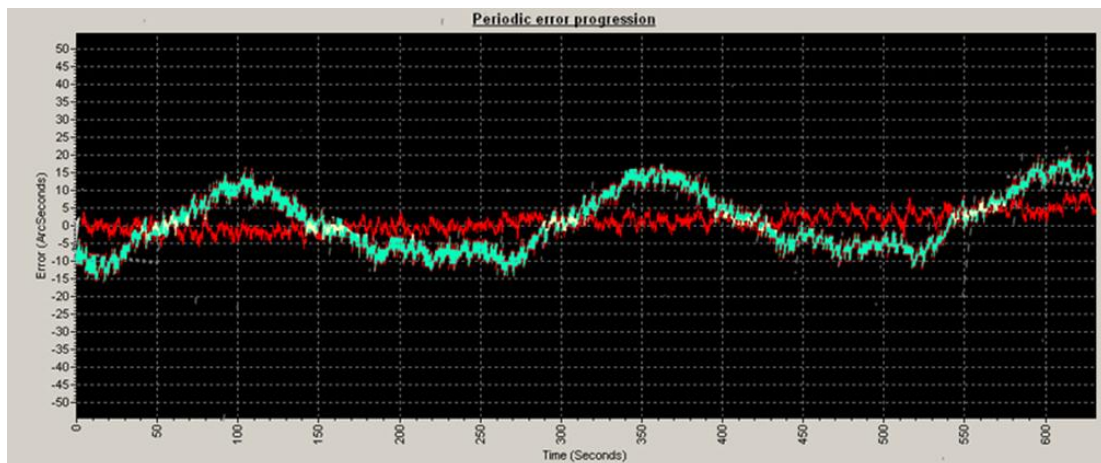


Figure 9 : erreurs périodiques avec PEC (rouge) et sans PEC (vert), mesurées sur un LX200 12"

La variation attendue approximative de l'étoile guide sera alors approximativement **10 secondes d'arc**. Sur le capteur, ceci représente une distance de

$$\Delta_{\text{étoile}} = \frac{10}{60 * 60} * \frac{\pi}{180} * f = \frac{10}{60 * 60} * \frac{\pi}{180} * 3.048 * 10^6 = 147.7 \mu m$$

Nous supposons alors que le déplacement de l'étoile sur le capteur est d'environ **150 μm** pour une focale de 3.048m.

Résumé

Le FWHM de l'étoile au capteur et le Δ_étoile ont été calculés pour la focale du télescope.

puissance (magn.= 5)[pW]	puissance (magn.=8)[pW]	f_max [Hz]	FWHM étoile [arcsec]	FWHM étoile au capteur [μm]	Δ_étoile [μm]
20	1.26	10	3	44.3	150

Tableau 1 : résumé des propriétés du mesurande

4.5 Etat de l'art des systèmes de détection

En photographie astronomique amateur, la majorité, si ce n'est tous, utilise le suivi par webcam ou CCD avec une correction sur les moteurs. D'une part pour la simplicité mais aussi d'un point de vue financier (webcam CCD bas de gamme pour l'astronomie à partir de 80 EUR). D'autres systèmes encore plus performants ont été développés pour les grands télescopes destinés à la recherche.

De manière générale, le système optique de suivi (*autoguideur*) est séparé du système optique d'imagerie. Trois solutions différentes ont été adoptées.

Guidage avec une lunette ou un petit télescope en parallèle

L'instrument de guidage est monté solidairement sur la monture du télescope destiné à l'imagerie, mais est destiné uniquement au suivi. Le capteur optique se fixe sur le télescope auxiliaire. Le grand désavantage de cette méthode est le porte-à-faux généré par le second télescope, ainsi que son encombrement dans les mouvements du télescope (plus rapidement en butée).

Déviation par un « beam splitter »

Une partie de la lumière allant au système d'imagerie est déviée par un « beam splitter » sur le capteur optique du système de suivi. Une partie de la lumière est alors prélevée. Ce système est moins encombrant, souvent utilisé pour l'astronomie professionnelle.

CCD double, imagerie et autoguidage simultanés

Ces dispositifs sont constitués de 2 CCD. Cela permet d'en utiliser une pour l'imagerie, et une pour le guidage. Le chemin optique est modifié à l'intérieur du dispositif et les 2 CCD acquièrent la même image. Aucune adaptation n'est donc nécessaire pour l'autoguidage. Le prix de celles-ci est élevé, plus de 13'000 CHF.

La grande différence entre les différents systèmes de suivi se trouve principalement dans le choix du capteur optique. Plus il est sensible et précis, plus une étoile faible pourra être suivie avec précision. Ainsi, la nécessité d'avoir une étoile très lumineuse dans le champ de vue n'est plus obligatoire.

4.5.1 Webcam ou CCD

Pour le suivi des étoiles, les astronomes amateurs utilisent la webcam ou une CCD plus performante. On obtient ainsi une image pouvant être traitée numériquement par ordinateur. Les montures des télescopes d'aujourd'hui étant équipées de moteurs pouvant être pilotés via un ordinateur, un logiciel peut donc corriger certaines perturbations en agissant sur la vitesse fine des moteurs de la monture. Les perturbations dues aux tolérances mécaniques du télescope sont celles étant le mieux corrigées. Cette technique ne permet toutefois pas de corriger les faibles variations dues au seeing.

Lors du suivi d'une étoile guide, on peut calibrer le logiciel afin qu'il corrige au mieux les défauts de la vis sans fin de la motorisation, lors du suivi de l'étoile, en agissant sur la motorisation pilotée du moteur. Le logiciel suit l'étoile de manière théorique, en prenant en compte la vitesse de rotation de la terre, puis, il mesure l'erreur de la trajectoire de l'étoile, qui ne devrait pas bouger si la monture n'avait aucun défaut. Ainsi, il peut déterminer les erreurs périodiques qui seront présentes à chaque



Figure 10 : guidage avec lunette en parallèle

tour de vis sans fin. Connaissant ces erreurs périodiques, il peut alors corriger le suivi de l'étoile en minimisant ces erreurs.

Des logiciels gratuits peuvent être téléchargés (par ex. PHD Guiding). Ce moyen de correction est très utilisé pour les télescopes amateurs car peu onéreux (une webcam suffit). De plus, le suivi de l'étoile est nettement amélioré.



Figure 11 : à gauche : image avec correction (autoguidage), à droite : image sans correction

Les webcams utilisées en photographie astronomique sont principalement constituées de capteurs CCD. Les webcams à moindres coûts, dotées d'un capteur CMOS, sont généralement mises de côté car la qualité est relativement médiocre par rapport aux webcams CCD.

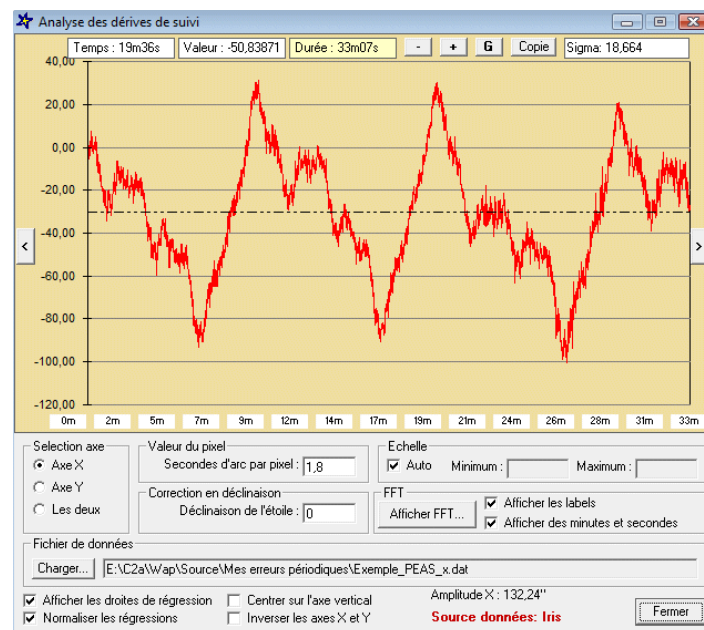


Figure 12 : mesure des erreurs périodiques de la transmission lors du suivi d'une étoile

4.5.2 Système à photomultiplicateur à 4 anodes

Ce principe consiste à centrer un capteur photomultiplicateur à 4 anodes sur une étoile guide. L'énergie lumineuse reçue sur chaque anode génère un courant. La répartition de ces derniers permet alors de déterminer le centrage de l'étoile. La répartition est mesurée sur 2 axes, à savoir RA (Right Ascension) et DEC (DEClination). Ce principe a été développé pour le télescope Schmidt de l'université de Cambridge, en 1976.

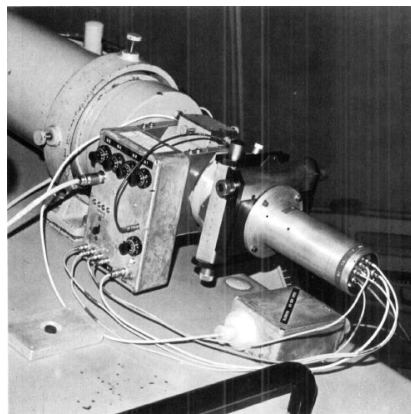
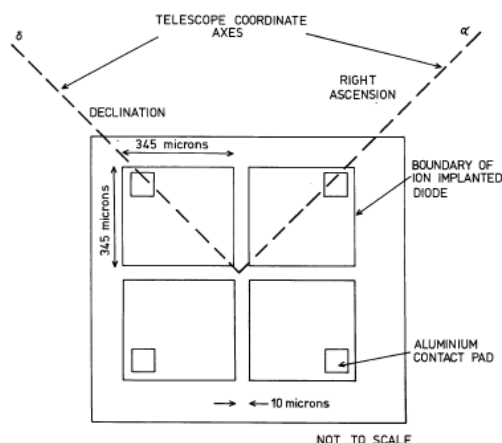


Figure 13 : schématique d'un photomultiplicateur à 4 anodes et montage sur le télescope auxiliaire

Comme montré ci-dessus, le capteur était monté sur un télescope auxiliaire de guidage. Une électronique permettait de mesurer l'erreur de l'étoile guide, et de **la corriger en agissant sur les axes motorisés du télescope** par un simple régulateur pour chaque axe (RA et DEC, monture azimutale). Le centrage du capteur était réalisé manuellement avec une table xy micrométrique. Ce type de système de correction est utilisé principalement pour les télescopes destinés à la recherche, car la sensibilité du capteur est très élevée, tout comme son prix.

4.5.3 Système à photodiode 4 cadrans (professionnel)

Le principe est identique à au photomultiplicateur à 4 anodes, à la différence du capteur utilisé. L'utilisation d'un capteur photodiode à 4 cadrans permet une simplification de l'électronique de mesure, et un gain de poids et de place. Les photodiodes sont parmi les détecteurs les plus sensibles et permettent alors de suivre des étoiles guides de relativement haute magnitude. De plus, elles existent en photodiode à avalanche, permettant alors un grand gain et une nette amélioration du rapport signal sur bruit. Ce type de système de correction est aussi utilisé principalement pour les télescopes destinés à la recherche.

4.6 Système de correction

Afin d'améliorer les performances de correction de l'image, un système tip-tilt est parfois utilisé pour les perturbations atmosphériques en astronomie amateur. Ce genre de système n'est pas utilisé en astronomie professionnel, où l'optique adaptative est bien plus répandue.

Ce système permet d'effectuer de faibles corrections en faisant dévier les rayons lumineux de manière très précises au moyen d'un miroir ou d'une lame de verre montée sur un tip-tilt motorisé. La correction est limitée à quelques secondes d'arc, c'est pourquoi les erreurs supérieures sont corrigées par une action sur les moteurs. De même, les erreurs à « hautes fréquences » (1 à 10Hz) sont corrigées avec le tip-tilt alors que les basses fréquences ($<1\text{Hz}$) sont corrigées par les moteurs de la monture.

Le système du tip-tilt à lame de verre utilise le principe de la réfraction. Selon l'inclinaison, le rayon lumineux est plus ou moins dévié dans le verre. En sortant de la lame de verre, le rayon restera parallèle, mais il en résultera un décalage. La focalisation sera alors déplacée dans le plan focal. La déviation du rayon lumineux étant très faible selon son inclinaison, une excellente précision est atteinte sans avoir à assurer une grande précision de l'inclinaison de la lame de verre. Il est à souligner que le plan focal est aussi déplacé de peu.

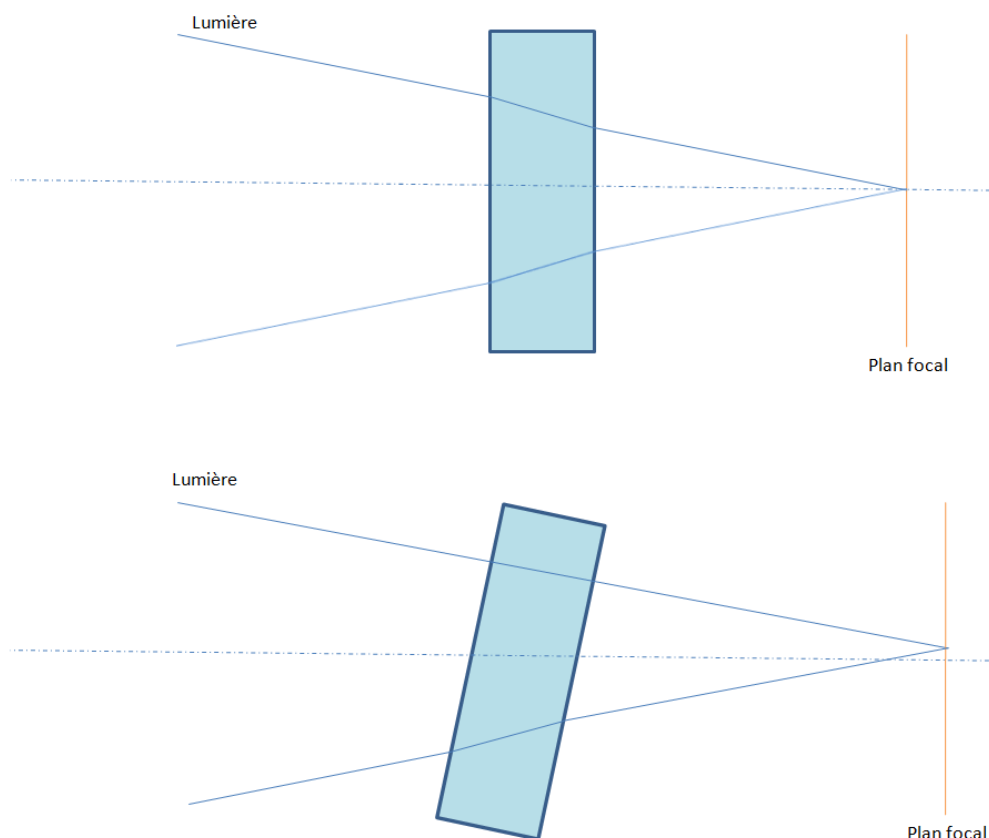


Figure 14 : principe d'un tip-tilt

Le système développé de détection sera complété par ce système de correction tip-tilt, réalisé dans le cadre du travail de diplôme de David Gloor.

5 Télescope Meade LX200 de la HEIG-VD

La HEIG-VD a un télescope Meade LX200 12". Ce dernier a une focale de 3048 mm. Il sera installé sur le toit de l'école dans un observatoire géré entièrement de manière informatique. Ceci permettra d'utiliser le télescope depuis chez soi, par le biais d'une connexion Internet. L'observatoire est réalisé dans le cadre d'un projet de diplôme d'un étudiant TIN, M. Marc Laurent.

Ce télescope permet de bonne observation de par son large diamètre et sa focale élevée. Cependant, un plus grand diamètre implique une plus grande sensibilité aux perturbations atmosphériques, d'où la nécessité d'un autoguidage sensible et performant. Le télescope peut soit être monté sur une monture alt-azimutale ou sur une équatoriale. Après réflexion avec les 2 autres diplômants travaillant sur le télescope, nous avons décidé de le monter sur sa monture équatoriale. Un seul axe moteur est alors entraîné au lieu de 2, ce qui réduit les perturbations relatives aux engrenages.



Figure 15 : télescope Meade

Ce télescope est doté de la fonction GoTo permettant, après la mise en station, de sélectionner un objet céleste dans la base de données du télescope afin que le télescope pointe automatiquement sur l'objet sélectionné. Le suivi théorique de l'objet est aussi assuré. Ce télescope a aussi le système PEC (Periodic Error Correction) qui corrige en boucle ouverte les défauts de l'engrenage du télescope. Lors du calibrage de cette fonction, un objet céleste est suivi par le télescope et une légère correction manuelle est effectuée pour centrer sans cesse l'objet dans un réticule de visée. Ces corrections sont enregistrées selon la position des moteurs et lors du suivi automatique, les moteurs s'auto-corrigent selon la correction mise en mémoire lors du calibrage. Cette fonction permet de diminuer de manière significative les perturbations générées par les engrenages des moteurs. Des erreurs de l'ordre de 30" sont atténuées d'un facteur 3 environ !

Il est déjà équipé d'une CCD SBIG ST 402. La taille du capteur CCD (765x510 pixels) est de 6,9*4.6 mm. Cette CCD est spécialement prévue pour l'imagerie. De plus, elle est équipée d'une roue à filtre interne (3 filtres de couleur + 1 obstruction permettant une prise de Dark).



Figure 16 : caméra CCD SBIG ST402

6 Conception générale du système

6.1 Principe de mesure

Un beamsplitter (séparateur de faisceau), dévie une partie de la lumière reçue selon une certaine proportion sur le capteur. Le capteur doit alors être centré sur l'étoile guide choisie. Le beamsplitter à disposition est un beam splitter séparant le spectre visible du spectre dans l'infrarouge proche. Ainsi, le système d'imagerie reçoit la lumière visible et le capteur reçoit la lumière du proche infrarouge. Il est à souligner que les capteurs optiques en généraux sont plus sensibles dans le proche infrarouge, en particulier les photodiodes.

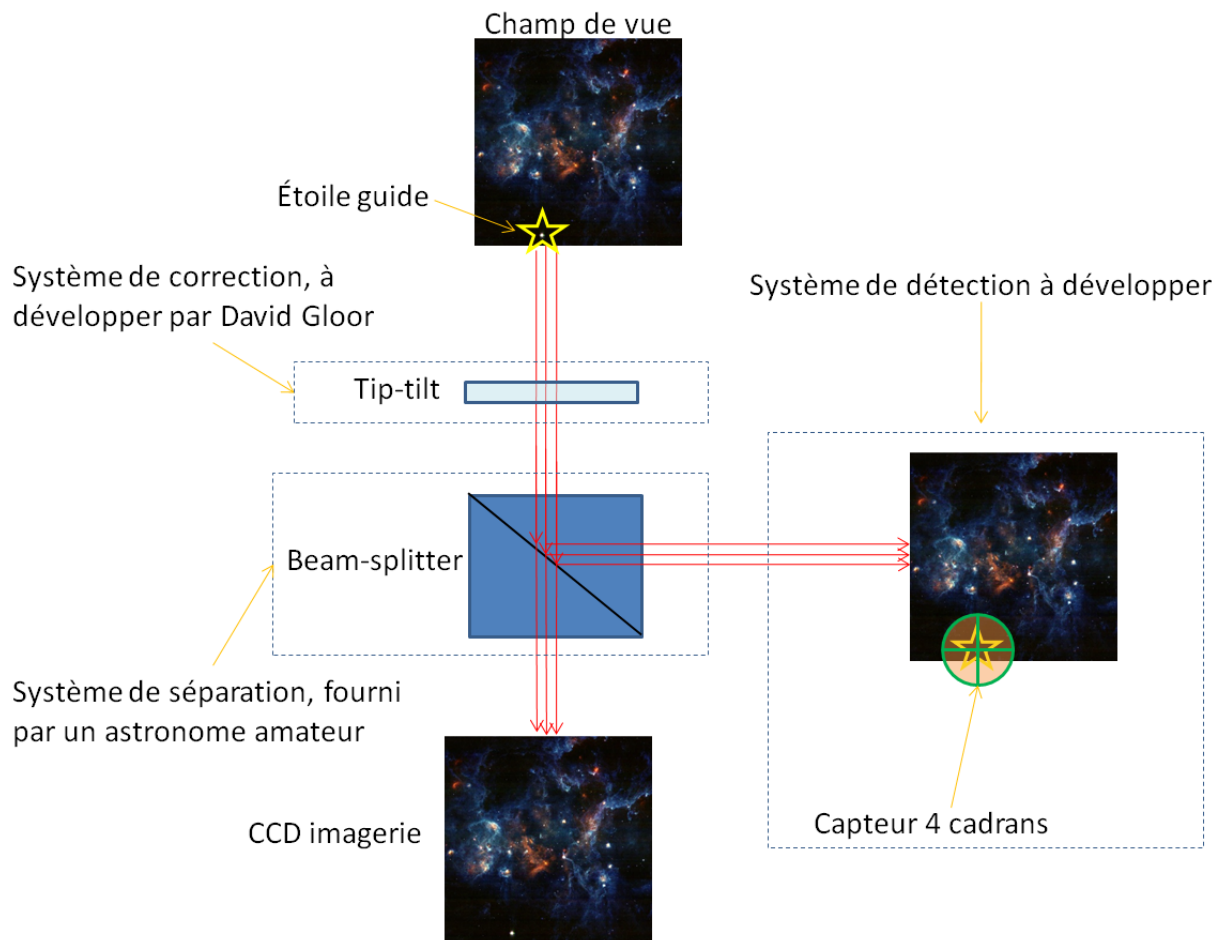


Figure 17 : schématique du principe de mesure

Le beam-splitter est dans notre cas obligatoire puisque la régulation est en boucle fermée, la correction effectuée par le tip-tilt sur le système d'imagerie doit être détectée par le capteur. Le tip-tilt doit donc être en amont du détecteur, et le détecteur en parallèle au système d'imagerie. Ceci ne serait pas possible si le capteur était monté sur un télescope en parallèle, car la correction effectuée par le tip-tilt n'aurait pas d'effet sur le champ de vue du capteur 4 cadrans.

L'autoguideur à développer doit donc permettre de :

- **Positionner et isoler l'étoile guide sur le capteur.**
- **Mesurer l'écart de position.**

L'image du champ de vue sur la schématique du principe de mesure relève un point important, plusieurs étoiles ou sources lumineuses se trouvent dans le champ de vue observé par le capteur. L'*autoguideur* doit alors **sélectionner et isoler l'étoile guide** sous peine d'être influencée par les autres étoiles se trouvant plus ou moins proches de l'étoile. Bien évidemment, l'étoile à choisir doit être le plus possible isolée des autres, mais ce cas n'est pas toujours satisfait. L'isolement de cette étoile est nécessaire dans le cas où le capteur a une taille qui couvre un champ bien supérieur à celui de l'étoile, ce qui peut être le cas pour un capteur 4 cadrans conventionnel de taille entre 1 et 15mm. Comme montré ci-dessous, une étoile pourrait se trouver dans le champ de vue du capteur.

De faibles pollutions lumineuses seront de toutes manières mesurées, mais ceci ne générera qu'un offset sur la mesure, étant donné que nous mesurerons l'erreur relative, cela est sans grande importance. Cependant une trop grande pollution lumineuse, comme une seconde étoile au bord du capteur, pourrait, avec les perturbations, sortir et entrer dans le champ de vue, ce qui générerait de grosses erreurs sur la mesure. Il serait utile de réduire le champ de vue par une méthode appropriée (trou, diaphragme, etc.), mais surtout l'utilisateur devra sélectionner une étoile appropriée sans étoile trop lumineuse à son environ.

Champ de vue du capteur 4 cadrans

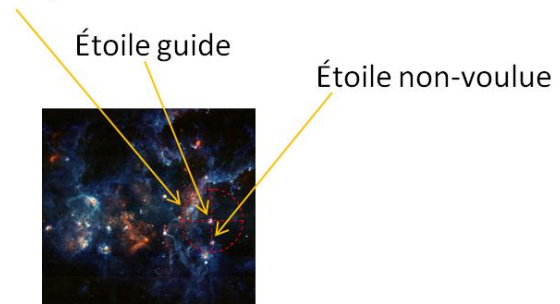


Figure 18 : champ de vue bien supérieur à la taille de l'étoile guide

Aussi, l'étoile guide doit se trouver à une distance raisonnable de l'objet observé. L'angle entre l'objet observé et l'étoile guide ne doit pas dépasser l'angle isoplanétique. Ce dernier correspond à un domaine angulaire pour lequel la lumière subit les mêmes perturbations atmosphériques (perturbations communes). Il est estimé à environ 1' à 2' d'arc, mais peut être très variable selon l'état du seeing. Il est à remarquer qu'en supposant que l'objet observé est centré dans le champ de vue, le capteur ne doit pas pouvoir forcément atteindre le bord du champ, puisqu'il sortirait du domaine isoplanétique.

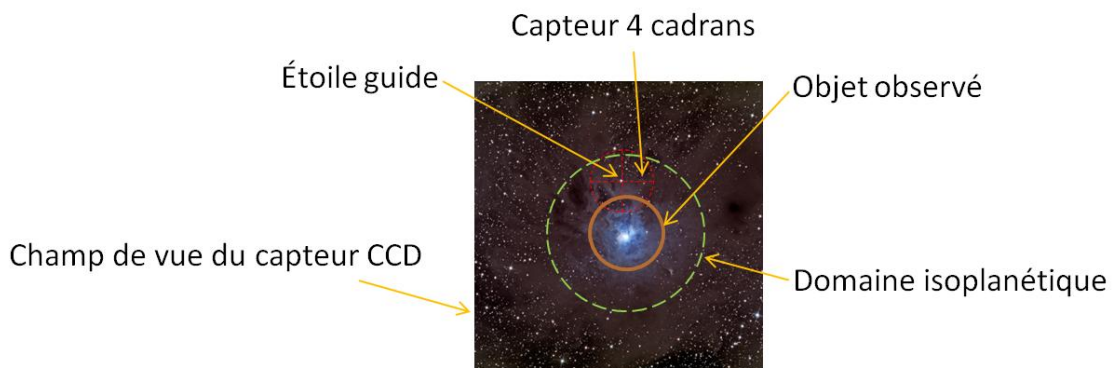


Figure 19 : étoile guide dans le domaine isoplanétique

6.2 Conditionnement du capteur

Les capteurs constitués de photodiodes peuvent être rendus bien plus performants si la température du capteur est maintenue à une basse température. Ce qui augmente de manière considérable le SNR en réduisant les bruits thermiques. **Une régulation de la température de l'environnement du capteur serait à prévoir.**

Afin de diminuer la température d'un module électronique, on utilise en général un système Peltier. Ce dernier utilise le principe thermoélectrique. En imposant un courant au module, un transfert de chaleur se crée, créant d'un côté du module une surface « froide » (absorption de chaleur) et de l'autre une surface « chaude » (libération de chaleur). La chaleur libérée doit évidemment être évacuée à l'extérieur via un ventilateur ou un échangeur approprié.



Figure 20 : système Peltier miniature

Afin de réguler la température, **un capteur de température est aussi nécessaire.**

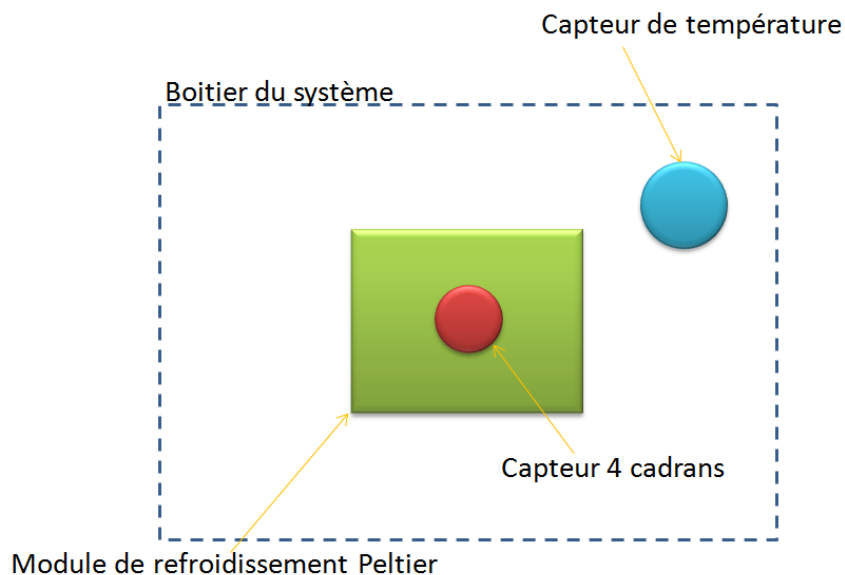


Figure 21 : schéma du conditionnement du capteur 4 cadrans

Certaines techniques permettent aussi d'améliorer le SNR d'une photodiode, notamment l'utilisation d'un « chopper » ou « lock-in ». L'idée est de traiter un signal optique haché, et donc d'amplifier ensuite et de traiter un signal résultant carré. Cette technique permet d'éliminer une très grande partie du bruit. Cependant, ceci pourrait représenter à lui seul un travail de diplôme. Il a donc été choisi de laisser une trace de cette idée, sans l'approfondir.

6.3 Centrage de l'étoile sur le capteur

Le centrage de l'étoile sur le capteur peut être fait de différentes manières.

Image mobile, capteur fixe

En déplaçant l'image de l'étoile, par le biais d'un miroir tip-tilt, sur le capteur (fixe).

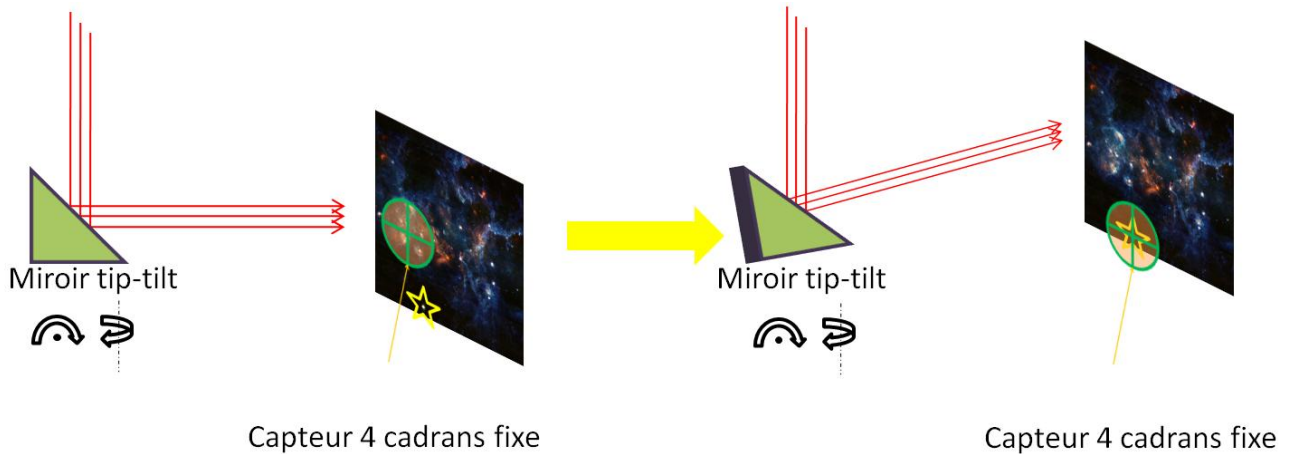


Figure 22 : image mobile, capteur fixe

Avantages :

- Capteur de mesure fixe
- («beauté du système ...»)

Inconvénients :

- Déplacement de l'image de manière non-linéaire pour une consigne (tip ou tilt) linéaire
- Déformation de l'image en fonction du déplacement de celle-ci (un spot rond deviendra un spot légèrement ovale)

Image fixe, capteur mobile

En centrant le capteur sur l'étoile par un système xy sur lequel est fixé le capteur.

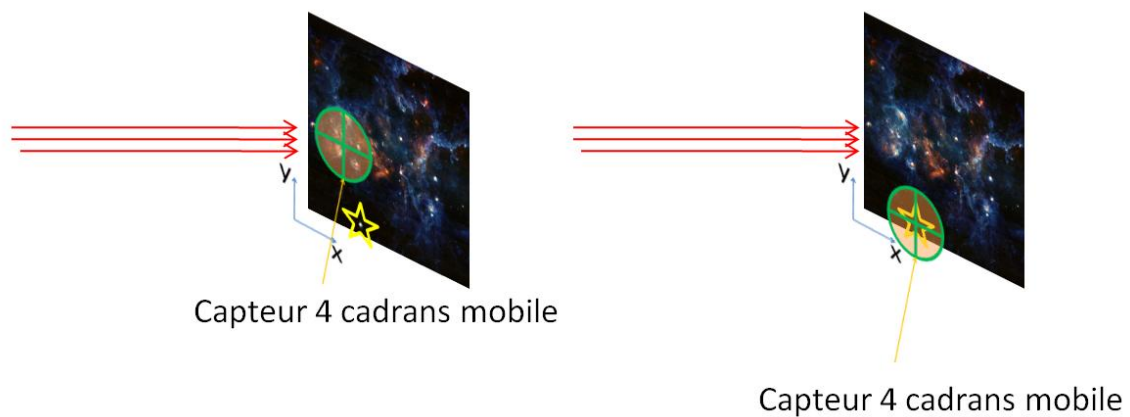


Figure 23 : image fixe, capteur mobile

Avantages :

- Déplacement du capteur sur l'image de manière linéaire pour une consigne linéaire
- Image fixe, non-déformée
- Système direct, sans modification du chemin optique

Inconvénients :

- Capteur mobile
- Charge à déplacer

Synthèse

Le principe semblant le plus simple et efficace est sans doute d'utiliser un capteur mobile sur une table xy motorisée. L'autre système a relativement beaucoup de désavantages et sa mise en œuvre est plus compliquée. Aussi, l'aspect non-linéaire du déplacement de l'image selon une consigne linéaire complique la commande. **Une table xy motorisée semble la solution la plus appropriée.**

6.4 Isolement de l'étoile

Afin d'isoler l'étoile guide, un trou ou encore un diaphragme réglable est envisageable. La taille de ce dernier doit prendre non seulement la taille de l'étoile, mais aussi les variations relatives de position de celle-ci. On peut estimer, selon les propriétés de la mesurande déterminées précédemment, un diamètre du trou entre 0.25 et 1mm de diamètre. On remarquera que comme cité précédemment, des perturbations lumineuses n'apporteraient qu'un offset et donc la taille du trou n'a pas besoin de grande précision.

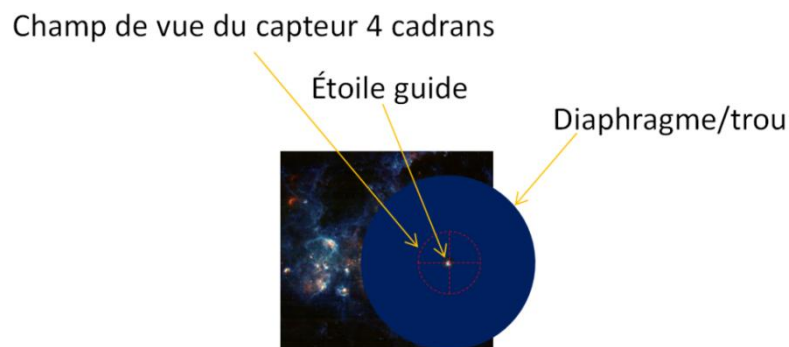


Figure 24 : isolement de l'étoile guide par trou/diaphragme

Différentes méthodes peuvent être employées pour isoler l'étoile:

Ouverture simple

Un simple trou dans un élément solide du capteur (capuchon) permettrait de sélectionner l'étoile.

Diaphragme

Un diaphragme serait envisageable, avec la possibilité d'un réglage motorisé. Cependant, la complexité du système se trouve augmenter considérablement.

Surface active du capteur

Si la surface active du capteur est suffisamment petite, alors aucun élément n'est nécessaire, la taille de la surface suffit à sélectionner l'étoile.

Synthèse

Tout d'abord, il est important de souligner que la taille d'une étoile guide ne varie pas de manière importante et que le trou ne doit pas être rigoureusement identique à la taille de l'étoile afin de mesurer l'erreur de position de cette dernière. Le trou devra alors **permettre un champ correspondant à l'étoile guide ainsi que qu'une marge permettant de mesurer son erreur de position** tant que l'erreur n'est pas corrigée. Un diaphragme serait probablement superflu de par sa complexité et le fait qu'il apporte une adaptation de la taille du trou qui n'est pas forcément nécessaire. **Un trou ayant un diamètre bien choisi doit pouvoir suffire pour la majorité des étoiles guides.** Le trou doit être positionné de manière concentrique au capteur 4 cadrans. On relèvera aussi que si l'on défocalise volontairement l'étoile, le trou devra être plus grand. **L'optimum est de trouver un capteur dont la surface active est petite, limitant ainsi le champ de vue et annulant la nécessité d'un trou.**

6.5 Choix d'un capteur optique

6.5.1 Critères de choix

Cette étape est très importante et demande d'étudier une palette de capteurs optiques afin de choisir celui le plus approprié pour détecter des étoiles guides de faible intensité. Selon les propriétés du mesurande, certains capteurs se révéleront plus adéquats que d'autres. Un choix final du capteur selon des critères est réalisé à la fin de ce chapitre. Les capteurs présentés ci-dessous ne sont pas une liste exhaustive des capteurs optiques, mais plutôt les capteurs optiques semblant les plus appropriés à l'autoguideur.

Ils sont généralement caractérisés par différentes propriétés, certaines étant plus importantes que d'autres selon les situations et le contexte de mesure. Les propriétés suivantes sont importantes dans notre cas :

- **Sensibilité**

De façon générale, la sensibilité est définie, autour d'une valeur constante du mesurande $m_{\text{constante}}$, par le rapport entre Δs de la grandeur de sortie à la variation Δm de la mesurande.

$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_{\text{constante}}}$$

Dans une chaîne de mesure, la sensibilité doit être maximum en début de la chaîne, soit le capteur. Plus l'augmentation de la sensibilité est faite en fin de chaîne, plus la probabilité d'augmenter du bruit apparaît, le signal devient très bruité. La sensibilité pour un capteur optique est donnée en général en [A/W]. Ceci correspond au courant généré par le capteur pour une certaine puissance lumineuse reçue. Pour un capteur optique, la sensibilité optique dépend de la longueur d'onde. Les fournisseurs donnent alors un graphique $S(\lambda)$.

La sensibilité, pour une CCD, est généralement donnée par le rendement quantique. Il correspond au nombre d'électrons générés par photon incident. Le rapport entre la sensibilité S en A/W et le rendement quantique η est

$$S = \eta * \frac{e}{hc} * \lambda \cong \eta * 0.8 * \lambda \rightarrow \eta = \frac{S}{\lambda * 0.8}, \text{ avec } \lambda \text{ en } \mu\text{m}$$

- **Défectivité**

Ceci caractérise le capteur par rapport à son bruit de fond et permet de qualifier son aptitude à détecter de faibles signaux. Le bruit généré par le capteur est dû à de nombreuses contributions, les bruits internes (bruit de Schottky, de Johnson, etc.) générés par les principes physiques du capteur, et les bruits externes. Ces derniers sont dus par exemple à la mesure d'une partie du spectre non souhaité, comme l'infrarouge émis par les rayonnements thermiques. On peut limiter ce bruit de fond en plaçant le capteur dans un boîtier à basse température avec un champ de vision réduit. La défektivité (D) d'un capteur dépendra de sa taille et de la bande passante. La défektivité spécifique (D^*) est fonction de la bande passante, et est indépendante de la taille du capteur.

- **Linéarité**

Un capteur est dit linéaire dans une certaine plage du mesurande, si le signal électrique transmis est proportionnel à la variation de la mesurande, en supposant le conditionneur du capteur linéaire. La linéarité simplifie le traitement du signal ainsi que la justesse.

- **Résolution**

La résolution doit être suffisante pour mesurer le déplacement de l'étoile.

- **Rapport signal/bruit (SNR)**

Le rapport signal sur bruit est important, plus il est élevé, plus le signal sera bon. Si ce rapport est inférieur à 1, alors la mesure est indétectable. Le SNR dépend du temps d'intégration, plus il est grand, plus la moyenne d'un bruit aléatoire sera proche de 0, d'où un SNR meilleur.

- **Noise Equivalent Power (NEP)**

Cette propriété caractérise la plus petite mesure que l'on peut détecter. Elle est définie par la puissance équivalente du bruit générant un SNR de 1 sur un temps de 30 secondes. Dans le cas d'un capteur optique, il s'agira alors de la puissance lumineuse minimum détectable sur une intégration de 30 secondes. L'objectif du NEP est de pouvoir définir la détectivité.

- **Dimensions**

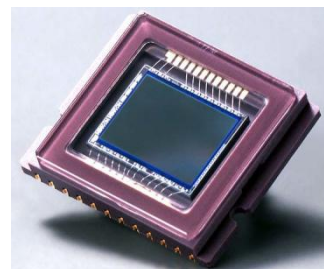
Les dimensions des surfaces sensibles sont à prendre en compte.

- **Prix**

Le facteur prix est à prendre en considération afin de faire un *autoguideur* à prix raisonnable.

6.5.2 CCD

Ce capteur est en réalité une matrice de photosite à 2 dimensions. L'éclairement de chaque photosite accumule des charges électriques par effet photoélectrique proportionnellement à la quantité de lumière reçue. La lecture se fait en transférant les charges accumulées dans un registre de manière ordonnée et synchronisée par une horloge. Le transfert peut être fait de différentes façons (plein cadre, transfert de trame, interligne). Le registre est ensuite lu et interprété.



Une image est alors générée informatiquement en interprétant le registre. Certaines CCD utilisent un filtre de Baer pour filtrer certaines couleurs sur certains pixels. On obtient donc une image couleur, dans notre cas, ceci n'a pas d'importance.

Le grand avantage de ce capteur est qu'étant donné sa taille et le nombre de photosites, il n'est pas nécessaire de le positionner sur l'étoile guide, un traitement d'image suffit.

Sensibilité

La sensibilité moyenne pour une CCD dépend de la longueur d'onde. Elle est exprimée par son rendement quantique. Pour une CCD standard, on admet un rendement quantique se situe entre 40% et 60%, soit une sensibilité entre 0.2 et 0.3 A/W (à 600nm). Les rendements supérieurs sont possibles mais impliquent une forte hausse du prix de la CCD.

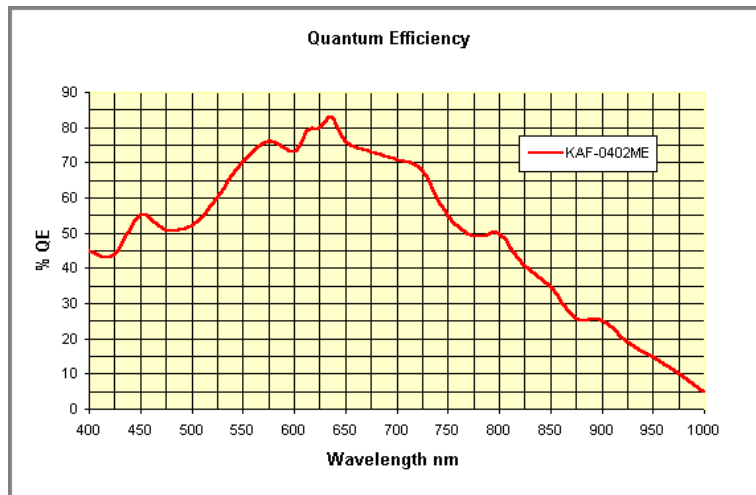


Figure 25 : la sensibilité d'une CCD ST-4, disponible à l'HEIG-VD, supérieur à la moyenne

Détection

Dans une CCD, la détection spécifique sera fonction du temps de pose. Plus le temps de pose est long, plus le nombre de photon augmente et la charge électrique s'accumule jusqu'à la fin du temps de pose, où l'on « vide » les registres.

Linéarité

La linéarité est excellente dans ce capteur. Le courant est rigoureusement proportionnel au nombre de photons reçus. On doit cependant faire attention à ne pas atteindre la saturation, en limitant le temps d'échantillonnage ou en assurant un flux lumineux pas trop élevé.

Résolution

Elle dépend de la taille d'un pixel. La taille moyenne est de quelques microns par pixel à quelques dizaines de microns par pixel.

SNR

Ce rapport varie selon le temps d'acquisition de l'image, ainsi que la magnitude de l'étoile. Il est donc difficile de l'estimer. Cependant, on sait qu'une CCD a un fort bruit noir, résultant de la température ambiante. Un abaissement de la température est alors utilisé dans l'astronomie amateur par différent moyen.

Dimensions

Les dimensions sont extrêmement variables. La surface maximale utilisée est de l'ordre de 6 cm^2 pour une CCD de 20 Megapixels (pour l'imagerie) à moins de 1 cm^2 pour une CCD de 352x288 pixels.

Prix

Les prix sont extrêmement variables, de quelques dizaines de CHF pour une webcam à quelques milliers de CHF pour une CCD à refroidissement Peltier. Les CCD utilisées en astronomie amateur pour l'autoguidage sont de l'ordre de 1500 CHF.

Avantages

Ce capteur est très utilisé actuellement car de par sa taille, il permet de ne pas déplacer le capteur sur une étoile guide, mais de traiter simplement l'image complète. Aussi, ce capteur peut se trouver à bas prix selon les besoins de l'application. Le conditionnement du capteur (souvent intégré) ainsi que le traitement (logiciel) est relativement simple et peu cher.

Défauts

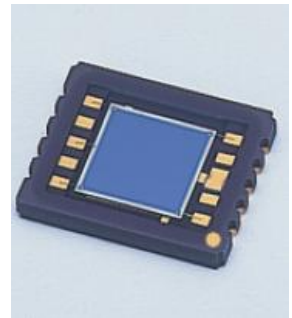
Ce capteur nécessite de long temps de pose pour obtenir une bonne détectivité, un long temps de pose pourrait retarder le système de correction en boucle fermée. En effet, la fréquence d'échantillonnage de l'image doit être le double de la fréquence maximum, à savoir approximativement 20 Hz ($2 \times 10\text{Hz}$). A cette fréquence, la détectivité est faible. Aussi, on ne peut faire que difficilement l'imagerie et le suivi avec une seule CCD. Il est nécessaire alors d'avoir 2 CCD, ceci peut être encombrant et rajoute du poids supplémentaire.

Synthèse

Ce capteur est simple d'utilisation, d'où une grande popularité chez les astronomes amateurs qui l'utilisent aussi pour l'*autoguideur*. Cependant, sa détectivité n'est pas optimale et contraint des longs temps de pose. Aussi, il serait peu intéressant d'utiliser un principe déjà existant comme la CCD et le traitement logiciel. L'objectif de ce travail de diplôme étant tout d'abord de trouver une autre manière encore plus efficace pour la détection d'étoile de faible magnitude. Le capteur CCD est donc à mettre de côté dans le cadre de ce travail de diplôme. Le capteur CMOS, concurrent direct de la CCD a aussi été mis de côté pour les mêmes raisons que la CCD.

6.5.3 PSD

Le PSD (Position Sensor Device) permet de détecter le centre de gravité d'une tache lumineuse à sa surface. Il s'agit ici d'une seule surface active (photodiode). Un courant proportionnel à la position du centre de gravité du spot lumineux est donné pour chaque axe (x et y).



Sensibilité

De 0.4 à 0.6 [A/W]

Détectivité

Faible, fort niveau de bruit. Une importante luminosité est nécessaire, sous peine d'obtenir un SNR très faible, voir insuffisant.

Linéarité

Excellente linéarité.

Résolution

Théoriquement infinie.

Précision

Les courants générés indiquent la position du centre de gravité du spot lumineux. Cependant pour ce type de capteur, la précision absolue est relativement mauvaise, de l'ordre de $\pm 0.25\text{mm}$. Cependant, la précision relative est excellente, de l'ordre de $1.5\mu\text{m}$.

Dimensions

De l'ordre de 10×10 [mm]

Prix

Entre 100.- et 1500.- selon la taille

Avantages

Simplicité de traitement du signal ; Etant donné la grande surface active, le centrage du spot lumineux n'a pas besoin d'être extrêmement précis car c'est la position relative de l'étoile qui nous intéresse.

Défauts

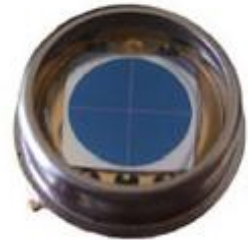
Le défaut principal réside dans le besoin d'une importante luminosité, ce qui n'est pas le cas d'étoile de faible magnitude.

Synthèse

Ce capteur serait idéal si sa détectivité était supérieure, mais il ne semble pas le plus adapté si l'étoile à suivre émet une puissance lumineuse faible.

6.5.4 Photodiode à 4 cadrans

Le principe de ce capteur est de réunir 4 photodiodes sur une surface. Elles sont disposées en quadrant. Un spot est alors centré au centre du quadrant, de cette manière, chaque photodiode reçoit une partie du spot et génère un courant proportionnel à la surface de la photodiode éclairée. En comparant les différents courants de chaque photodiode, on obtient une position du spot.

**Sensibilité**

De 0.4 à 0.6 [A/W]

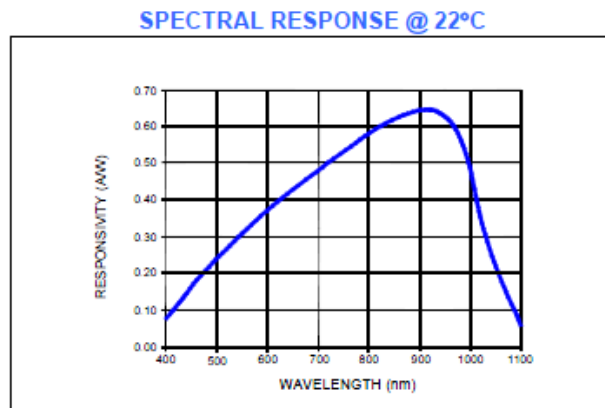


Figure 26 . Exemple type de la sensibilité d'une photodiode 4 cadrans

Détectivité

Les photodiodes en général ont une excellente détectivité, permettant de mesurer des puissances lumineuses de l'ordre de 10^{-11} [W] pour une bande passante de l'ordre de 20Hz. Cette puissance correspond à une magnitude 5.

Linéarité

La linéarité de chaque cellule est excellente. Cependant, pour déterminer le positionnement du spot sur les 4 cellules, il faut prendre en compte le « gap », l'espace entre chaque cellule, qui rend non-linéaire la mesure de position. Ce pendant, on peut y remédier de manière logicielle. De plus l'erreur sur la position est relativement petite (de l'ordre de 5%).

Dimensions

Les photodiodes 4 cadrans sont de l'ordre de un à plusieurs millimètres de diamètre (1-15mm).

Prix

Entre 100.- et 1500.-

Avantages

Le grand avantage est la détectivité élevée, ainsi que la bonne sensibilité. Le prix est aussi raisonnable par rapport à une CCD.

Défauts

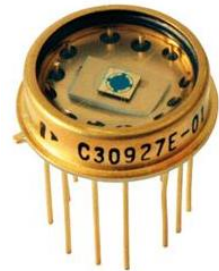
Un alignement initial précis est nécessaire pour centrer le spot. Aussi, le gap entre les photodiodes demande un spot lumineux plus grand. On peut remédier à ceci en défocalisant quelque peu le capteur.

Synthèse

Ce capteur serait idéal car très sensible, accessible. Il faut aussi savoir que ce capteur a fait ses preuves dans des applications militaires et astronomiques (guidage par laser, etc.).

6.5.5 Photodiode APD à quatre cadrans

Cette photodiode est appelée plus communément « photodiode à avalanche ». Elle a la particularité d'avoir un gain interne bien supérieur à une photodiode conventionnel. Grâce à une tension appliquée aux bornes de chaque photodiode à avalanche (appelée « reverse voltage »), on génère l'effet avalanche, qui permet d'atteindre un gain de l'ordre de 50 à 100 A/W au mieux, soit 100 fois supérieur à une photodiode normale. Il faut savoir que ces APD sont relativement récentes et donc encore rares.

**Sensibilité (pour chaque photodiode)**

La sensibilité est de l'ordre de 0.5 à 0.6 A/W. Cette sensibilité est multipliée par un gain dû à l'effet avalanche. Ce gain permet une augmentation d'un facteur 100 à 1000 sur la sensibilité sans effet sur le « dark current » (bruit). Ceci permet d'obtenir un très bon SNR. Le gain varie en fonction de la tension inverse (« reverse voltage ») à laquelle on soumet la diode.

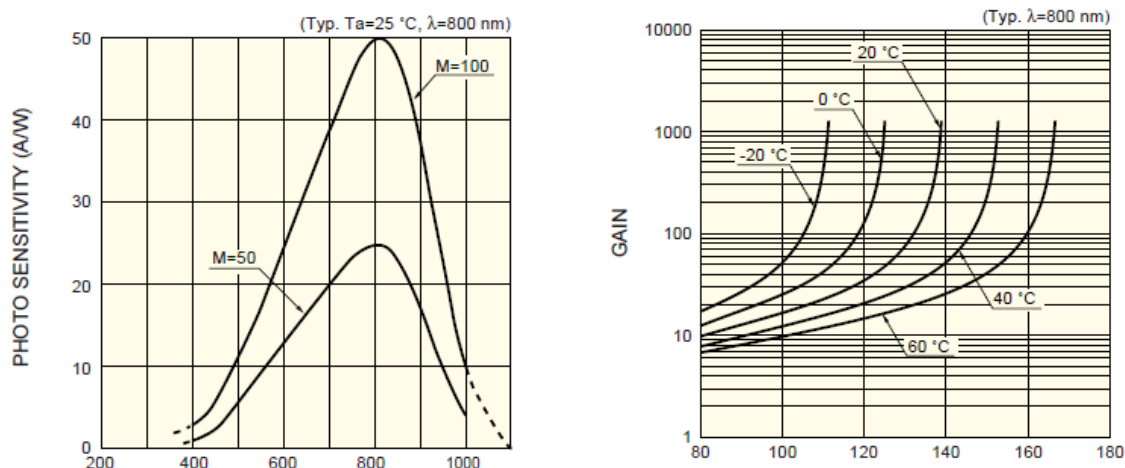


Figure 27: Exemple type de la sensibilité et du gain d'une photodiode APD

On soulignera que le gain varie beaucoup en fonction de la température, il serait alors utile de travailler à basse température (refroidissement du capteur) avec ce type de composant.

Défectivité

Les photodiodes APD ont une excellente défectivité car le SNR est très faible. On peut mesurer des puissances de l'ordre de $10^{-12} W$.

Linéarité

Idem à la photodiode standard.

Dimensions

Les photodiodes 4 cadrans sont de l'ordre de quelques millimètres de diamètre (1-2mm).

Prix

Environ 1000.-

Avantages

Le grand avantage est la défectivité excellente, ainsi que la bonne sensibilité.

Défauts

Idem à la photodiode standard. L'électronique est par contre plus compliquée du fait qu'il faut appliquer une haute tension continue à chaque cellule photodiode.

Synthèse

Ce capteur est extrêmement intéressant de par son excellente défectivité. De plus, sa taille le rend très pratique. Son prix est raisonnable par rapport à ses performances amplement supérieures à celles d'une photodiode standard.

6.5.6 Photomultiplicateur à 4 cathodes

Le photomultiplicateur utilise le principe de la photoémission. Il nécessite une tension élevée de l'ordre de plusieurs centaines de volts. Le fait d'avoir 4 cathodes recevant indépendamment le spot lumineux permet, comme le capteur à 4 photodiodes, de déterminer la position du spot. Ce capteur a été immédiatement abandonné après avoir constaté les prix, de l'ordre de plusieurs milliers de francs. De plus, une électronique relativement complexe doit être mise en place pour son conditionnement. Ce capteur n'est pas approprié pour le type d'application recherchée, principalement à cause de son prix excessif.



6.5.7 Synthèse

Une synthèse des caractéristiques les plus importantes a été faite de manière qualitative. Aux vues des caractéristiques, seulement 3 capteurs semblent être plus ou moins approprié : la PSD, la photodiode 4 cadrans et la photodiode APD 4 cadrans.

	PSD	Photodiodes 4 cadrans	Photodiode APD 4 cadrans
Sensibilité	très bonne	très bonne	Très bonne
Délectivité	basse à moyenne	Très bonne	excellente
Linéarité	excellente	bonne	bonne
Résolution	excellente	bonne	bonne
Dimensions	adéquate	adéquate	adéquate
Prix	acceptable	acceptable	onéreux

Tableau 2: synthèse des capteurs étudiés

On soulignera que la plus déterminante des caractéristiques au choix du capteur est la détectivité, si l'on veut détecter des étoiles guides de faible magnitude. Le choix le plus approprié serait alors **un capteur photodiode APD à 4 cadrans**. Cependant, ce capteur étant onéreux, il est à utiliser en cas d'optimisation. **Le concept sera validé avec un capteur photodiode 4 cadrans standard.**

6.6 Exigences de la platine xy

6.6.1 Exigences générales

La table doit être constituée de 2 étages, x et y. Les déplacements dans les 2 axes doivent avoir une précision de l'ordre de $20\mu\text{m}$, et une course totale de l'ordre de 7 mm, correspondant à la taille de la CCD d'imagerie utilisée. Cependant, la course peut-être plus petite puisque l'étoile guide doit se trouver dans le domaine isoplanétique de l'objet observé. Il y a alors très peu de chance de se trouver dans le bord du champ de la CCD.

Prétentions du mécanisme	
précision	$< 20\ \mu\text{m}$
vitesse	$> 2\ \text{mm/s}$
taille du mécanisme	$< 80\times 80\times 20\ \text{mm}$
course d'un axe	$> 7\text{mm}$

Tableau 3 : prétentions du mécanisme

Contraintes, environnement

- La platine doit pouvoir se trouver dans n'importe quelle position dans l'espace
- Elle doit pouvoir travailler à basse température ($\geq -20^\circ\text{C}$)

Différents modèles sont existants sur le marché, comprenant en général la motorisation des 2 axes ainsi qu'un capteur de position pour chaque axe. Cependant, le prix moyen pour un étage (1 axe) est supérieur à 1500.-. Il est à remarquer que la précision de ces platines est excellente, inférieure au micron, mais elle serait superflue pour notre système. Aussi, la taille de ces dernières est relativement grande. Dans notre cas, ne devant pas atteindre le micron, nous pouvons espérer travailler en boucle ouverte avec le type de moteur choisi (pas-à-pas), ainsi que d'un contact fin de course permettant une position absolue. Cela réduirait de beaucoup les coûts et la simplicité du système, tout en sachant que la mécanique doit être excellente pour travailler en boucle ouverte.

La table xy doit avoir un excellent guidage permettant une très bonne répétabilité ainsi qu'une grande précision. Le mécanisme envisagé est un mécanisme xy conventionnel, ayant 2 étages à déplacement linéaire motorisé montés en série.

Une sélection parmi différents moteurs a été faite afin de déterminer la motorisation la plus appropriée. Le choix du moteur est très important pour assurer la précision et simplifier la mécanique. Différents moteurs ont été étudiés, ceux sélectionnés ci-dessous permettent une bonne précision de l'ordre de la dizaine de microns ainsi qu'une course suffisante au déplacement nécessaire (environ 10mm).

Dans ce genre d'application, il est important de faire une palette de choix et de l'analyser afin de choisir la meilleure voie possible. Aussi, le type de moteur influence énormément la conception, il est donc primordial de le faire avant la conception mécanique détaillée car il deviendra une exigence pour la conception du reste du système (elle devra s'adapter au moteur et non l'inverse).

6.6.2 Choix de la motorisation

Moteur Elliptec X15G

Le moteur X15G est un moteur piézoélectrique à bas prix. Le moteur est uniquement constitué d'un stator, le rotor dépend de l'utilisation. Il peut être entraîné en rotation ou de manière linéaire. Il permet des déplacements rapides et précis.

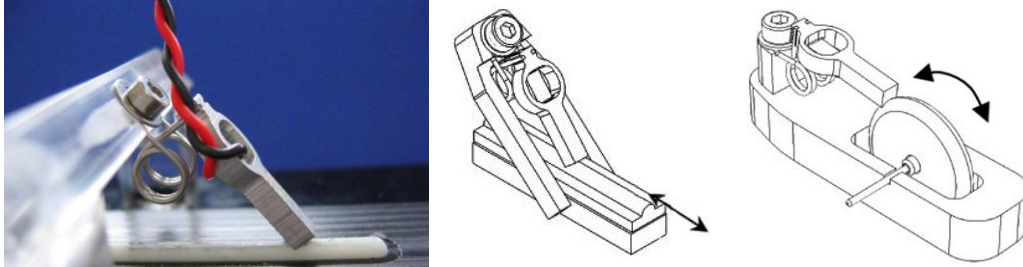


Figure 28 : moteur piézoélectrique Elliptec X15G

Avantages

- Bas prix : 30 €, starter kit disponible à la HEIG-VD
- Peut travailler à très basse température

Inconvénients

- Faible force: 0.35 N ; possibilité d'utiliser plusieurs moteurs en série pour augmenter la force
- Différentes contraintes et tolérances de montage (inclinaison du moteur, etc.)
- Encombrement
- Haute vitesse minimale (>100 mm/s)
- Résolution de 10µm au mieux

Moteur New Scale Squiggle SQL 3.4

Ce moteur est aussi un moteur piézoélectrique. Il est constitué d'un stator ainsi que d'une tige filetée, jouant le rôle de rotor.



Figure 29 : moteur piézoélectrique Squiggle 3.4

Avantages

- Peu encombrant (Ø7x11 [mm])
- Bonne force : 2N
- Résolution du moteur : 0.5 µm
- Faible vitesse 4mm/s

Inconvénients

- Cher : 170 € le moteur, 600 € avec une carte de commande et un capteur de position. Il est à souligner que ce moteur nécessite obligatoirement une carte de commande électronique pour son fonctionnement. Nous ne pouvons pas contrôler ce moteur avec nos propres

moyens disponibles, car le développement d'une carte de pilotage électronique est excessivement compliqué pour un moteur piézoélectrique.

- Transformation mécanique du mouvement rotatif en mouvement linéaire nécessaire

Moteur pas-à-pas Faulhaber AM1524-2R-V-6-35-73-0904²

Ce moteur est intéressant par sa simplicité de commande par rapport à un moteur piézoélectrique. Il a une résolution de 24 pas par tour. Accouplé à une tige filetée³ à pas fin de 0.2mm, on peut alors atteindre une résolution d'environ 8.3µm. Le jeu dans le système vis-écrou est donné comme étant inférieur à 20 µm et le jeu axial du moteur est donné comme nul, en choisissant une option de moteur avec mini-roulement pré-chargés. Le moteur provient de chez Faulhaber.



Avantages

- Simplicité de commande
- Résolution de 8.3µm
- Taille ((Ø8 x15 [mm]))
- Couple de 0.9 mNm à 250 pas/s, force de l'ordre de quelques N avec une tige filetée de M2x0.2.
- Prix : 250.- (avec ensemble vis-écrou M2x0.2)

Inconvénients

- Transformation mécanique du mouvement rotatif en mouvement linéaire nécessaire

Synthèse

Le moteur pas-à-pas semble le plus approprié et a été choisi. Il permet une résolution raisonnable. Une vis sans fin accouplée à un écrou peut être commandée chez le même fabricant, ce qui rend le mouvement linéaire. La commande d'un moteur pas-à-pas est bien plus simple qu'un moteur piézoélectrique, et son prix est aussi un avantage. **De plus, on pourrait envisager des demi-pas afin d'augmenter la résolution, si cela s'avérait nécessaire.** La puissance de ce moteur permet aussi d'assurer une marge de motorisation suffisante.

² Datasheet annexe 2

³ Datasheet annexe 3

6.7 Récapitulatif de la conception de l'autoguideur

Le concept doit tout d'abord être validé par étape sans optimisation, c'est pourquoi les éléments ci-dessous ne seront pas pris en compte dans ce projet. Ces éléments pourraient être intéressants une fois le système validé. On pourrait alors améliorer de manière singificative les performances de l'autoguideur.

Refroidissement Peltier

La validation du concept ne nécessite pas forcément la mise en œuvre d'un système Peltier. En effet, l'ajout de cette fonction peut être compliqué si l'on prend en compte les phénomènes de condensation qui seront engendrés.

Capteur 4 cadrans APD

Le capteur optimal à utiliser est un capteur à 4 cadrans APD. Cependant, afin de tester le prototype, nous nous contenterons d'un capteur 4 cadrans conventionnel car bien que moins sensible, ce type de capteur est plus accessible. Une fois le concept validé, la première étape d'optimisation sera de remplacer la photodiode par une APD 4 cadrans.

Ci-dessous, les différents schématiques du concept envisagé, avec optimisation et sans optimisation.

Le concept sans optimisation sera le concept de validation à réaliser.

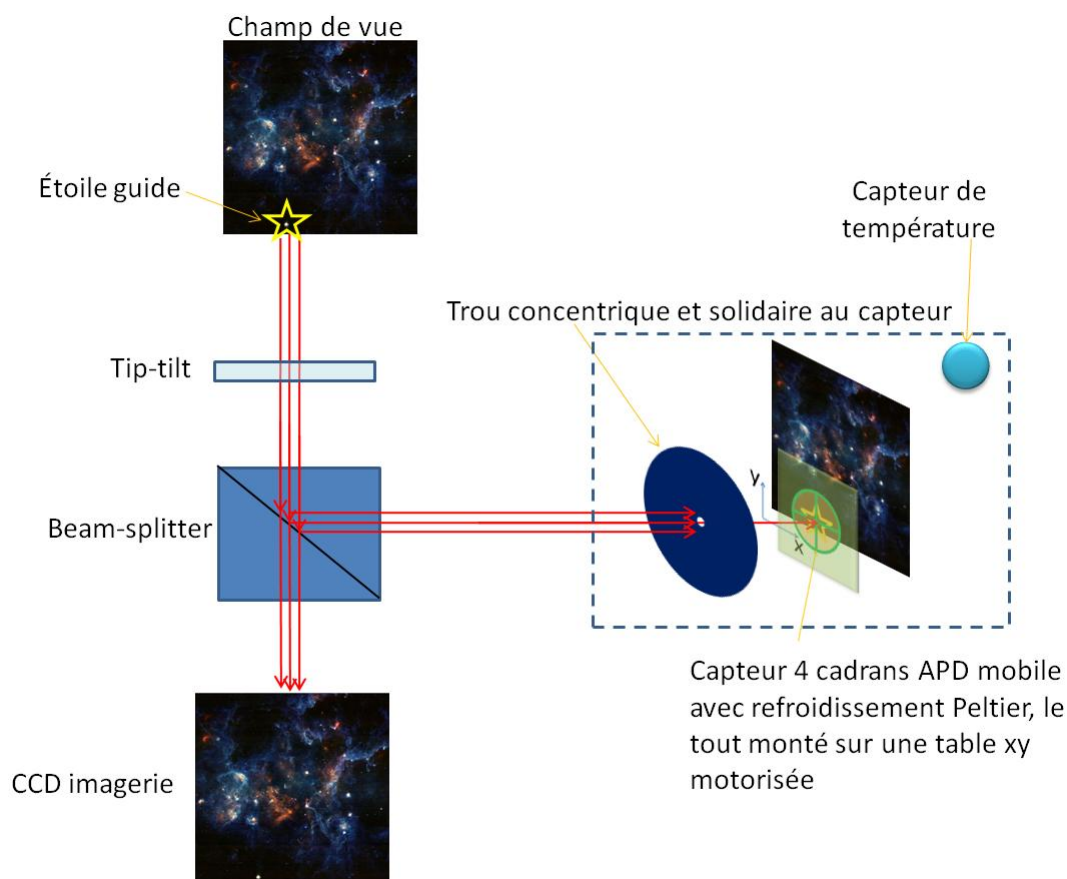


Figure 30 : schématique du concept optimal

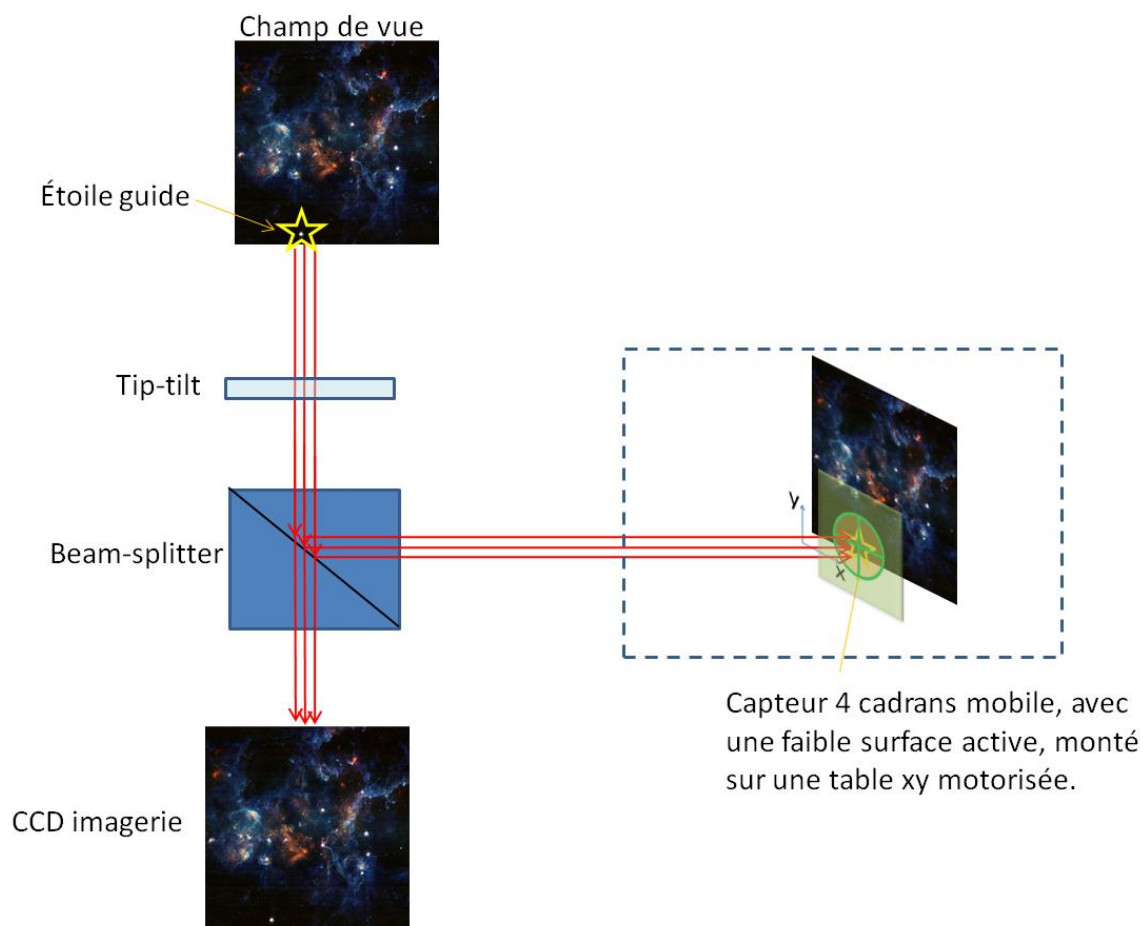


Figure 31 : schématique du concept de validation

La partie encadrée est la réalisation à effectuer. Le beam-splitter est déjà fourni. Un capteur ayant une faible surface active est suffisant pour démontrer le concept. Le trou concentrique sera ajouté si des essais valident sa nécessité.

6.8 Spécifications techniques générales de l'autoguideur

Spécifications techniques générales de l'autoguideur à développer	
Précision absolue du positionnement	< 20 μm
Magnitude minimum détectable	5
Encombrement maximal de l'autoguideur (y compris connectique)	150x150x150 mm
Gestion de l'autoguideur	Pilotage total par un logiciel interface

Tableau 4 : Spécifications techniques générales

7 Description de l'autoguidage

7.1 Positionnement du capteur

7.1.1 Première esquisse de la mécanique de la platine xy, sans guidage préconçu

Une première esquisse de la platine a été faite. La platine tenait dans un parallélépipède rectangle de taille 39x39x23 [mm]. En prenant en compte l'encombrement des moteurs, la taille était de 53x53x23[mm]. Cette esquisse a dû être abandonnée en raison du système de guidage. Le guidage, composé de rails et de billes, aurait été bien trop difficile à usiner dans les ateliers de l'école, car des étapes de rectification pour les chemins de billes sont nécessaires, ainsi que des traitements de surface. Aussi, sous-traiter cette opération était onéreux. Il a donc été choisi de refaire la platine avec des éléments de guidage existants et disponibles sur le marché.

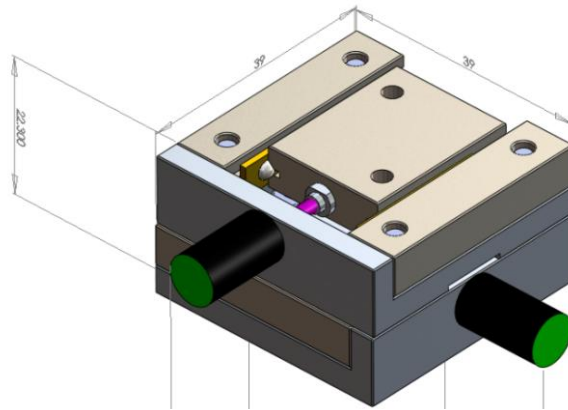


Figure 32 : première esquisse de la platine

Il aurait été plus judicieux de regarder directement les différents types de guidages existants sur le marché au lieu d'en refaire. Le guidage étant un art en soi, il est plus professionnel de choisir des guidages déjà existants, testés, et validés, surtout pour la précision voulue et pour un prototype. J'ai tout de même choisi de laisser une trace de cette solution car si le produit devrait être industrialisé, il pourrait être intéressant d'opter pour cette platine. En effet, le sous-traitement de la partie mécanique de cette platine pourrait se révéler avantageux à grande échelle.

7.1.2 Conception générale de la platine xy⁴

La platine réalisée est composée de 2 étages superposés se déplaçant avec le même principe. Le mouvement linéaire d'un étage est assuré par une transmission vis-écrou, permettant ainsi une transformation de mouvement rotatif-linéaire. La motorisation est réalisée avec un moteur pas-à-pas ayant une résolution de 24 pas/tours, accouplé à un système vis-écrou (M2x0.2mm), on obtient alors une résolution linéaire de 8.4µm par pas. Un fin de course⁵ ayant une répétabilité de 1 µm permet une position absolue fiable. Le système est boucle ouverte car la dynamique étant faible, nous pouvons assurer les pas du moteur. Le guidage d'un étage est réalisé par un guidage miniature de haute précision Schneeberger, ce

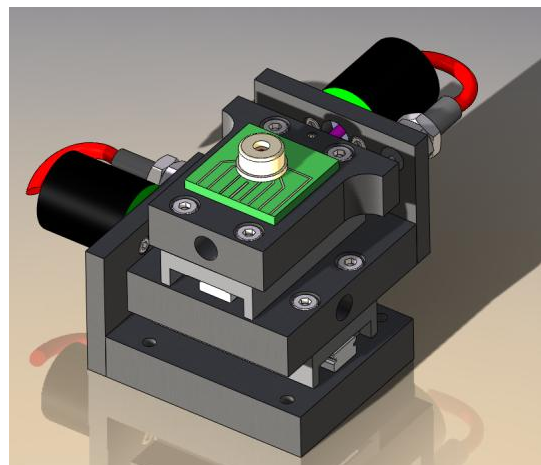


Figure 33 : platine xy, vue générale

⁴ Dessin d'assemblage et dessins mécaniques de construction annexe 9

⁵ Datasheet annexe 4

dernier est livré réglé sans jeu. Toutes les pièces usinées ont été faites en aluminium, afin de réduire le poids ainsi que les inerties en jeu. Les pièces sont toutes éloxées en noir afin de limiter les réflexions. Aussi, l'éloxage permet un meilleur vieillissement de l'aluminium et améliore la dureté de surface. On limite ainsi le risque de marquer les pièces lors du montage, ce qui peut être extrêmement néfaste dans une platine à haute précision. Les éléments mécaniques ainsi que la motorisation permettent l'utilisation jusqu'à au moins -20°C . Le faible jeu dans le système vis-écrou (environ $5\mu\text{m}$, indispensable pour assurer le fonctionnement en basse température) ne pose pas de problème de par la précision inférieure à atteindre. La taille finale de la platine xy est de $65 \times 62 \times 50$, en prenant en compte les moteurs.

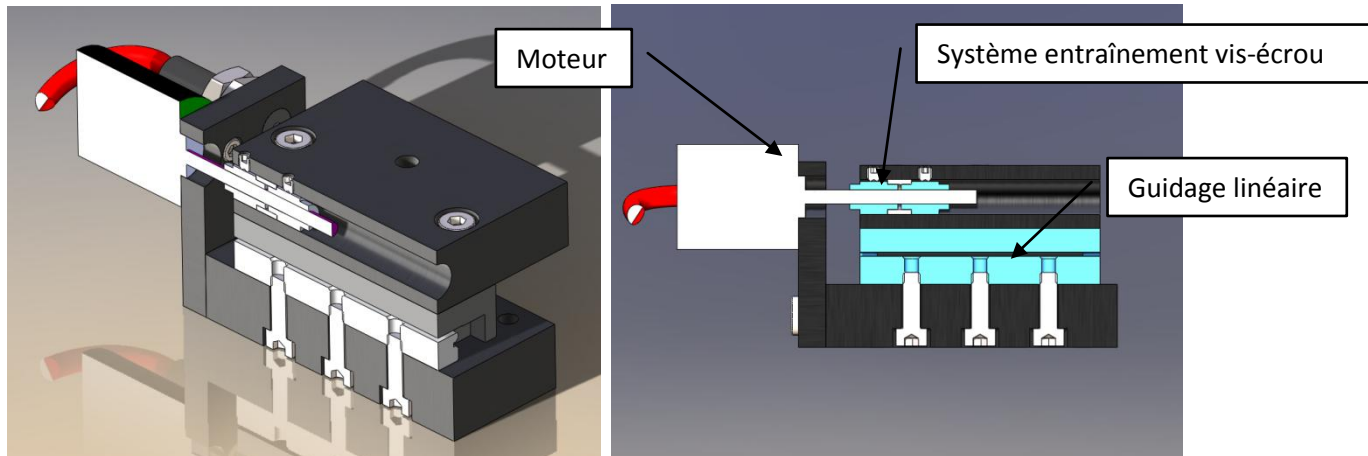


Figure 34 : vues en coupe du 1^{er} étage de la platine xy

7.1.3 Guidages

De bons guidages sont nécessaires afin d'obtenir la précision souhaitée de manière fiable. Des guidages miniatures existent, permettant un déplacement sans jeu avec une très faible force de déplacement (faible force de frottement), inférieure à 0.01 N . Le guide choisi est un guidage linéaire de chez Schneeberger. Le montage du guidage est réalisé et préréglé sans jeu. Il s'agit du guide Schneeberger ND 1-35.18.

Caractéristiques principales :

- Taille : $35 \times 20 \times 8\text{ [mm]}$
- Poids : 30 grammes
- Course : 18 mm

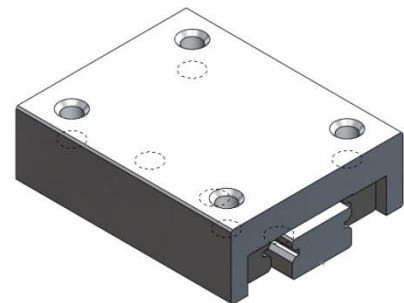


Figure 35: vue 3D d'un guidage miniature

Des guidages plus petits sont disponibles, mais après discussion avec le service technique de l'entreprise, il a été relevé que ces derniers étaient très fragiles et probablement trop petits pour l'application.

7.1.4 Entraînement

Le moteur est fixé par 2 vis. La vis filetée d'entraînement M2x0.2 est montée d'usine sur l'arbre moteur. L'entraînement est réalisé par un système vis-écrou. Afin de rattraper le jeu entre l'écrou et la vis (estimé à 20µm selon le fournisseur), un second écrou est ajouté en série. Les écrous sont séparés par une entretoise qui sera planée au montage afin d'éliminer le jeu. Les 2 écrous forment alors en réalité un seul écrou sans jeu. Ils sont assurés en translation et en rotation par des vis sans tête appuyées sur les faces fraisées des écrous. Si l'ajustement des 2 écrous est trop compliqué (tolérance de coaxialité élevée, problème d'hyperstatisme), ces derniers seront ajustés sur la vis, collés entre eux avec l'entretoise planée, puis un seul écrou sera assuré. Il est important de laisser un jeu de l'ordre de 5 µm afin d'assurer que le système ne se coince pas en cas de basse température.

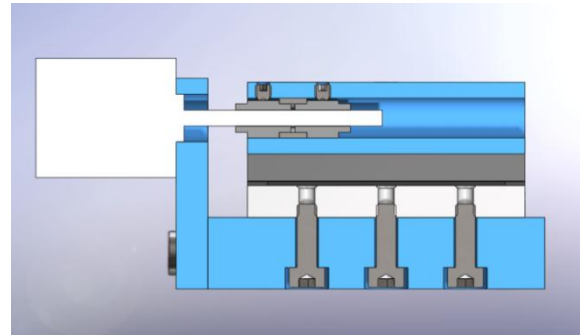


Figure 36 : montage du moteur et transmission

7.1.5 Dimensionnement des moteurs pas-à-pas

Le moteur du premier étage a évidemment plus de contrainte car il doit déplacer les 2 étages. Nous dimensionnerons alors ce moteur. Le second sera identique, mais aura une marge de motorisation plus grande. Ceci est préférable, surtout dans le cas d'un prototype, où l'ajout de fonction (et donc d'une masse supplémentaire) pourrait être possible par la suite, comme par exemple l'ajout d'un système Peltier.

La vitesse linéaire du chariot (V_{lin}) doit être de 2mm/s. Le moteur pas-à-pas, ayant 24 pas/tour ($n_{pas\ mot}$), et accouplé à une vis sans fin de pas 0.2mm (p_{vis}), doit avoir une vitesse de

$$\omega_{mot} = \frac{V_{lin}}{p_{vis}} * n_{pas\ mot} = \frac{2}{0.2} * 24 = 240 \left[\frac{pas}{s} \right]$$

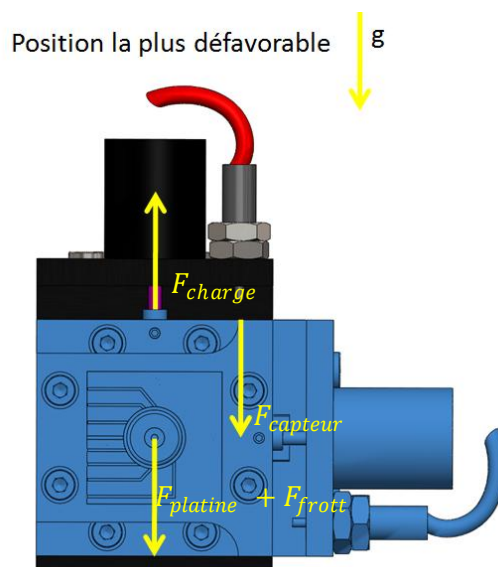


Figure 37 : statique des forces dans la position la plus défavorable, en bleu → éléments déplacés par le 1^{er} étage

A vitesse constante, le premier moteur, doit alors soulever une masse de 200 grammes, dans le cas extrême où sa position est verticale. Cette masse a été calculée avec des pièces en aluminium et en laissant une marge pour la visserie. La force nécessaire est alors de

$$F_{platine} = 0.2 * 9.81 = 1.96 \text{ N}$$

Le capteur de déplacement doit être actionné avec une force de 0.2 N ($F_{capteur}$). Aussi, bien que le fournisseur du guidage assure une force de déplacement inférieure à 0.01N, il est préférable de prévoir une marge, que nous estimerons à 0.2N (F_{frott}). Dans le pire des cas, la force nécessaire est alors de

$$F_{charge} = F_{platine} + F_{frott} + F_{capteur} = 1.96 + 0.2 + 0.2 = 2.36 \text{ N}$$

Ainsi la force nécessaire à transmettre via la transmission vis-écrou est $F_{charge} = 2.36 \text{ N}$.

Calcul du couple du moteur pas-à-pas pour obtenir la force nécessaire

Le moteur pas-à-pas Faulhaber AM1524 est livré avec un ensemble vis-écrou.

Filetage de la vis : M2x0.2

Le couple à fournir pour monter la charge à vitesse constante est donné par :

$$M_{charge} = F_{charge} * \frac{d_2}{2} * \tan(\gamma + \rho')$$

Où

- d_2 est le diamètre sur flancs du filetage, $d_2 = 1.85 \text{ mm}$
- ρ' est l'angle de frottement
- γ est l'angle d'hélice du filetage

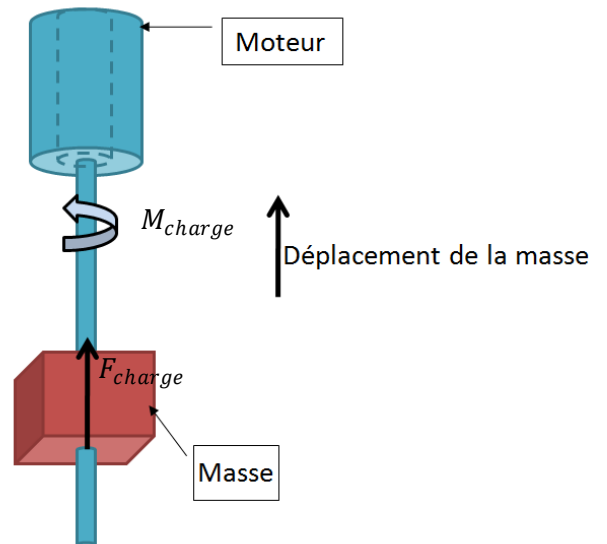


Figure 38 : transformation du couple en force axiale par le système vis-écrou

L'angle de frottement est donné par

$$\rho' = \text{atan}\left(\frac{\mu}{\cos\alpha}\right)$$

Où

- α est l'angle de profil, pour du métrique, $\alpha = 30^\circ$
- μ est le coefficient de frottement, estimé à 0.3

L'angle d'hélice du filetage vaut

$$\gamma = \text{atan}\left(\frac{\text{pas}}{\pi * d_2}\right)$$

Où

- pas = 0.2 mm

Finalement, on a

$$M_{charge} = \frac{F_{charge} * d_2 * \tan(\gamma + \rho')}{2} = \frac{F_{charge} * d_2 * \tan\left(\operatorname{atan}\left(\frac{pas}{\pi * d_2}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{\mu}{\cos\alpha}\right)\right)}{2}$$

Et donc

$$M_{charge} = \frac{2.36 * (1.85 * 10^{-3}) * \tan\left(\operatorname{atan}\left(\frac{0.2 * 10^{-3}}{\pi * (1.85 * 10^{-3})}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{0.3}{\cos(30)}\right)\right)}{2} = \mathbf{0.842mNm}$$

Durant les phases d'accélération/décélération, les inerties doivent être prises en compte afin de déterminer le couple à fournir lors d'une accélération/décélération.

Calcul des inerties rapportées au moteur

L'hypothèse qu'il n'y a pas de frottement dans le guidage est approuvé par le fournisseur.

Durant la **phase d'accélération**, l'inertie totale rapportée au moteur est donnée par

$$J_{tot} = J_{mot} + J_{vis} + J_{masse_{mot}}$$

Les inerties du moteur (J_{mot}) ainsi que de la vis (J_{vis}) sont données dans les datasheets. Déterminons alors $J_{masse_{mot}}$, correspondant à l'inertie de la masse en mouvement rapportée au moteur. Pour un système vis-écrou, selon la conservation de l'énergie, l'inertie de la masse rapportée au moteur vaut

$$J_{masse_{mot}} = \frac{m}{\eta_{vis/écrou} * i^2}$$

Où

$$\eta_{vis_{écrou}} = \frac{\tan(\gamma)}{\tan(\rho' + \gamma)} = \frac{\frac{pas}{\pi * d_2}}{\tan\left(\operatorname{atan}\left(\frac{\mu}{\cos\alpha}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{pas}{\pi * d_2}\right)\right)}$$

- α est l'angle de profil, pour du métrique, $\alpha = 30^\circ$
- μ est le coefficient de frottement, estimé à 0.3
- d_2 est le diamètre sur flancs du filetage, $d_2 = 1.85 \text{ mm}$
- ρ' est l'angle de frottement
- γ est l'angle d'hélice du filetage
- pas de la vis : 0.2 mm

Et donc

$$\eta_{vis_{écrou}} = \frac{\frac{0.2 * 10^{-3}}{\pi * 1.85 * 10^{-3}}}{\tan\left(\operatorname{atan}\left(\frac{0.3}{\cos(30)}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{0.2 * 10^{-3}}{\pi * 1.85 * 10^{-3}}\right)\right)} = \mathbf{0.089 [-]}$$

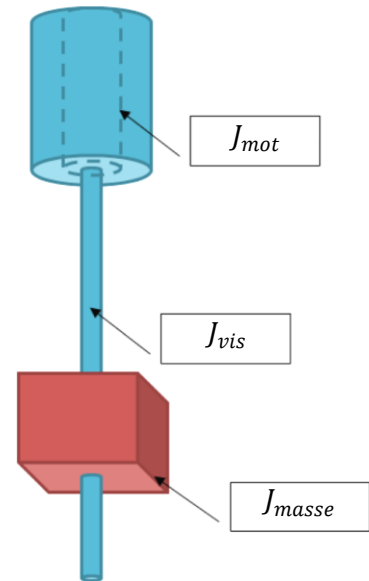


Figure 39 : inerties présentes

Et

$$i = \frac{\omega}{v} = \frac{\alpha}{pas} = \frac{2\pi}{0.2 * 10^{-3}} = 31400 \left[\frac{rad}{m} \right]$$

Finalement,

$$J_{\frac{masse}{mot}} = \frac{m}{\eta_{vis/écrou} * i^2} = \frac{0.1}{0.089 * 31400^2} = 1.14 * 10^{-9} \left[kg * \frac{m^2}{rad^2} \right]$$

Avec les autres inerties, on a

$$J_{mot} = 45 * 10^{-9} [kg * m^2]$$

$$J_{vis} = \text{négligeable}$$

Et donc

$$J_{tot} = J_{mot} + J_{\frac{masse}{mot}} = 9 * 10^{-9} + 1.14 * 10^{-9} = 4.614 * 10^{-8} [kg * m^2]$$

On soulignera que l'inertie est extrêmement faible, puisqu'il s'agit approximativement de l'inertie propre du moteur. Cela est dû en grande partie au faible pas de la vis, ce qui augmente le rapport de réduction de manière considérable. Lors du freinage, le système étant irréversible ($\eta < 0.5$), on peut admettre que l'inertie rapportée est nulle.

Afin de calculer la force nécessaire au déplacement en prenant en compte les inerties, nous choisirons une accélération maximum de $0.004 [m/s^2]$, ce qui permet de parcourir 0.5 mm en 0.5s, en atteignant une vitesse de $2 \left[\frac{mm}{s} \right]$ à partir d'une vitesse initiale nulle (profil trapézoïdal de vitesse).

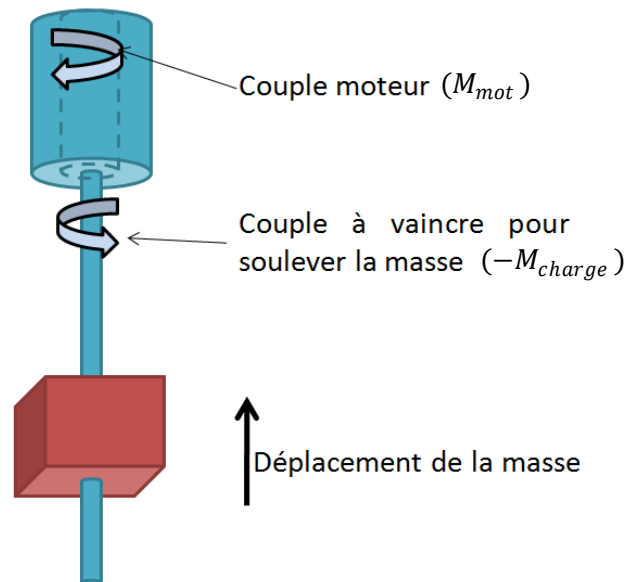


Figure 40 : couples présents lors de la montée

On sait alors que

$$\sum M = J_{tot} * \alpha$$

$$M_{mot} + (-M_{charge}) = J_{tot} * \alpha \rightarrow M_{mot} = J_{tot} * \alpha + M_{charge} = J_{tot} * a * i + M_{charge}$$

Et donc

$$M_{mot} = 4.614 * 10^{-8} * 0.004 * 31400 + 0.842 * 10^{-3} = 0.848 [mNm]$$

On soulignera que le couple supplémentaire à l'accélération de la charge est négligeable par rapport au couple nécessaire à déplacer la charge à vitesse constante ($M_{acc} = 4.614 * 10^{-8} * 0.004 * 31400 = 5.79 \mu Nm$).

Afin d'assurer qu'aucun pas n'est sauté par le moteur, il est conseillé d'avoir un facteur 3 de sécurité, **le couple nécessaire est alors de 2.5 mNm pour obtenir une force utile de 2.36 N avec une accélération de $0.004 \frac{m}{s^2}$** .

On remarque que le moteur est bien dimensionné. En effet, le couple voulu pour accélérer la masse (Slew Rate Torque) est présent jusqu'à environ 400 pas/s. Ce couple est alors bien suffisant pour aussi déplacer la masse à vitesse constante.

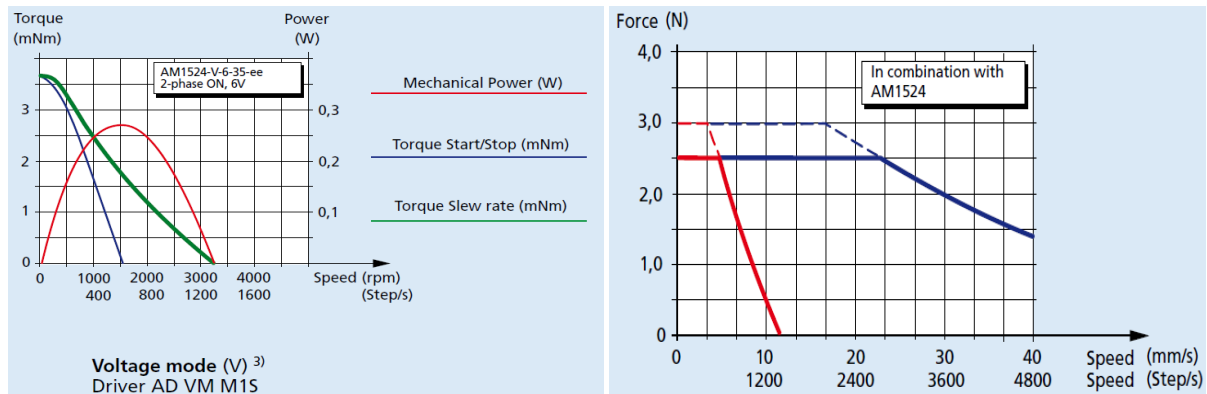


Figure 41: à gauche : extrait de la fiche technique du moteur AM1524 , à droite : extrait de la fiche de la vis-sans-fin / écrou

Il est aussi rassurant de voir que pour un couple de 2.5mNm (Slew Rate Torque à 400 pas/s), la fiche technique du système vis-sans-fin/écrou (second graphe) donne aussi une force de 2.5 N pour le moteur AM1524 (courbe rouge : «alimentation en tension, trait plein », calcul théorique $\rightarrow F_{charge} = 2.36N$). Le fournisseur indique qu'un facteur de sécurité a été pris en compte. Ceci démontre que les calculs de dimensionnements de la force transmise en fonction du couple moteur sont corrects.

Ainsi, on peut ainsi assurer que le moteur Falhauber AM1524 fourni un couple de 2.5 mNm à la vitesse de 240 pas/s, et assure aussi une accélération de $0.004 \frac{m}{s^2}$ jusqu'à 240 pas/s.

Remarque

On soulignera que si l'on n'utilise pas de profil de vitesse, ce qui serait sensé pour les faibles vitesses présentes, alors l'accélération au démarrage pour passer de 0 à 240 pas/s (2mm/s) en 1 pas serait de

$$\alpha = \frac{0.002}{\frac{1}{240}} = 0.48 \frac{m}{s^2}$$

Ainsi, en remplaçant cette accélération dans le calcul du couple précédemment effectué, le couple nécessaire (sans la marge de sécurité) devient

$$M_{mot} = 1.53 [mNm]$$

Le couple de démarrage (Start/Stop Torque) est d'environ 2.75mNm sur le graphique ci-dessus. La marge de sécurité est donc plus faible (1,8 au lieu de 3). Des essais seraient nécessaires pour déterminer si un profil de vitesse est nécessaire, ou si le facteur de sécurité de 1.8 suffit. Ceci changera la commande des moteurs dans l'interface.

7.1.6 Boîtier

La platine xy est montée dans une coque sur cylindrique. Une prise SUB-D 26 pôles assure toutes les liaisons, en ayant pris compte des optimisations probables (APD et système Peltier). Un embout de diamètre standard permet la fixation au télescope avec une bague standard identique à celle utilisée pour le montage de la CCD. Cette bague permet un réglage fin de la position du capteur par rapport au plan focal (possibilité de défocalisation manuelle). La position du plan focal (position de la photodiode de l'*autoguideur*) a été déterminée par rapport à la position du capteur CCD du système d'imagerie déjà monté, approximativement au plan focal.

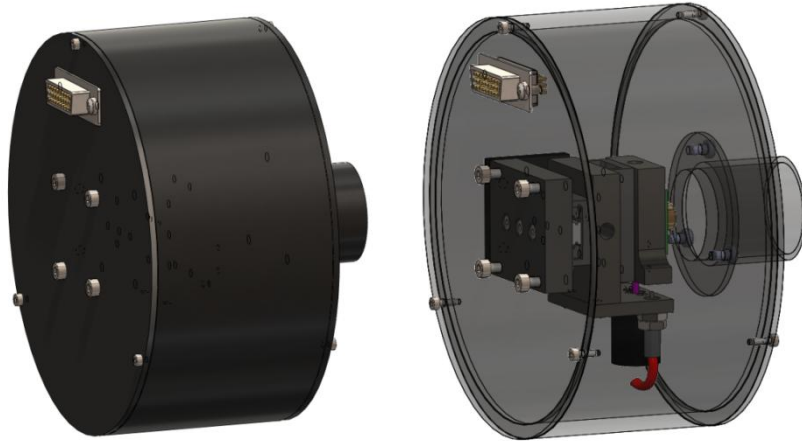


Figure 42 : système complet

7.1.7 Montage sur le télescope

Le montage de l'*autoguideur* est effectué à l'arrière du télescope, à la suite du beam-splitter.

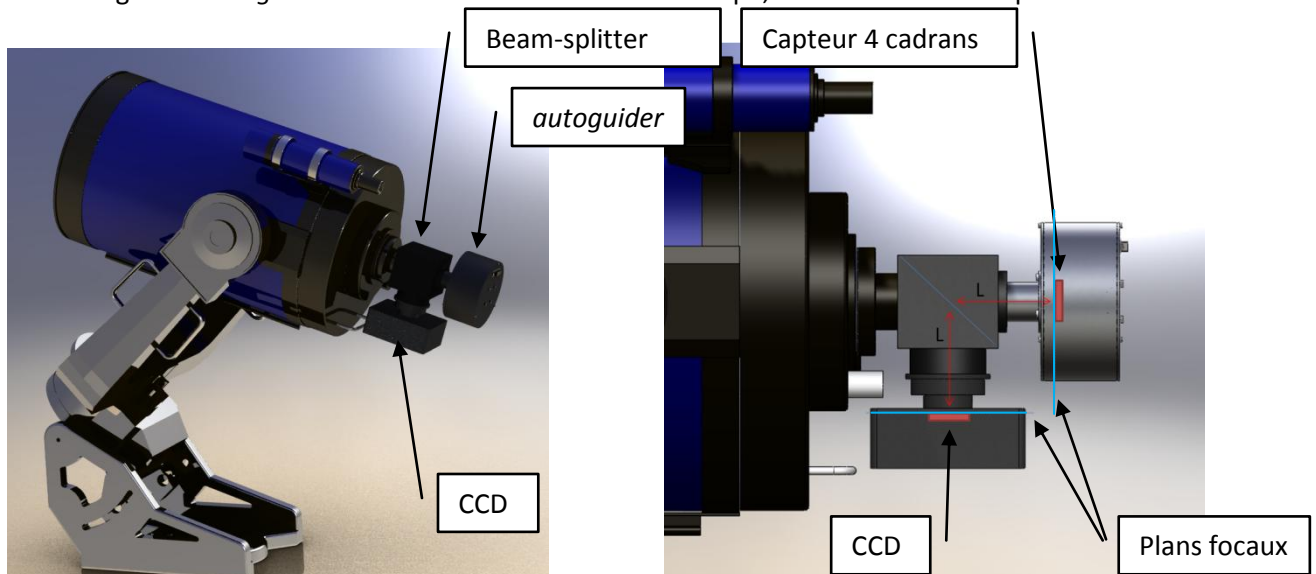


Figure 43 : montage de l'autoguideur au télescope (tip-tilt non présenté sur cette image)

7.2 Interface utilisateur

Afin de traiter les mesures réalisées avec le capteur 4 cadrans et de gérer la motorisation de la platine xy, il est avantageux d'avoir une interface utilisateur informatique. Parmi différentes possibilités (microcontrôleur, Visual Basic, etc.), le programme Labview⁶ a été sélectionné pour plusieurs raisons :

- Module entrée-sortie analogiques/numérique existant et accessible
- Programmation de très haut niveau, optimisé pour ce genre d'applications (mesures)
- Création aisée de l'interface graphique utilisateur
- Optimisé pour travailler en collaboration avec d'autres applications utilisées en parallèle (utilisation des images d'une webcam par exemple)

De plus, la station météo de l'HEIG-VD est gérée par un programme Labview, qui sera aussi utilisé pour la gestion du dôme du télescope. Il est donc préférable d'utiliser la même plateforme de programmation afin d'être compatible et de pouvoir par après rassembler les différents programmes pour ne faire plus qu'un seul environnement pour l'utilisateur. Le dôme pouvant être géré via Internet, on pourra alors gérer l'ensemble de l'observatoire en un seul unique programme.

7.2.1 Cahier des charges de l'interface

L'interface doit permettre de :

- traiter le signal du capteur 4 cadrans
- piloter les 2 moteurs pas-à-pas en gérant la position absolue de la platine xy
- affiner la position du capteur sur l'étoile guide si nécessaire.
- calibrer le positionnement de la platine en fonction de la CCD d'imagerie. La CCD et la platine xy n'auront probablement pas les axes xy confondus, il faut alors corriger les erreurs d'axes par le pilotage des moteurs.
- sélectionner une étoile guide sur le champ de vue de la webcam du télescope et positionner les moteurs afin d'y centrer le capteur

Afin de tester le système, les deux derniers points ne sont pas nécessaires et ne seront pas traités dans ce travail de diplôme.

7.2.2 Interface réalisée

La gestion des moteurs pas-à-pas est effectuée par 2 drivers (1 pour chaque moteur) Siemens SAA1402⁷. Ces derniers permettent d'alimenter et de gérer la commutation des bobines d'un moteur pas-à-pas bi-pôle. Chacun de ces éléments nécessite 3 signaux booléens pour faire un pas ou demi-pas :

- un flanc montant pour signaler qu'un pas doit être exécuté
- un signal 0 ou 1 indiquant le sens de rotation
- un signal 0 ou 1 indiquant si l'on souhaite exécuter un pas entier ou un demi-pas.

Ces signaux sont générés par le module d'entrée/sortie du programme Labview. Ce module, en plus d'entrées-sorties analogiques, contient 12 entrées/sorties numériques TTL. Ci-dessous, un schéma bloc général de l'interface ainsi que le schéma⁸ de câblage complet.

⁶ Schéma de programmation Labview annexe 10

⁷ Datasheet annexe 8

⁸ Schéma de câblage de l'interface annexe 11

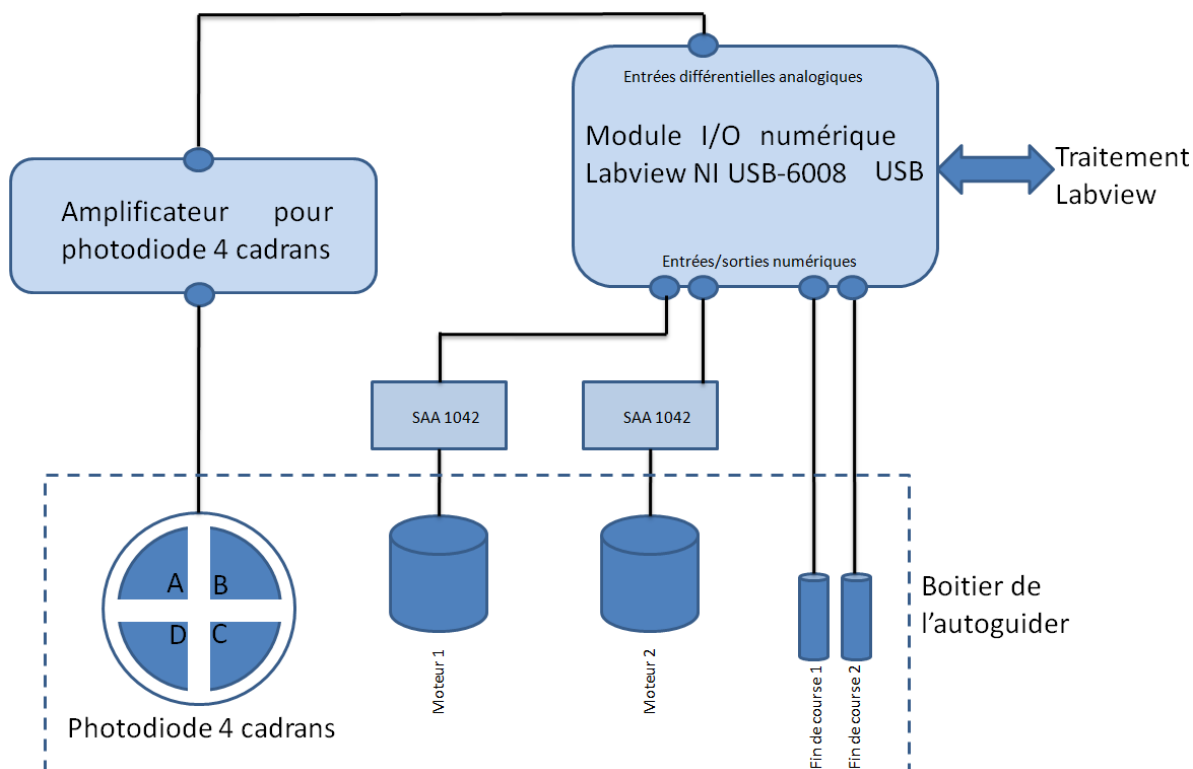


Figure 44 : schéma bloc général de l'interface

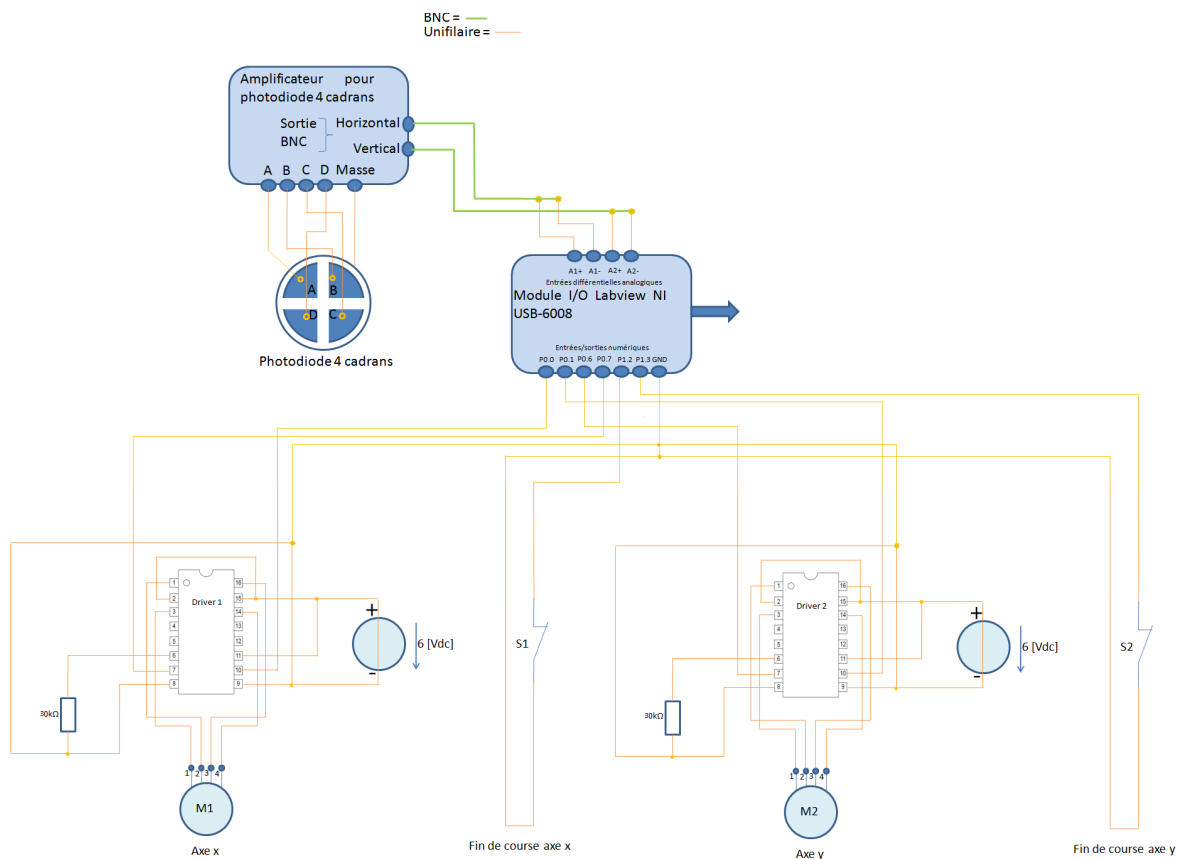


Figure 45 : schéma de câblage de l'interface Labview/actuateurs-capteurs

La programmation Labview est relativement complexe, de par le nombre de fonctionnalités. Ci-dessous, le schéma de programmation créé. Seulement les parties importantes ont été nommées. Le reste étant principalement des calculs et des tests de conditions nécessaires aux différents algorithmes de déplacements dans les différents modes (positionnement, calibration, affinement de position).

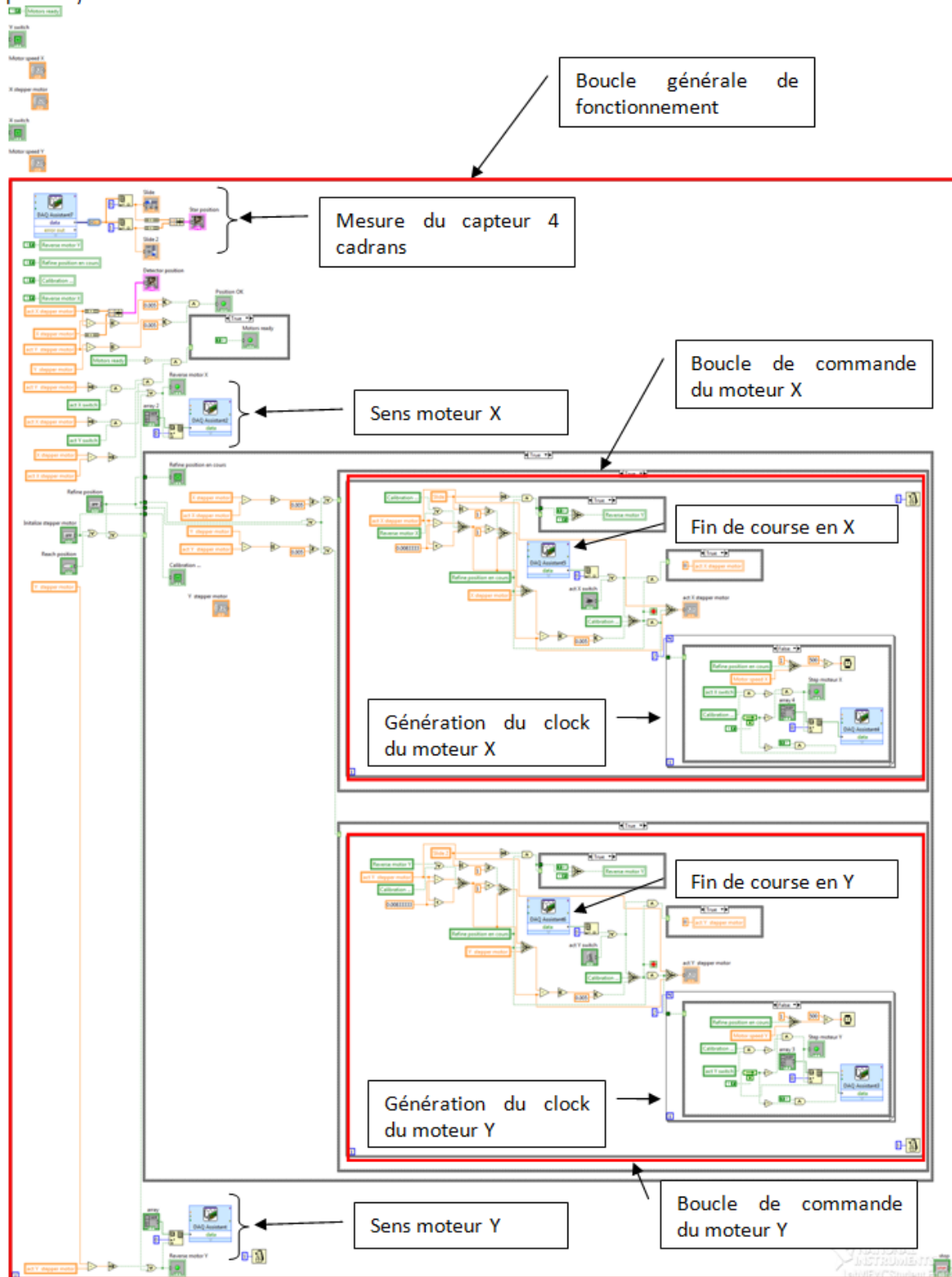


Figure 46 : schéma de programmation Labview

L'interface utilisateur Labview est constituée d'un panneau de commande permettant de visualiser la position du spot sur le capteur 4 cadrans ainsi que la position absolue du capteur sur la table xy développée. Différents boutons permettent:

- de calibrer la position du moteur, en simulant les fins de course (mise à zéro de la position de chaque axe en prenant comme référence le fin de course).
- de donner une position aux moteurs à atteindre, et lancer le démarrage des moteurs. Les impulsions données aux drivers de commande sont imagées par une LED verte pour chaque axe. Deux LEDs indiquent aussi le sens des moteurs.
- de paramétrer la vitesse des moteurs
- d'affiner la position du capteur sur l'étoile en boucle fermée, grâce au capteur 4 cadrans
- simuler les fins de course en cas de problème

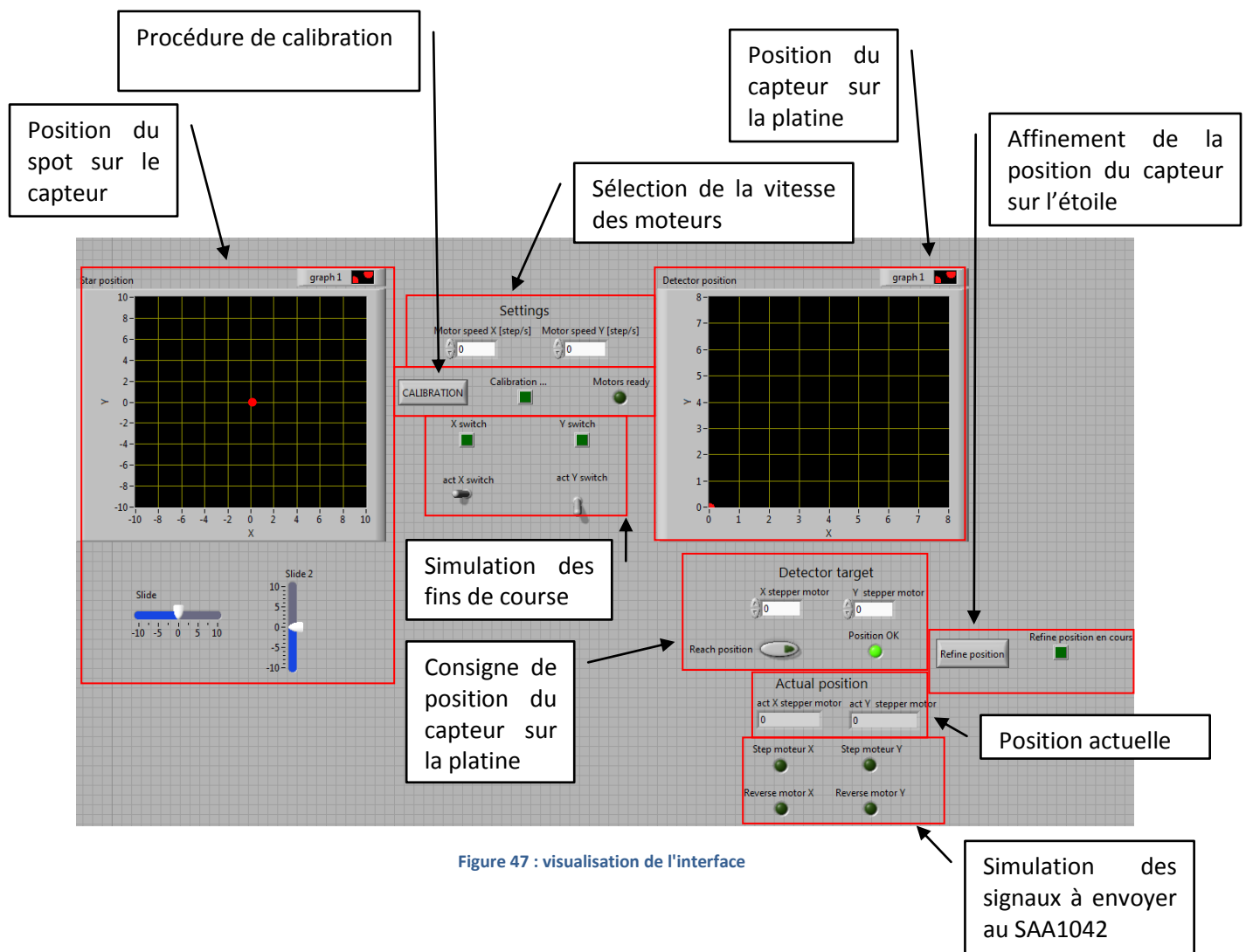


Figure 47 : visualisation de l'interface

Il n'a pas été jugé nécessaire de générer un profil de vitesse trapézoïdal pour les mouvements des moteurs pour la phase de prototype, car la vitesse est basse pour un moteur pas-à-pas. Cependant, le dimensionnement est prévu pour des accélérations de maximum $0.004 \frac{m}{s^2}$. Si un profil de vitesse était confirmé par les essais de la platine (si les moteurs sautent des pas), l'accélération du profil ne devrait pas dépasser l'accélération maximum calculée.

8 Essais⁹

8.1 Objectifs

Le premier objectif est de pouvoir mesurer le déplacement d'un spot lumineux sur le capteur 4 cadrans, simulant ainsi des étoiles de tailles et de puissances différentes. Puis, nous validerons l'utilité d'une photodiode à effet avalanche en démontrant qu'un net gain peut être acquis grâce à ce type de photodiode. La partie mécanique doit aussi être testée afin de vérifier le bon fonctionnement du système mécanique et de son interface. Toutes les parties du système seront alors testées séparément.

8.2 Capteurs optiques commandés

Après les différentes recherches sur les capteurs optiques, il avait été retenu d'utiliser un capteur 4 cadrans à photodiodes à effet avalanche (APD). Une photodiode 4 cadrans APD ayant les caractéristiques voulues, en termes de tailles, de sensibilité, a été trouvée, mais son prix était trop élevé (950.-). Il a donc été choisi de commander une photodiode 4 cadrans standards ainsi qu'une photodiode simple à effet avalanche. Ainsi, les prix étant nettement moins chers, on peut déjà :

- Caractériser la photodiode 4 cadrans simples et l'utiliser avec la table xy. Le prototype sera alors utilisable, en sachant qu'en remplaçant la photodiode 4 cadrans par une photodiode 4 cadrans APD, la sensibilité sera augmentée, moyennant un coût considérable.
- Valider la nécessité d'utiliser une APD 4 cadrans, une APD simple sera utilisée pour mesurer la différence de détectivité entre une photodiode standard et une photodiode APD.

La séparation de la lumière dans le télescope est réalisée avec un beam-splitter qui renvoi le proche infrarouge sur le système *autoguideur*. Les photodiodes choisies donc celles optimisées pour le proche infrarouge (800nm -1000nm).

Photodiode 4 cadrans standard QP1-6 TO5¹⁰

Cette photodiode a la particularité d'avoir un faible gap entre les cadrans (15µm), on augmente ainsi la zone active de la photodiode. Aussi, plus le gap est petit, plus l'étoile peut être petite, ce qui évite de devoir trop défocaliser l'image. Le courant de dark (bruit) est donné à 0.1 nA. Avec un rendement de 0.6 A/W à 870nm, la puissance théorique minimum détectable est alors de 16.7nW.

Photodiode APD simple AD1100-9 TO5i¹¹

Cette dernière est optimisée pour une longueur d'onde du proche infrarouge (905nm).

Photodiode APD 4 cadrans (non commandée)¹²

Dans le cas d'une optimisation, la photodiode APD 4 cadrans serait la photodiode C30927E.

⁹ Toutes les pièces commandées ainsi que leur prix sont en annexe 12

¹⁰ Datasheet annexe 5

¹¹ Datasheet annexe 6

¹² Datasheet annexe 7

8.3 Mesure de déplacement d'une étoile

8.3.1 Banc d'essai optique n°1

L'objectif de ce premier banc d'essai est de mesurer le déplacement d'une tache lumineuse. L'intensité de la tache sera en premier lieu bien supérieure à celle d'une étoile réelle au foyer du télescope. Cependant, l'objectif est tout d'abord de mesurer le déplacement de cette dernière.

Un amplificateur à photodiode 4 cadrans est utilisé, il mesure analogiquement les courants dans chaque cellule de la photodiode. Pour chaque cadran, le courant sera proportionnel à la puissance lumineuse sur chacun d'eux. Un convertisseur courant/tension à échelle réglable permet d'ajuster la sensibilité jusqu'à 1[V/μA].

En calculant la différence entre chaque cadran, on peut alors obtenir le centre de gravité de la tache présente sur le capteur 4 cadrans. L'amplificateur calcule automatiquement la position horizontale et verticale du centre de gravité du spot sur la photodiode. On obtient donc une tension différentielle représentant la position horizontale, et une seconde représentant celle verticale.



Figure 48: amplificateur pour photodiode

Cet appareil possède 2 sorties analogique ±10V BNC correspondant aux tensions différentielles horizontale/verticale. Ainsi, si les 2 sorties valent 0V, le spot est centré horizontalement et verticalement. Les valeurs de tensions sont aussi affichées numériquement par l'amplificateur. Les sorties sont utilisées pour transférer les mesures sur un oscilloscope, ainsi que sur un module I/O Labview, permettant le traitement numérique et l'affichage en temps réel des mesures avec une interface Labview.



Figure 49 : module I/O Labview NI USB 6008

Pour une photodiode 4 cadrans, les positions horizontale et verticale sont données par la différence des courants de chaque cadran. Les courants mesurés sont ensuite convertis en tensions.

$$I_{vertical} = (I_A + I_B) - (I_D + I_C)$$

$$I_{horizontal} = (I_B + I_C) - (I_A + I_D)$$

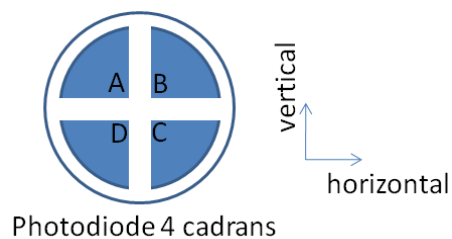


Figure 50 : photodiode 4 cadrans

Le schéma de câblage électrique pour le branchement de la photodiode aux différents éléments de mesure est le suivant :

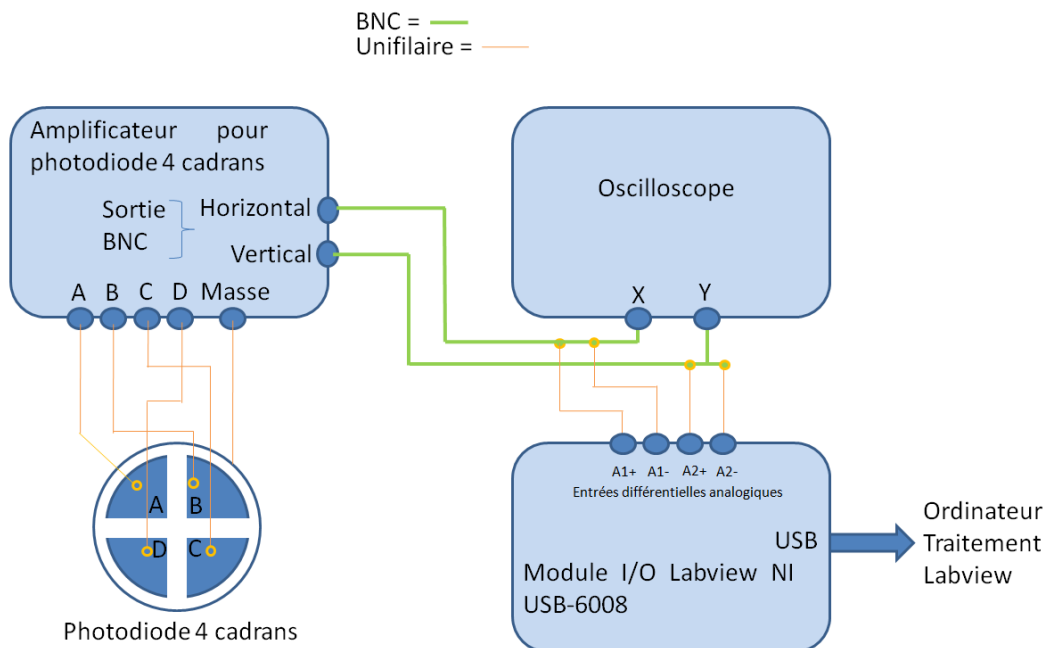


Figure 51 : Schéma de câblage du montage

Le système de mesure étant au point, il s'agit maintenant de simuler l'étoile. Le premier banc optique consiste à imager la lumière émise d'une fibre optique sur le capteur 4 cadrans avec un diaphragme et un objectif de microscope réduisant ainsi la taille du diamètre de la fibre. La fibre utilisée a un cœur de 1mm de diamètre. Trois diamètres d'étoile seront simulés, 150 microns, 100 microns, ainsi que 50 microns.

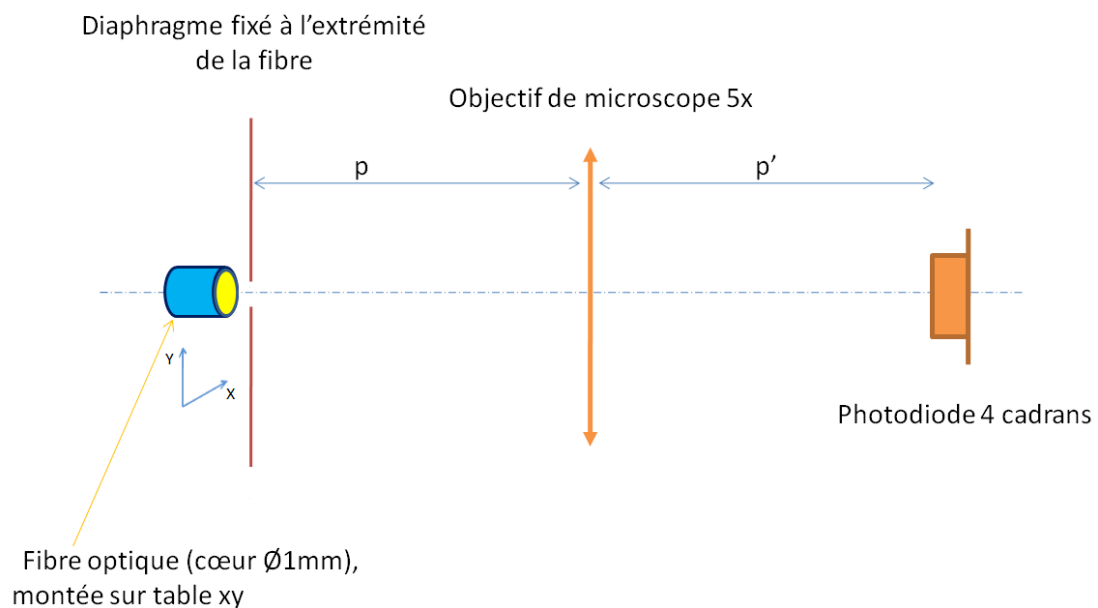


Figure 52 : banc d'essai optique n°1

L'objectif utilisé est un objectif 5x / 170, ce qui signifie que l'image, à une distance de 170mm, aura un grandissement G valant -5. On peut alors calculer la focale de l'objectif :

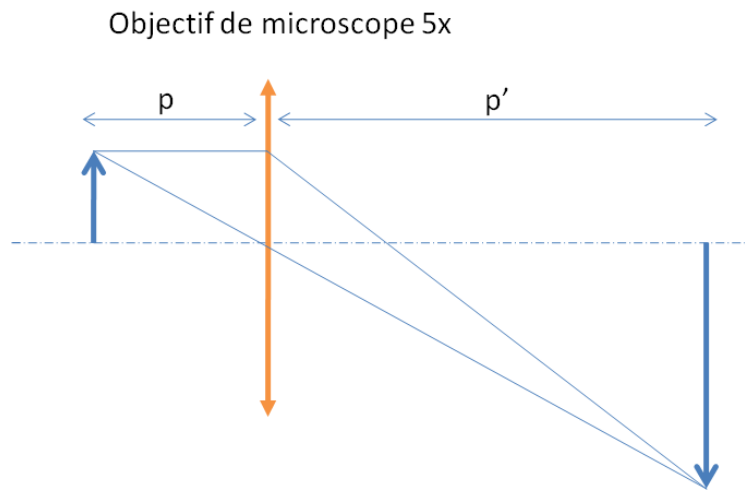


Figure 53 : schéma optique de l'objectif de microscope utilisé

$$G = -5 = -\frac{p'}{p} \rightarrow p = \frac{p'}{5}$$

Avec $p' = 170\text{mm}$

$$p = \frac{170}{5} = 34 \text{ [mm]}$$

La focale est alors donnée par

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \rightarrow f = \frac{1}{\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}} = \frac{1}{\frac{1}{34} + \frac{1}{170}} = \mathbf{28.33 \text{ [mm]}}$$

Afin d'obtenir un grandissement G d'un objet, les distances p et p' peuvent être déterminées :

$$G = -\frac{p'}{p} = -\frac{r_{image}}{r_{objet}}$$

On a alors

$$G * p = -p' \rightarrow p = -\frac{p'}{G}$$

Aussi,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

Et donc

$$\frac{-G}{p'} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \rightarrow p' = f * (-G + 1)$$

Et

$$p = -\frac{p'}{G}$$

La fibre de cœur 1mm, a son extrémité obstruée par un diaphragme de rayon $r_{diaphragme}$. On peut alors estimer que le trou du diaphragme est un objet de rayon $r_{objet} = r_{diaphragme}$. Ainsi, selon le diaphragme et le grandissement effectué, on peut obtenir les tailles d'étoiles désirées.

Calculs des distances p et p' pour un diamètre d'étoile					
diamètre de l'étoile [μm]	diamètre du diaphragme [μm]	G	p [mm]	p' [mm]	
150	150	-1	56.66	56.66	
100	100	-1	56.66	56.66	
50	150	-0.33	114.18	37.68	

Tableau 5: calculs des distances p et p' pour un diamètre d'étoile

Aussi, connaissant le grandissement, un déplacement en x ou y de la fibre et du trou (solitaires) générera un déplacement en x ou y sur le capteur de

$$\text{déplacement}_{\text{capteur}} = G * \text{déplacement}_{\text{fibre}}$$

Le schéma de câblage pour le système d'illumination par fibre optique est présenté ci-dessous :

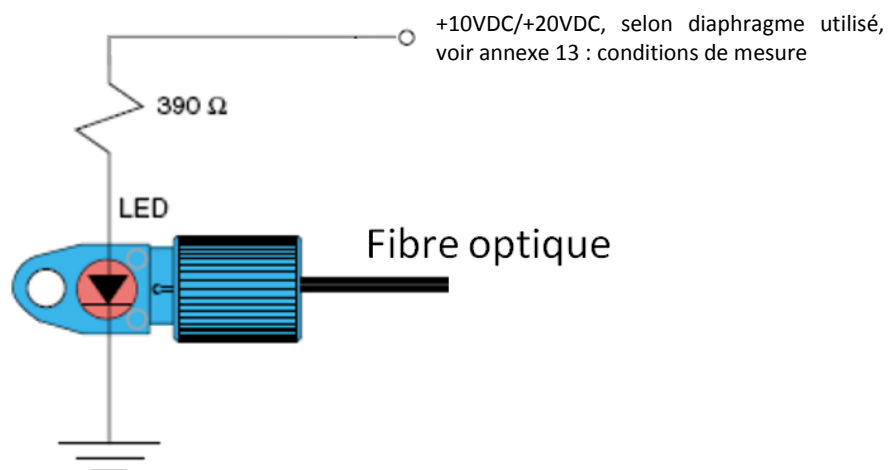


Figure 54 : schéma de câblage du système d'illumination par fibre optique

La LED utilisée est une LED émettant dans l'infrarouge à 870nm. La puissance émise est de 250μW dans la fibre de 1 mm de diamètre. Pour le centrage du spot sur la photodiode, une LED verte est utilisée afin de permettre une meilleure visualisation. Une fois le centrage effectué, la LED est remplacé par la LED infrarouge.

Ci-dessous, une vue générale du banc d'essai :

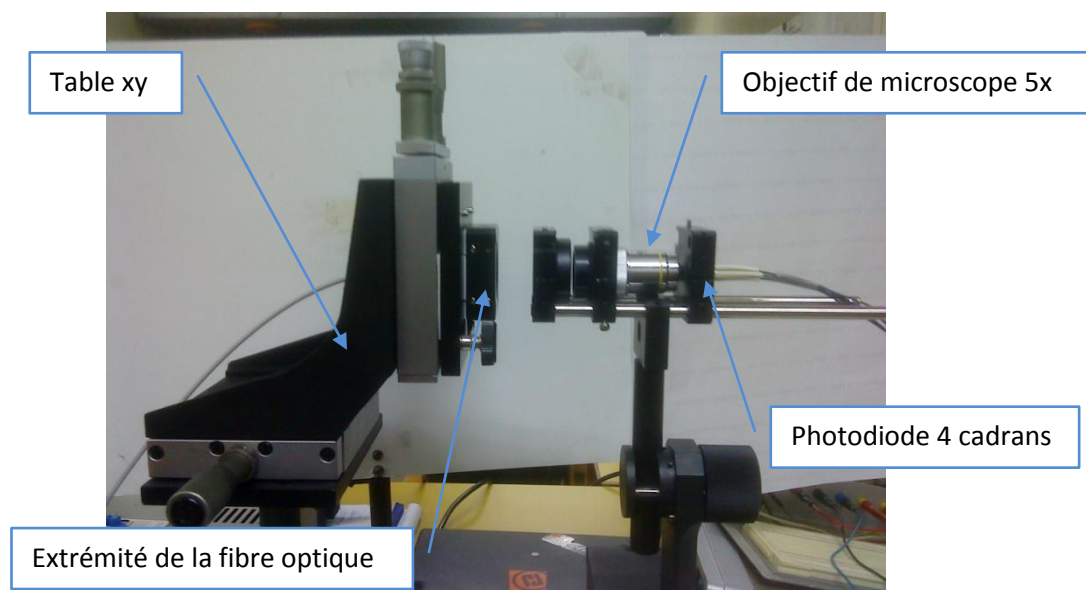


Figure 55 : banc optique complet

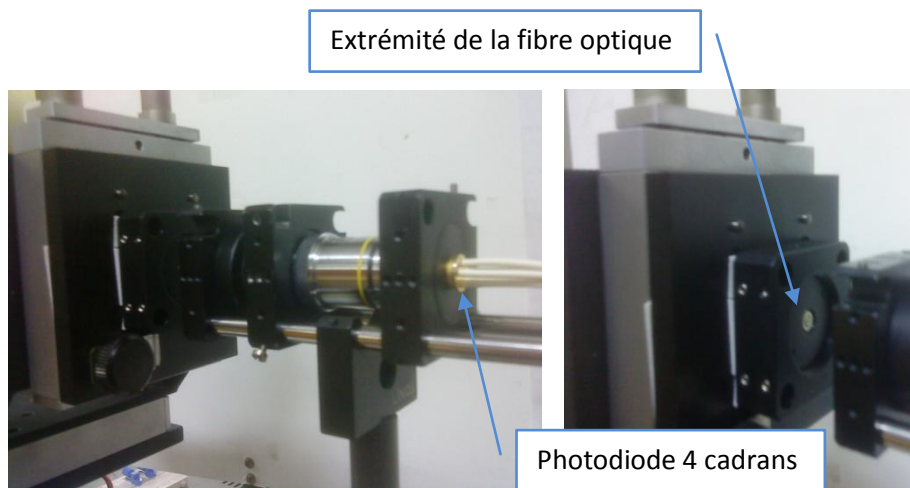


Figure 56 : vues du montage

8.3.2 Détermination du plan principal H de l'objectif 5x

Les distances p et p' sont à mesurer depuis le plan principal H de l'objectif. Il n'est pas indiqué sur l'objectif et doit alors être déterminé. Un petit montage a été effectué pour le déterminer par expérience. En prenant comme objet la fibre de diamètre 1mm, et souhaitant un grandissement de -1, l'image sera de même taille, soit 1mm. A l'aide du tableau ci-dessus, on sait que

$$p + p' = 56.66 * 2 = 113.32 \text{ mm}$$

En mettant un écran millimétré à une distance 113.32 mm de l'objet, l'image doit être de 1mm. Il suffit alors de bouger l'objectif dans cette zone jusqu'à atteindre la taille souhaitée. Une fois atteinte, le plan principal se trouve alors à 56.66mm de l'objet.

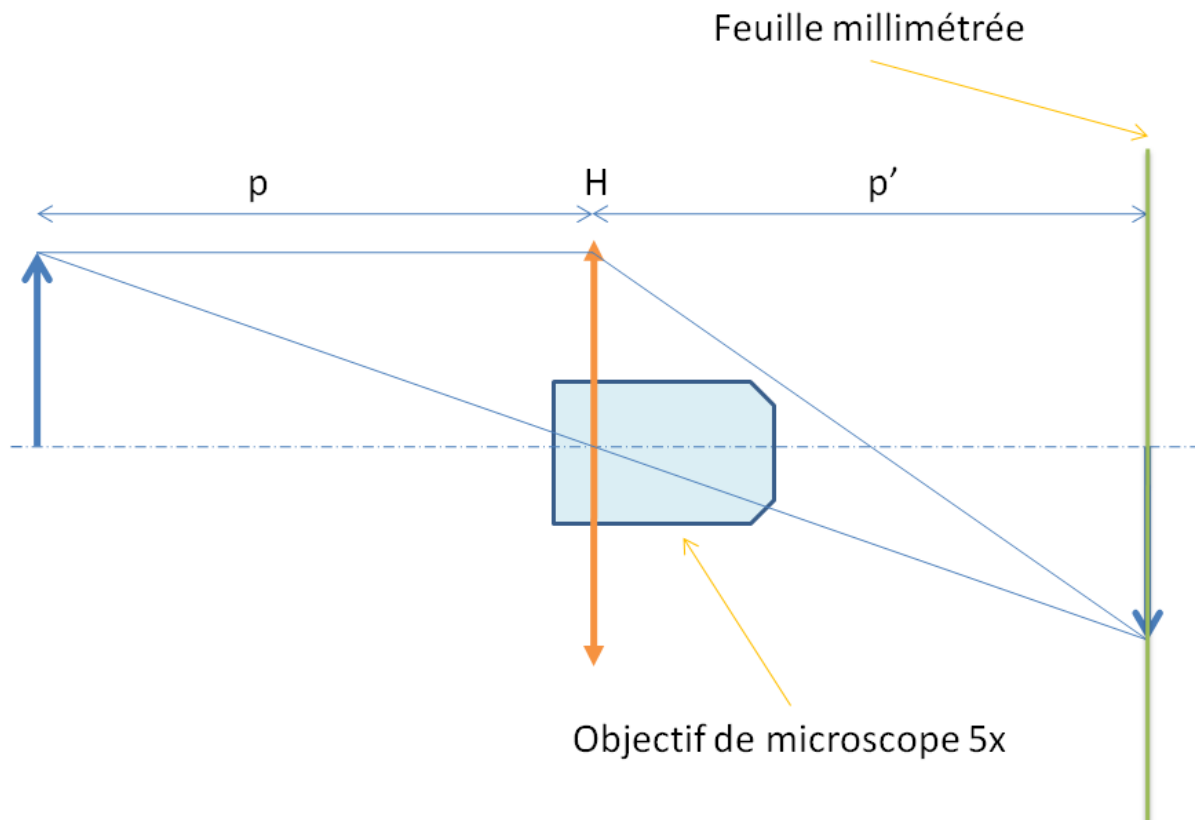


Tableau 6: montage pour déterminer le plan principal de l'objectif

8.3.3 Résultats ¹³

Le signal de la photodiode 4 cadrans a pu être affiché sur l'interface Labview, ainsi que sur un oscilloscope. Un déplacement de la table xy engendre effectivement un déplacement du signal sur l'oscilloscope. L'interface Labview affiche aussi correctement les valeurs mesurées. Les tensions différentielles de l'amplificateur en x et y ont été mesurées pour une plage de déplacement des différentes étoiles sur le capteur 4 cadrans. La référence 0 est lorsque l'étoile à son centre de gravité lumineux au centre du capteur 4 cadrans. Nous mesurons alors la position absolue de l'étoile par rapport au centre du capteur. Les mesures ont été effectuées pour 3 diamètres d'étoiles, 150, 100 et 50 microns. Pour chaque diamètre d'étoile, la puissance lumineuse a été mesurée à l'aide d'un appareil de mesure de puissance lumineuse (power meter), qu'il suffit de placer à la place du capteur 4 cadrans.



Figure 57: power meter

puissance lumineuse	
étoile 150 microns	15.3μW
étoile 100 microns	10.1 μW
étoile 50 microns	8.7 μW

Tableau 7 : puissance lumineuses des étoiles simulées

Selon les diamètres d'étoiles, la tension d'alimentation du circuit a été modifiée, tous les paramètres de mesures ainsi que les conditions se trouvent en annexes.

Tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile de 150μm

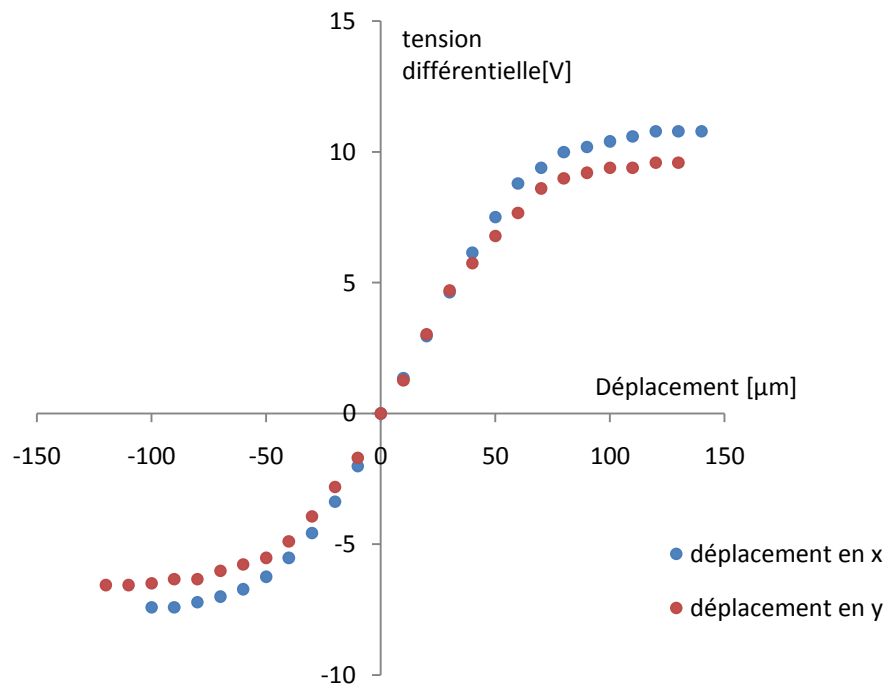


Tableau 8 : tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile de 150 microns

¹³ Les tableaux de mesure bruts sont en annexe 13

Tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile de 100 μ m

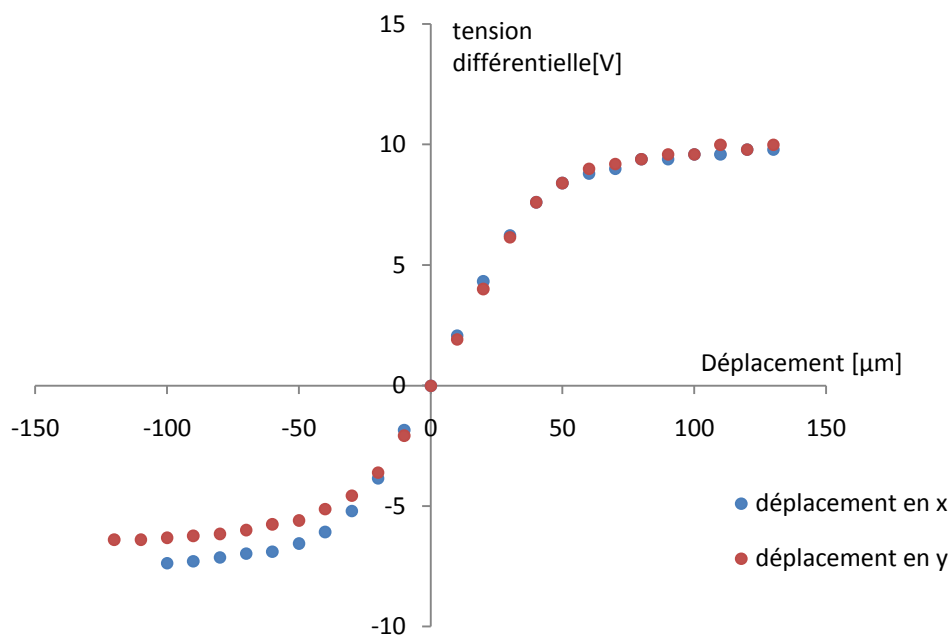


Tableau 9: tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile de 100 microns

Tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile de 50 μ m

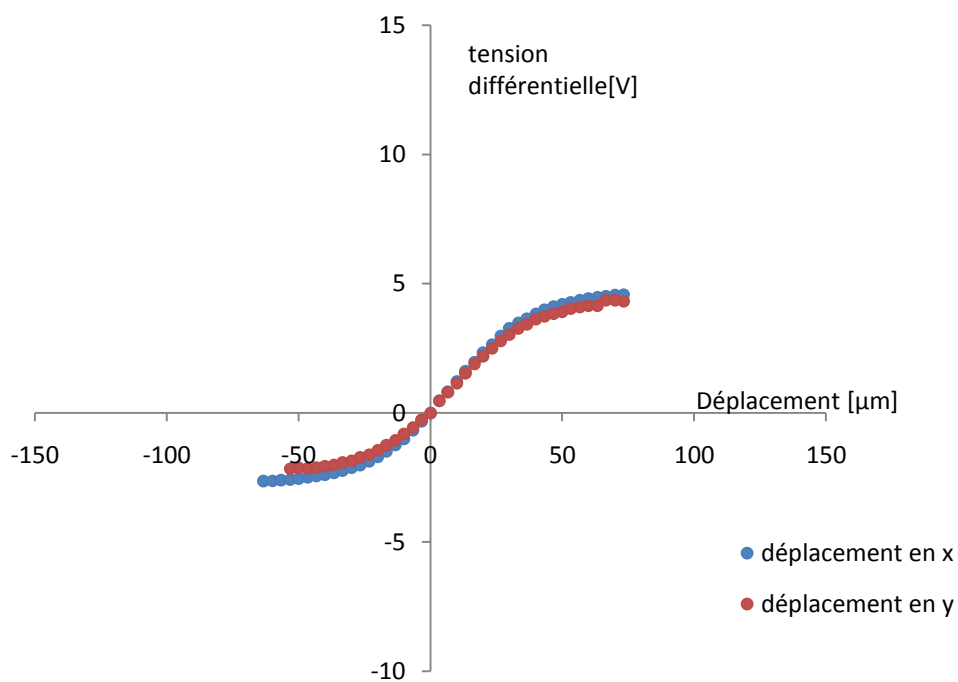


Tableau 10: tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile de 50 microns

Tension différentielle en fonction de la position absolue d'une étoile

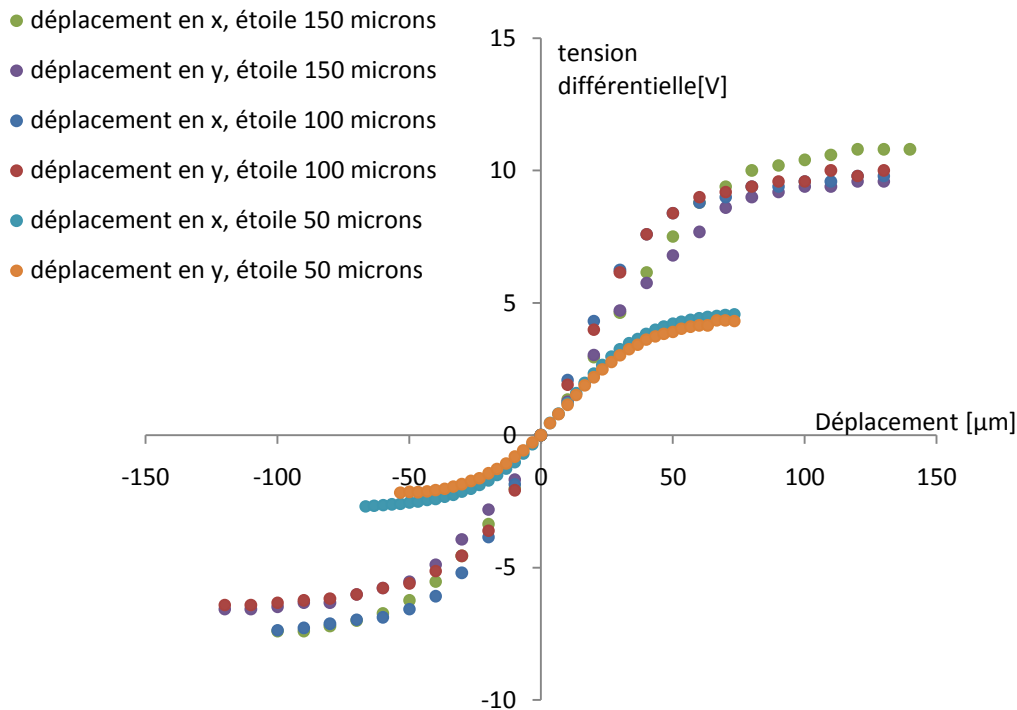


Tableau 11 : tension différentielle en fonction de la position absolue des différentes étoiles

Problèmes rencontrés lors des mesures

- Un fort niveau de bruit était présent sur les signaux mesurés, générant alors une tache lumineuse relativement grande. Après analyse du bruit présent sur un signal, nous avons pu constater que le signal était perturbé par le réseau 50Hz de l'environnement du laboratoire. En effet, on voit clairement un sinus de période 20ms sur les signaux, en augmentant l'échelle. Bien que le champ magnétique soit faible, il suffit donc à induire des courants dans les fils reliant la photodiode à l'amplificateur. Afin de pallier à ce problème, les fils ont été raccourcis et mis en torche afin de diminuer la surface créée par une paire de fil (boucle), et de ce fait, diminuer l'induction. Ce bruit se retrouve alors fortement diminué et n'est presque plus visible.

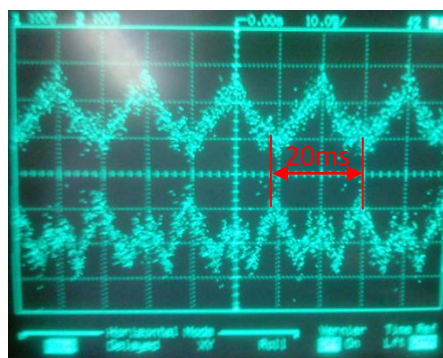


Figure 58 : perturbations électromagnétiques par le réseau 50 Hz

- Une première tentative de banc optique avait été faite en illuminant un trou avec une source diffuse afin de l'imager ensuite avec l'objectif de microscope. Cependant, nous avons alors une double image (trou et source diffuse) et ceci rendait le signal mauvais, surtout lors de déplacements en x ou y. En effet, le trou et la source n'étant pas à la même distance, le déplacement de l'un ou l'autre sur le capteur n'était pas le même. C'est pourquoi nous avons remplacé ce système par une fibre optique, qui rend plus homogène la tache lumineuse sur le capteur lors des déplacements.
- L'amplificateur utilisé utilise un diviseur analogique afin de normaliser le signal de sortie à $\pm 10V$. Ceci est néfaste dans le cas de signal faible car si le dénominateur devient petit, la sortie devient maximum. Ainsi pour des puissances lumineuses trop faibles, le signal n'était pas utilisable. **Une bonne idée serait de développer un amplificateur pour photodiode 4 cadrans sans diviseur.** Lors de la mesure pour l'étoile de 50 microns, la lumière ambiante a été laissée afin d'ajouter un offset à l'intensité lumineuse. Sans cela, l'intensité n'était pas suffisante et le signal inutilisable. On remarquera cependant la bonne sensibilité du capteur qui malgré un offset relativement élevé par rapport à l'intensité de l'étoile, détecte les faibles variations d'intensité.

Conclusion

Nous pouvons dire que la tension nous indique un ordre de grandeur du déplacement de l'étoile. Cependant il est à souligner que cette relation n'est pas rigoureusement la même pour les différentes tailles d'étoiles. Le déplacement de l'étoile par le système de correction devra alors corriger le déplacement de l'étoile en boucle fermée, sachant que la mesure de la position de l'étoile n'est qu'un ordre de grandeur. **Le système de correction étant en boucle fermée, l'objectif est alors uniquement de rester centré sur les consignes initiales, qui ne sont que les tensions différentielles initiales au centrage de l'étoile. Il n'est donc pas primordial d'avoir la position exacte de l'étoile.** On remarque avec le graphique ci-dessous qu'une régression linéaire sur une plage de $\pm 50\mu m$ donne un ordre de grandeur de $1.08 V/10\mu m$ lors du déplacement de l'étoile (toutes tailles confondues). Ces mesures valident le fait qu'une lecture approximative de la position d'une étoile est possible.

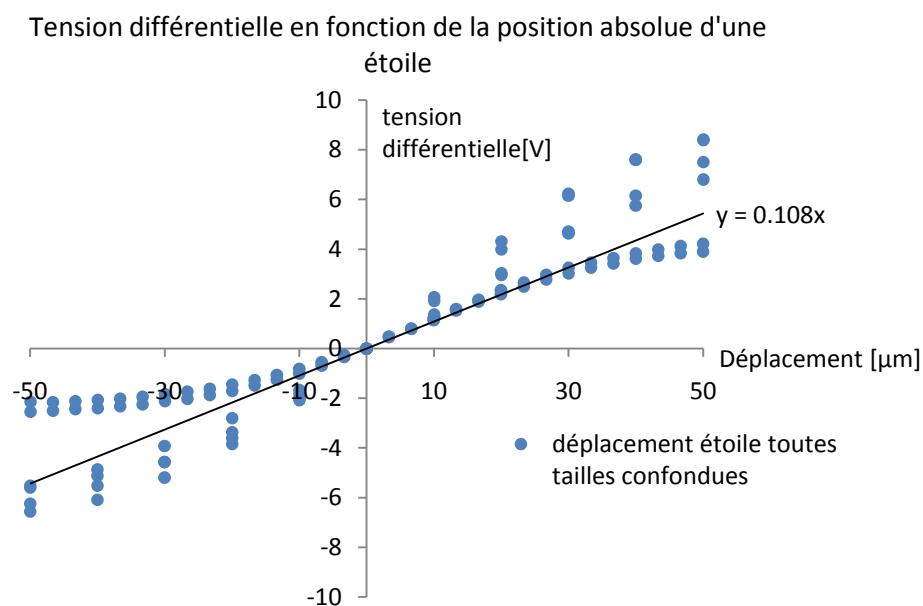


Figure 59 : tension différentielle en fonction de la position absolue, régression linéaire

On soulignera aussi que l'interface réalisée mesure parfaitement les tensions différentielles et affiche correctement la position de l'étoile. La résolution du module Labview NI USB 6608 (12 bits) est alors amplement suffisante.

La puissance lumineuse minimum est d'environ $10\mu\text{W}$, soit très loin de la puissance théorique minimum détectable, soit 16.7nW pour ce capteur. Nous devrions donc pouvoir l'atteindre bien mieux en utilisant des amplificateurs sans module de division. **Il est alors nécessaire de développer un amplificateur propre à cette application pour des performances raisonnables.**

8.4 Mesure du gain de la photodiode APD

8.4.1 Banc d'essai optique n°2

L'objectif de ce banc est de mesurer le courant généré par la photodiode APD en fonction de la tension de « bias » (voir schéma de câblage). Cette tension de bias amplifie l'effet avalanche et donc le gain (en A/W) de la photodiode.

Le banc d'essai est identique à celui utilisé pour les mesures précédentes. Aucun diaphragme n'a été utilisé, le diamètre de l'objet est donc de 1mm. Un grandissement de -0.33 a été utilisé ($p=114.18\text{mm}$ et $p'=37.68\text{mm}$), l'étoile a alors un diamètre de $333\mu\text{m}$. Aussi, la puissance lumineuse mesurée est de $46\mu\text{W}$. L'émetteur est identique au banc d'essai précédent : une LED infrarouge 870nm.

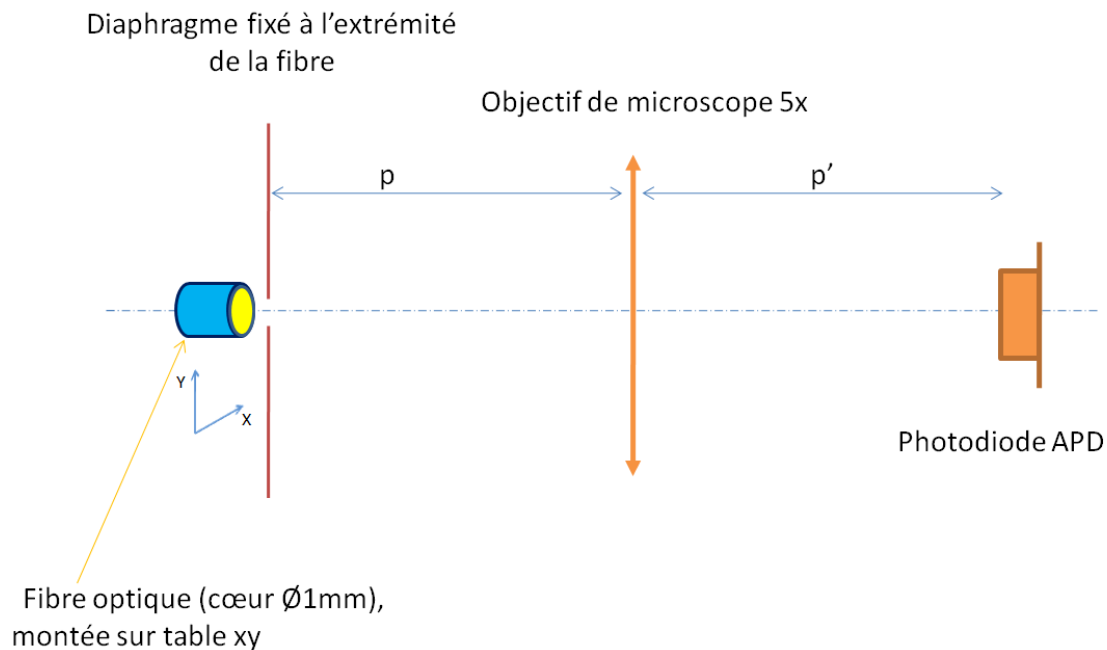


Figure 60 : banc d'essai optique n°2

Le schéma électronique de mesure permet la lecture du courant et l'alimentation en haute tension DC. La tension de bias maximum aux bornes de la photodiode APD a été augmentée jusqu'à 170 VDC. Une résistance en parallèle $R2 = 1\text{k}\Omega$ au circuit a été montée afin de stabiliser l'alimentation en lui imposant un courant minimum. Sans cette dernière, le courant est trop petit et l'alimentation est régulée de manière instable en dessous de 50VDC.

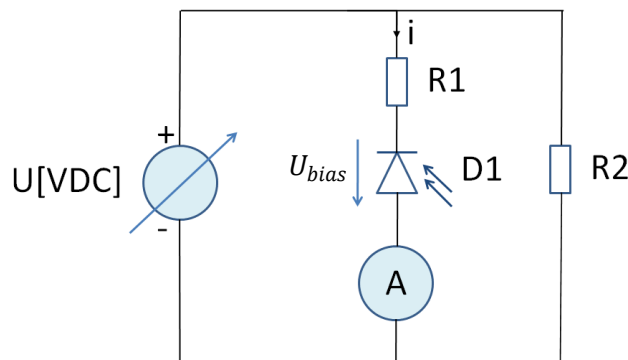


Figure 61 : Schéma de câblage du banc d'essai n°2

La résistance R1 assure limitation de courant de la photodiode. La tension de bias est donnée par

$$U_{bias} = U - R_1 * i$$

8.4.2 Résultats ¹⁴

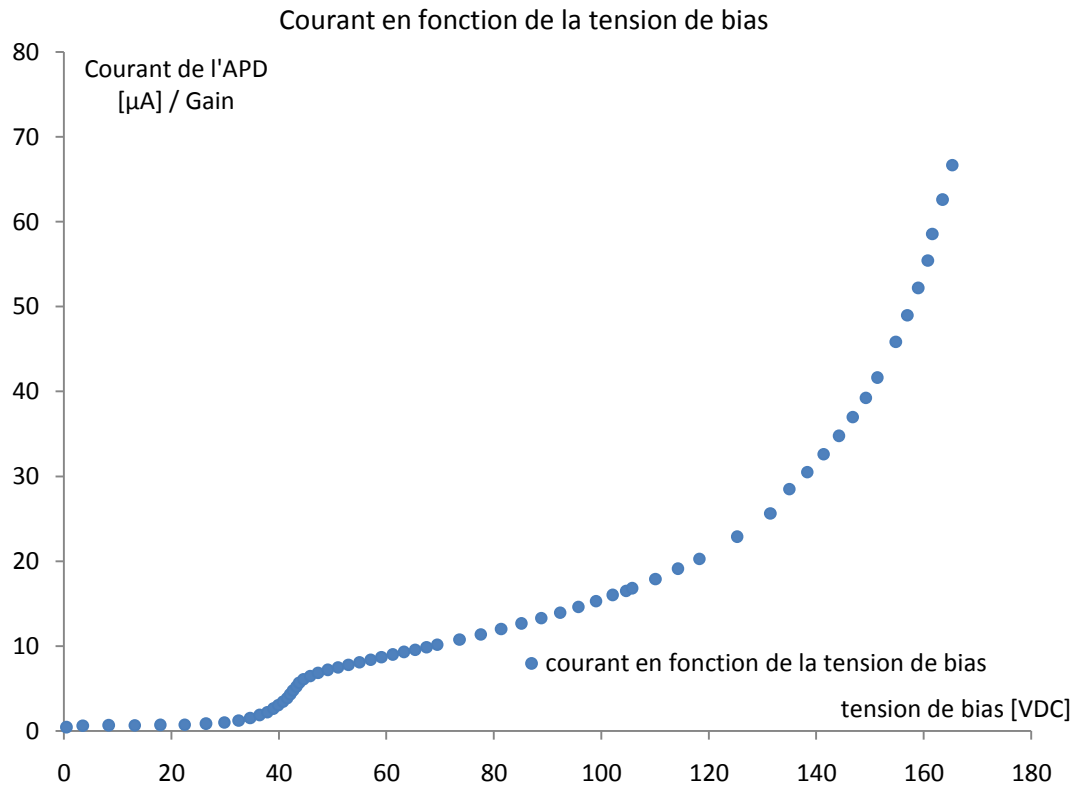


Figure 62 : Courant/Gain en fonction de la tension de bias

Entre 0VDC et 20VDC, le gain est de 1, et le courant vaut approximativement 1 μ A. De ce fait, le graphique représente non-seulement le courant, mais aussi le gain de la photodiode.

Conclusion

On soulignera que le gain est de 80 pour une tension de bias de 170VDC. Ceci démontre qu'un gain de 80 peut être obtenu par une photodiode à avalanche, on améliore alors la détectivité de l'autoguideur d'un facteur 80 par rapport à une photodiode standard! **La première phase d'optimisation est alors validée. Un net gain serait obtenu par le remplacement de la photodiode 4 cadrans standard par une photodiode 4 cadrans APD.**

¹⁴ Les tableaux de mesure bruts sont en annexe 13

8.5 Essai mécanique et interface

Le système mécanique complet a pu être monté et testé¹⁵. Le montage s'est effectué sans problème apparent. Les fonctions de l'interface ont été toutes testées et validées avec le système mécanique, à savoir :

- Calibration des zéros absolus
- Atteindre une position absolue
- Affinement de la position sur l'étoile

La précision du système n'a pas pu être mesurée car une mesure optique aurait été nécessaire pour une résolution de mesure de l'ordre du micron et afin de ne pas influencer le système par une force externe. Cependant, nous avons pu mesurer des déplacements à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de 0.02mm. **Pour des grands déplacements de l'ordre de 5 mm à une vitesse de 250 pas/s, la position absolue était exacte.** On assure alors une position absolue avec une précision de ± 20 microns. Bien entendu, il faudrait valider une plus haute précision avec un instrument de mesure plus appropriée, comme précité, pour obtenir une résolution de mesure du micron.

Aucune cale entre les écrous n'a été montée car leur nécessité n'était pas certaine. En assemblant de manière adroite les 2 écrous (en les appuyant chacun contre le filetage pour annuler le jeu), la cale n'est pas nécessaire puisque la précision mesurée est bonne. Cependant, une mesure future plus précise permettrait de valider cette affirmation.

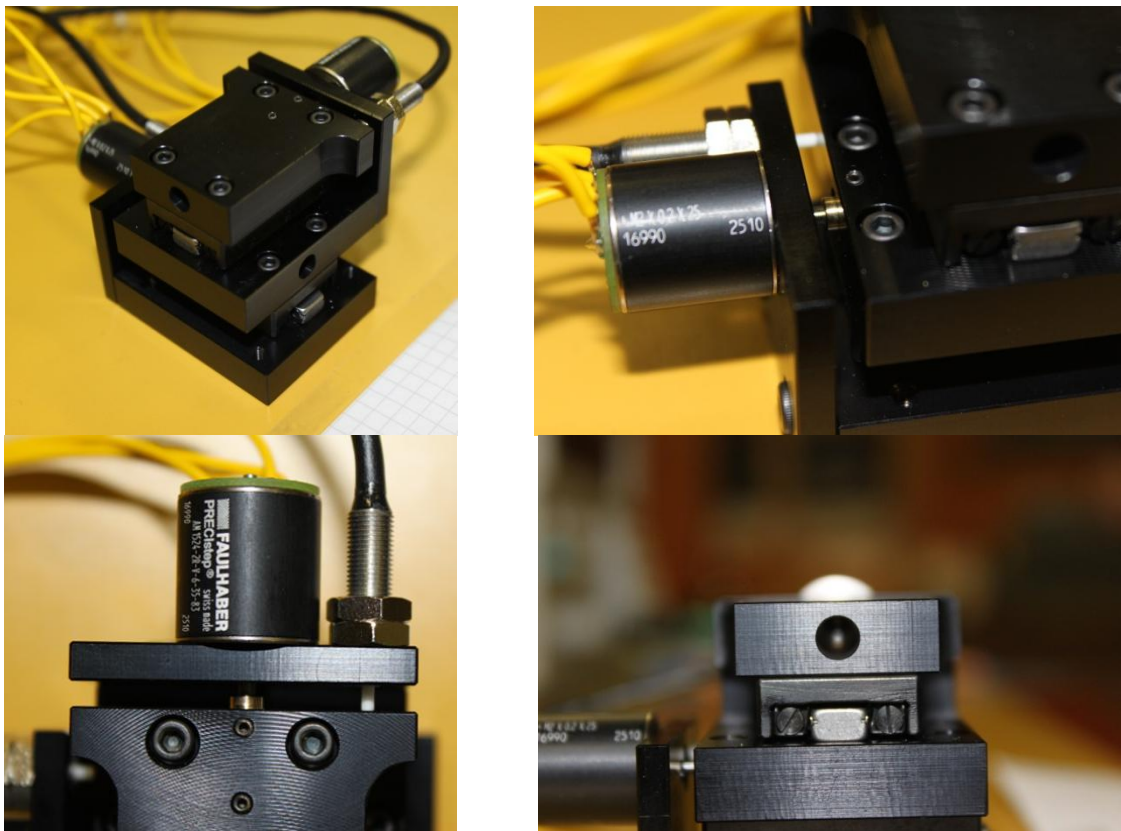


Figure 63 : vues de la platine xy

¹⁵ Des vidéos sont disponibles sur le CD du travail de diplôme, dossier « Vidéos »

Nous avons pu vérifier qu'un profil trapézoïdal n'était pas nécessaire pour cette application. En effet, les déplacements effectués ont toujours été mesurés avec une précision inférieure à 20 microns (résolution du pied à coulisse) par rapport au déplacement souhaité. Ceci démontre qu'un nombre maximum de 2 pas aurait pu être sautés. Cependant, il est rare de ne sauter qu'un ou deux pas si le couple est trop élevé. On peut alors dire qu'aucun « pas » (cycle) n'a été sauté. Une mesure plus précise pourrait le confirmer. Bien évidemment, ces tests ont été effectués dans la position de la platine nécessitant le couple maximum.

Le driver permettant d'effectuer des demi-pas, nous en avons faits l'essai par curiosité et avons pu constater que le moteur, même dans la position nécessitant le plus grand couple, **pouvait effectuer des demi-pas** sans sauter de cycle. Ceci permet alors d'effectuer des déplacements de 4.15 microns par demi-pas.

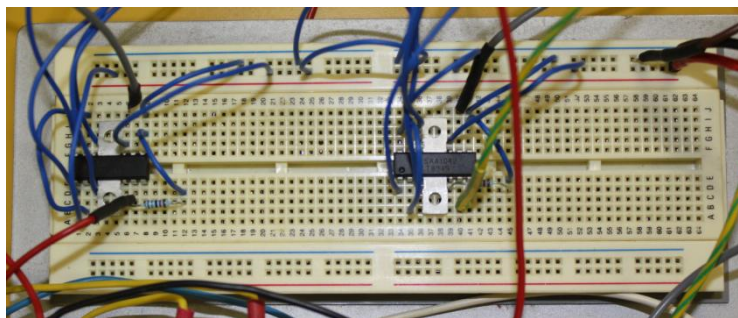


Figure 64: câblage des drivers des moteurs

Les fins de course permettent une position absolue excellente. En mesurant toujours avec une précision de 0.02mm, le zéro absolu était toujours exact à chaque calibration. Là aussi, une mesure plus fine serait nécessaire.

La platine ainsi que le capteur n'ont pas été monté dans le boîtier prévu, afin de faciliter les essais. Cependant, un pin-out du connecteur SUB-D 26 pôles est proposé en annexe.¹⁶

Le montage de l'autoguideur avec le télescope est aussi validé, cependant il reste une seule bague d'adaptation à commandé afin de fixer le tout au télescope (entre le tip-tilt et le filetage du télescope). On peut voir ci-dessous le système de correction complet, comprenant le tip-tilt réalisé par David Gloor, le beam-splitter fourni, ainsi que l'autoguideur.

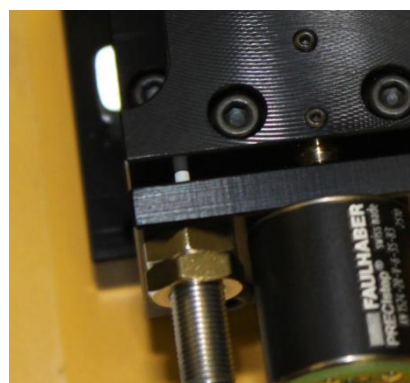


Figure 65 : capteur de position

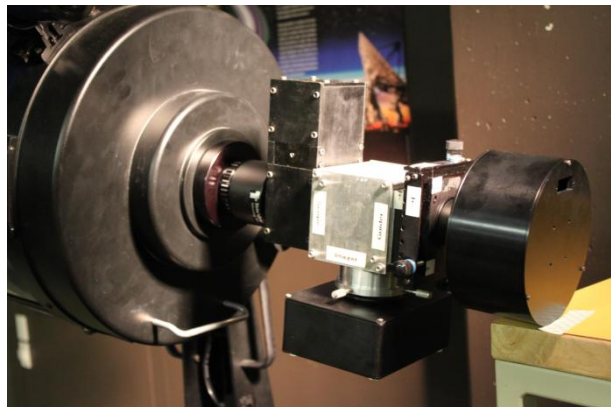


Figure 66 : vues de l'ensemble tip-tilt, beamsplitter, et autoguideur

¹⁶ Annexe 14

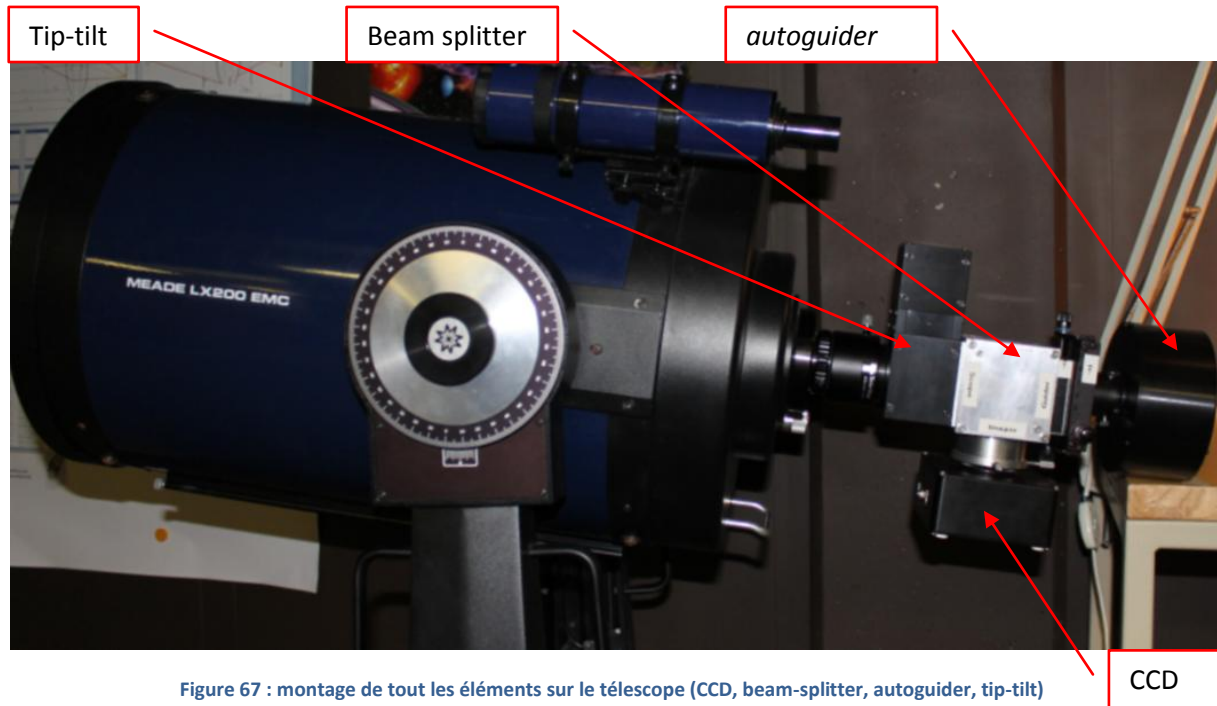


Figure 67 : montage de tout les éléments sur le télescope (CCD, beam-splitter, autoguideur, tip-tilt)

8.6 Synthèse

Les essais sont concluants. Non seulement la mesure de la position de l'étoile est possible, mais nous avons pu valider l'utilisation d'une photodiode à effet avalanche. La mesure de position n'est toutefois pas aussi précise qu'attendue, cependant, l'application ne demande pas une position absolue exacte, mais un ordre de grandeur afin de savoir dans quel sens corriger la position de l'étoile ainsi que l'ordre de grandeur du déplacement. Rappelons qu'il n'est pas utile de corriger des déplacements inférieurs à 10 microns, correspondant à la taille approximative d'un pixel de la CCD.

La puissance lumineuse minimum n'est pas suffisante avec l'amplificateur utilisé. Il faudrait développer un amplificateur sans module de division, calibré pour cette application. L'ajout d'un offset lumineux n'est pas une bonne idée dans un tel système optique. Cependant, on pourrait imaginer simuler un offset lumineux de manière artificielle, en créant un offset sur le courant (de manière électronique) avant le diviseur. Le problème de l'amplification est à résoudre avant de pouvoir tester concrètement le système sur une étoile réelle à faible puissance.

Le fonctionnement de la platine a aussi pu être validé jusqu'à une précision de $\pm 20\mu\text{m}$, faute d'instrument de mesure plus précis et de temps. Les tests effectués valident aussi l'interface Labview pilotant la platine xy. Toutes les fonctions réalisées sont fonctionnelles. Les résultats sont plus qu'encourageants puisque la résolution peut être élevée à 4.15 microns en mode demi-pas.

Du temps a manqué pour la mise en commun de la partie optique et mécanique, mais cela ne devrait pas poser de problème puisque chaque partie a été validée séparément. Il s'agit donc uniquement de fixer le capteur sur la platine pour faire fonctionner le tout ensemble. L'interface est prévue pour utiliser l'ensemble final et ne demande alors aucune modification lors de la mise en commun du tout.

L'isolement de l'étoile n'a pas été abordé dans la phase d'essai. Si des étoiles « parasites » sont dans le champ de vue, il faudrait vérifier si elles ne génèrent qu'un offset ou si elles perturbent la mesure. Cet essai sera plus pratique à faire lorsque le système sera monté sur le télescope. Si perturbations il y a, il pourrait s'avérer utile d'ajouter un capuchon troué de faible diamètre (150 microns) sur la photodiode.

9 Perspective de développement ultérieur

Afin que le système soit utilisable sur le télescope de l'école, différents points seront à régler.

- Validation de la précision de la platine de déplacement xy, inférieure à 20 microns
- Le capteur 4 cadrans doit être remplacé par un capteur 4 cadrans APD. Une électronique adaptée doit aussi être développée afin de conditionner la photodiode APD, un bon dimensionnement de l'électronique supprimerait la nécessité d'un diviseur (utilisé en général pour normaliser le signal).
- L'interface doit être améliorée afin de pouvoir interfacer avec la CCD du télescope et ainsi permettre le centrage automatique du capteur sur une étoile à sélectionner dans le champ de vue de la CCD.
- L'interface doit être mise en commun avec celle réalisée par David Gloor, travaillant sur le système tip-tilt. Une régulation doit aussi être réalisée pour que l'actionneur (tip-tilt) travaille de manière correcte et en boucle fermée avec le capteur 4 cadrans.
- Un système peltier pourrait être ajouté pour optimiser le système.
- Test pour avérer l'utilité ou non d'un capuchon troué sur la photodiode pour l'isolement de l'étoile.
- Finalement, la mise en commun des interfaces avec celles prévues pour la gestion de l'observatoire pourrait aboutir à une interface complète accessible via Internet.

10 Conclusion

La partie recherche du travail de diplôme a été intéressante et extrêmement nécessaire. Je suis content d'avoir pu apprendre et mettre en pratique de nombreuses notions d'astronomie. Un sujet qui m'a très intéressé a été aussi le choix des capteurs optiques, notamment la compréhension des propriétés de ces derniers.

La partie mécanique de ce travail a été plus complexe que prévu, étant donné la précision à atteindre. De plus, le dimensionnement des moteurs n'a pas été évident car étant donné la taille très petite du système, le poids des éléments entraînait considérablement en jeu. Il a fallu alors vérifier le poids de chaque élément et assurer que les moteurs puissent avoir suffisamment de couple. Le système étant fait par étage, une simple modification demandait parfois à changer de moteur.

La partie interface a été très bénéfique. Non seulement elle a simplifié énormément les communications avec les instruments de mesures, mais elle a permis de piloter les moteurs pas-à-pas. La programmation a toutefois été laborieuse pour l'implémentation de la commande des moteurs. Il a fallu apprendre à changer de manière de réfléchir pour implémenter certains algorithmes avec Labview. En effet la programmation de boucles, conditions, et d'algorithmes n'est pas très intuitive avec ce programme. L'interface est maintenant fiable.

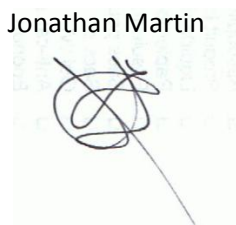
Les essais réalisés ont été pour moi la phase la plus intéressante de ce travail. J'ai pu réaliser des bancs d'essai optiques, et ai pu acquérir beaucoup d'expérience dans ce domaine. Aussi, le test final de l'interface couplé à la mécanique est très valorisant. En effet, savoir que ce que l'on a développé fonctionne correctement et répond aux exigences est encourageant. Grâce au temps passé au laboratoire seul, j'ai appris à être autonome et à oser prendre des décisions seul.

Les objectifs principaux ont été atteints, le concept a pu être validé, tant d'un point de vue mécanique qu'optique. Cependant, un autre système d'amplification de la photodiode doit être utilisé pour atteindre la détectivité souhaitée. Un travail complémentaire d'électronique est donc à envisager. Une validation plus poussée de la précision de la platine serait aussi important avant de monter le système complet sur le télescope.

Je suis satisfait de mon choix de travail de diplôme, de par sa pluridisciplinarité, et je remercie le ciel de m'avoir offert un projet aussi intéressant...

Maracon, le 09.07.2010

Jonathan Martin



11 Références

Livres, publications

- Les capteurs en instrumentation industrielle, Georges Asch, p.125-222, édition 1983
- Composants de la microtechnique, EPFL, Prof R.Clavel, édition mars 2003
- Les vis de mouvements, HEIG-VD, Prof G.Mischler, édition 2007
- The design, Development and Performance of a Quadrant Photosil Autoguideur for the Cambridge Schmidt Telescope, ESO Astronomy and Physics, 1977
- Autoguideur for Optical Telescopes, Irish Astronomical Journal, 1977
- Cours d'optique HEIG-VD : les Télescopes, Docteur Lorenzo Zago, 2010
- The effect of the local atmospheric environment on astronomical observations. Thèse EPFL, no 1394 (1995), Lorenzo Zago
- Electronic imaging in astronomy: detectors and instrumentation, Ian S. McLean, 2008

Internet

- <http://www.freewebs.com/eq6modfr/eqspeed.htm>
- http://jlv.duhamel.free.fr/etudes/erreur_periodique/erreur%20periodique.htm
- http://mimule.free.fr/lzago/h_thesish_thesis.html
- <http://www.astrosurf.com/ccdbazar/D-Observations/HResolution/HauteResol01.html>
- <http://www.astrosurf.com/altaz/diametre.htm>
- <http://shop.newscaletech.com/productcart/pc/viewPrd.asp?idcategory=3&idproduct=5>
- <http://www.elliptec.com/robots.txt/produkte/motor-x15g/konstruktion.html>
- <http://www.faulhaber.com/>
- http://www.schneeberger.com/technicalData.de.fr.do?content=1_1_3_Slides_ND_tec_size1¶m=spec_dimensions_nd
- <http://astrosurf.com/luxorion/photo-numerique3.htm>

12 Liste des figures

Figure 1 : effet de la diffraction sur la résolution d'un télescope	9
Figure 2: schématique et photo d'une monture équatoriale.....	10
Figure 3 : exemple d'erreur périodique relevée sur une monture équatoriale.....	11
Figure 4 : à gauche : image de départ $t=0$ s, à droite : image après 5min	11
Figure 5 : erreur périodique dû au mauvais alignement de l'axe polaire et aux engrenages du télescope	11
Figure 6 : effet du seeing sur le plan focal au fil du temps	12
Figure 7 : à gauche : PSF pour un télescope dans le vide, à droite : PSF pour un télescope réel, avec seeing	13
Figure 8 : Puissance d'une étoile en fonction de sa magnitude pour un télescope $D=0.305m$	17
Figure 9 : erreurs périodiques avec PEC (rouge) et sans PEC (vert), mesurées sur un LX200 12"	18
Figure 10 : guidage avec lunette en parallèle	19
Figure 11 : à gauche : image avec correction (autoguidage), à droite : image sans correction.....	20
Figure 12 : mesure des erreurs périodiques de la transmission lors du suivi d'une étoile	20
Figure 13 : schématique d'un photomultiplicateur à 4 anodes et montage sur le télescope auxiliaire.....	21
Figure 14 : principe d'un tip-tilt.....	22
Figure 15 : télescope Meade	23
Figure 16 : caméra CCD SBIG ST402	23
Figure 17 : schématique du principe de mesure	24
Figure 19 : étoile guide dans le domaine isoplanétique	25
Figure 18 : champ de vue bien supérieur à la taille de l'étoile guide.....	25
Figure 21 : schéma du conditionnement du capteur 4 cadrans.....	26
Figure 20 : système Peltier miniature	26
Figure 22 : image mobile, capteur fixe.....	27
Figure 23 : image fixe, capteur mobile	27
Figure 24 : isolement de l'étoile guide par trou/diaphragme	29
Figure 25 : la sensibilité d'une CCD ST-4, disponible à l'HEIG-VD, supérieur à la moyenne	32
Figure 26 . Exemple type de la sensibilité d'une photodiode 4 cadrans	34
Figure 27: Exemple type de la sensibilité et du gain d'une photodiode APD	35
Figure 28 : moteur piézoélectrique Elliptec X15G.....	39
Figure 29 : moteur piézoélectrique Squiggle 3.4.....	39
Figure 30 : schématique du concept optimal.....	41
Figure 31 : schématique du concept de validation	42
Figure 32 : première esquisse de la platine.....	43
Figure 33 : platine xy, vue générale	43
Figure 34 : vues en coupe du 1 ^{er} étage de la platine xy	44
Figure 35: vue 3D d'un guidage miniature	44
Figure 37 : statique des forces dans la position la plus défavorable, en bleu→ éléments déplacés par le 1 ^{er} étage.....	45
Figure 36 : montage du moteur et transmission.....	45
Figure 38 : transformation du couple en force axiale par le système vis-écrou	46
Figure 39 : inerties présentes	47
Figure 40 : couples présents lors de la montée.....	48
Figure 41: à gauche : extrait de la fiche technique du moteur AM1524 , à droite : extrait de la fiche de la vis-sans-fin / écrou	49
Figure 42 : système complet	50
Figure 43 : montage de l'autoguideur au télescope (tip-tilt non présenté sur cette image).....	50
Figure 44 : schéma bloc général de l'interface.....	52

Figure 45 : schéma de câblage de l'interface Labview/actuateurs-capteurs	52
Figure 46 : schéma de programmation Labview	53
Figure 47 : visualisation de l'interface	54
Figure 48: amplificateur pour photodiode	56
Figure 49 : module I/O Labview NI USB 6008	56
Figure 50 : photodiode 4 cadrans.....	56
Figure 51 : Schéma de câblage du montage.....	57
Figure 52 : banc d'essai optique n°1.....	57
Figure 53 : schéma optique de l'objectif de microscope utilisé.....	58
Figure 54 : schéma de câblage du système d'illumination par fibre optique	59
Figure 55 : banc optique complet	60
Figure 56 : vues du montage	60
Figure 57: power meter.....	62
Figure 58 : perturbations électromagnétiques par le réseau 50 Hz.....	64
Figure 59 : tension différentielle en fonction de la position absolue, régression linéaire.....	65
Figure 60 : banc d'essai optique n°2.....	67
Figure 61 : Schéma de câblage du banc d'essai n°2	67
Figure 62 : Courant/Gain en fonction de la tension de bias	68
Figure 63 : vues de la platine xy	69
Figure 66 : vues de l'ensemble tip-tilt, beamsplitter, et autoguideur.....	70
Figure 64: câblage des drivers des moteurs	70
Figure 65 : capteur de position	70
Figure 67 : montage de tout les éléments sur le télescope (CCD, beam-splitter, autoguideur, tip-tilt). 71	

13 Remerciements

Je tenais à remercier en particulier M.Zago pour le travail de diplôme proposé, peu de travail de diplôme sont aussi variés et ...microtechniques !

Mes remerciements vont aussi à mes collègues de classe, avec qui j'ai eu la chance de passer ces 3 années en leur bonne compagnie.

A ma famille et mes ami(e)s proches, qui m'ont supporté lorsque la fatigue du travail se faisait fortement ressentir.

A M.Dumusc, M.Mayor, M.Mentano pour leur aide technique.

Aux personnes ayant de loin ou de près participé au succès de ce travail, notamment à M.Ottonin et son équipe de polymécaniciens, pour leur excellent travail, ainsi qu'à Marco Spano pour ses conseils très sages et constructifs.

14 Annexes

(1) Code Matlab

```
%% Travail de diplôme
% Auteur : Jonathan Martin
% Date : 27.02.2010

%% Init

clc;
close all;
clear all;
Fig=1;

%% Calcul de la puissance d'une étoile selon le diamètre du télescope

D = 0.305;    % [m] Diamètre du télescope
f = 3.048;    % [m] Focale du télescope
M_soleil = -26.73;    %Magnitude du Soleil
E_soleil = 1350;    %[W/m^2]Eclairement du Soleil

magnitude_min = -27;
magnitude_max = 15;
magnitude = linspace(magnitude_min,magnitude_max, (-
magnitude_min)+magnitude_max+1)
puiss_lumineuse = E_soleil*pi*D^2/4*10.^((-26.73-magnitude)/2.5);

semilogy(magnitude,puiss_lumineuse)
xlabel ('Magnitude [-]'), ylabel ('Puissance lumineuse [W]'),
title('Puissance lumineuse d'une étoile en fonction de sa magnitude ')
grid on
```

(2) Datasheet Moteur AM1524



Stepper Motors

6,0 mNm

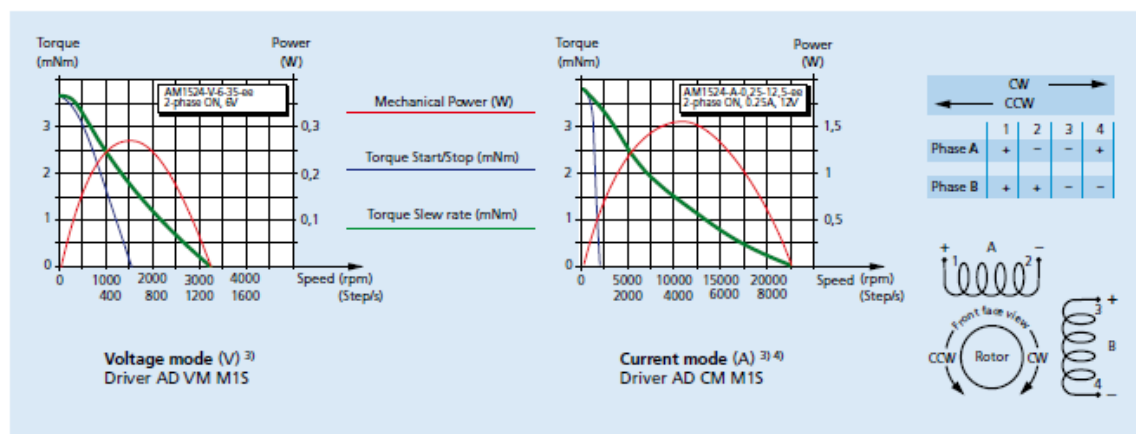
Two phase, 24 steps per revolution
PRECiStep® Technology

AM1524-ww-ee

ww =	V-6-35	V-12-150	A-0,25-12,5	A-0,45-3,6	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				·10 ⁻⁹ kgm ²
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

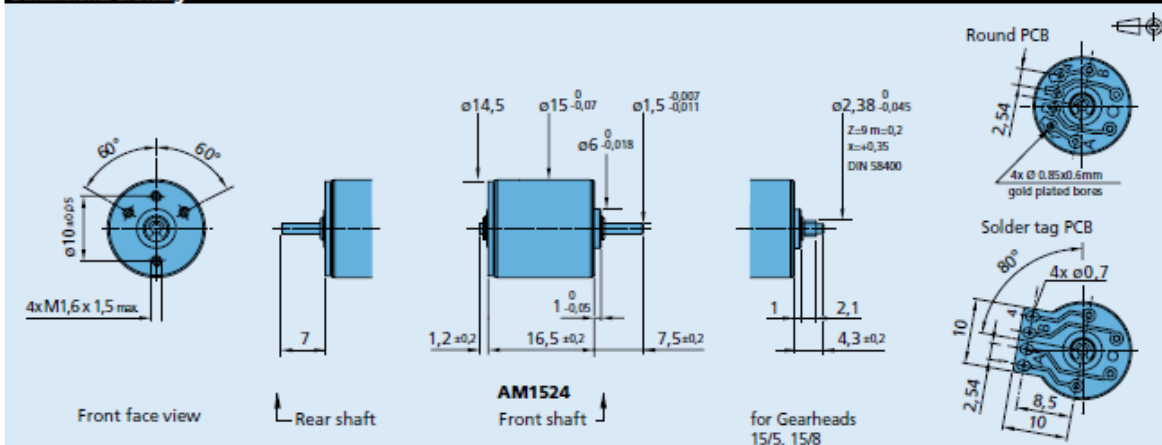
³⁾ Curves measured with a load inertia of 10 · 10⁻⁹ kgm²
⁴⁾ Testing the motor at lower supply voltages in current mode will result in a decrease in torque at higher speed, even with the same current setting


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

Dimensional drawing



Combinations

Drive Electronics	Encoders	Stepper Motors	Gearheads / Lead screws
			
AD VL M_S AD VM M_S AD CM M_S	AE 23B8	AM1524	15A 15/5 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	Bearings (rr)	Winding (vv)	Motor execution (ee)		
AM = Motor design 15 = Motor diameter (mm) 24 = Steps per revolution	Special lubricant options available - (sleeve bearings) -2R (2 ball bearings)	-V-3-10 ¹⁾ -V-6-35 -V-12-150 -V-24-590 ¹⁾ -A-0,25-12,5 -A-0,45-3,6	Only front output shaft -55 (-05) -57 (-07) -70 (-72) -83 (-23)	With double output shaft -54 (-04) -56 (-06) -71 (-73) -04-0904 ⁴⁾ -06-0904 ⁴⁾ -73-0904 ⁴⁾ -82 (-22)	Front output shaft Plain shaft, L=7,5 mm ²⁾ Pinion 15/5, 15/8 Plain shaft, L=4,3 mm ²⁾ Idem -04 Idem -06 Idem -73 Plain shaft ³⁾
(*) Designation for motors with solder tab PCB					

() 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

(3) Datasheet vis sans fin



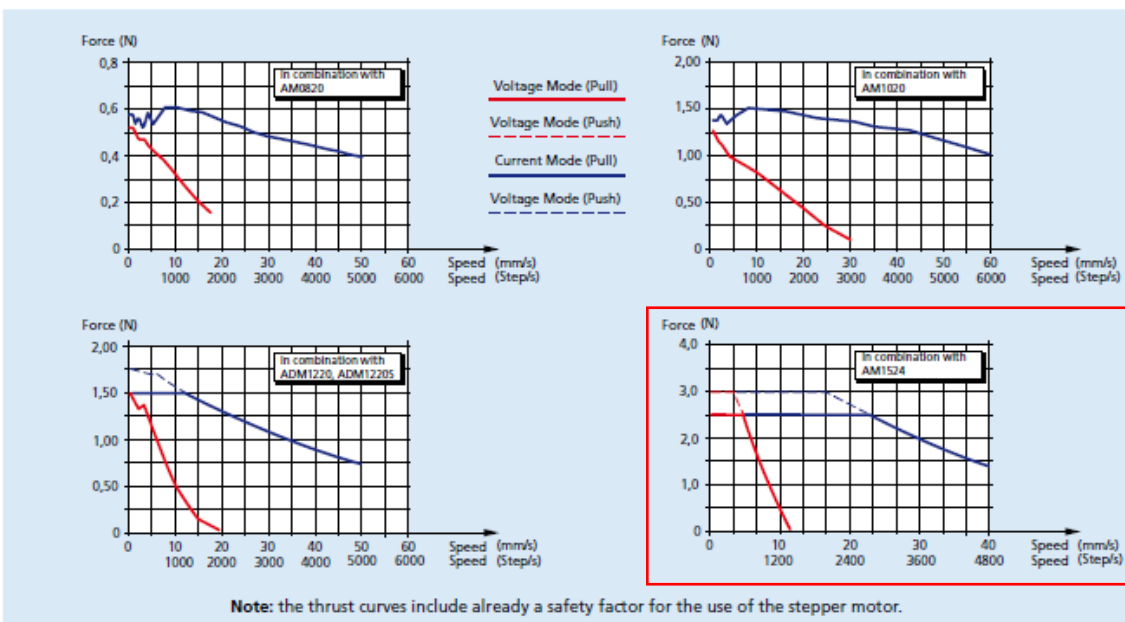
Lead Screw

Linear actuation for positioning tasks
PRECiStep® Technology

For combination with
Stepper Motors: AM0820, AM1020, ADM1220,
ADM1220S, AM1524

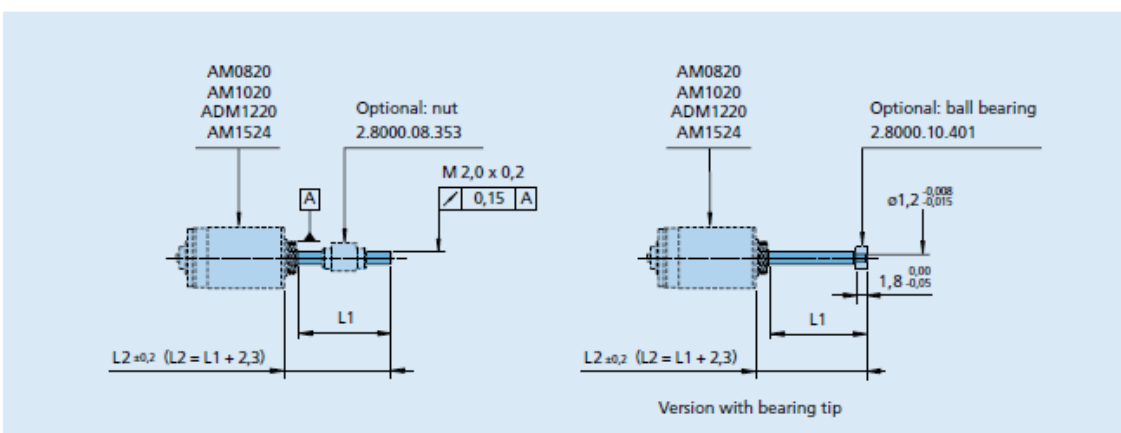
Series M2 x 0,2 x L1

Nominal diameter	2,0	mm
Diameter over the flanks (min./max.)	1,83 / 1,85	mm
Pitch	0,2	mm
Precision (per pitch)	< 0,5	µm
Material	316L	



Ordering information	L1 (mm) =	7,5	15	25	Custom
Order code (no bearing tip)		M2x0,2x7,5	M2x0,2x15	M2x0,2x25	M2x0,2xL1*
Order code (with bearing tip)		-	M2x0,2x15T	M2x0,2x25T	M2x0,2xL1*T

* For custom length, please inquire with your point of sales



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

(4) Datasheet fin de course Omron

High-precision Switch

D5A

CSM_D5A_DS_E_2_1

High-precision Switch for Detecting Micron-unit Displacement

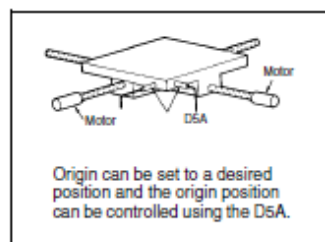
- Ideal for detecting and measuring wear of cutting tools or for original point of work.
- Ceramic plungers on M5, M8, and slim models for superior abrasion resistance and resistance to temperature changes.
- Direct input possible to microprocessors and programmable controllers.
- A version with screw-type cable connector available for easy installation and maintenance.



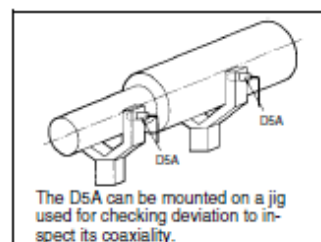
⚠ Be sure to read Safety Precautions on page 5 to 6 and Safety Precautions for All Limit Switches.

Application Examples

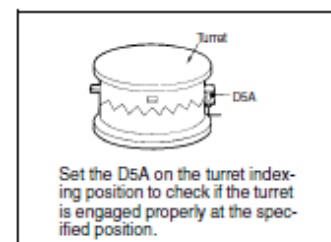
Origin Position Control of an X-Y Table



Coaxiality Inspection



Checking Turret Indexing Position



Ordering Information

Contact Output Models (NC Contact)

Actuator	Type	Operation Indicator	Repeat accuracy	Operating force OF max.	Cable lead outlet		Degree of protection	Model	
					Lead outlet	Length			
 Pin plunger	M5	None	1 μm max.	0.29 N	Pro-wired	1 m	IP40	D5A-1100	
				0.49 N				D5A-1200	
			3 μm max.	0.29 N				D5A-2100	
				0.49 N				D5A-2200	
	M8		1 μm max.	0.49 N			Connector	IP67	D5A-3200
				0.98 N					D5A-3300
	M16		3 μm max.	2.45 N					D5A-7400
									D5A-7403

Solid-state Output Models (PNP Transistor Output)

Actuator	Type	Operation Indicator	Repeat accuracy	Operating force OF max.	Cable lead outlet		Degree of protection	Model
					Lead outlet	Length		
Pin plunger 	M8	Provided	1 μm max.	0.49 N	Pro-wired	1 m	IP67	D5A-3210
				0.98 N				D5A-3310
				0.49 N				D5A-5210
				0.98 N				D5A-5310
	M16		3 μm max.	2.45 N	Connector			D5A-7410
								D5A-7413
Top plunger 	Limit		3 μm max.	3.92 N	Pro-wired	3 m		D5A-8511
						5 m		D5A-8512
					Connector	3 m		D5A-8514
						5 m		D5A-8515
Bevel plunger 					Pro-wired	3 m		D5A-9511
						5 m		D5A-9512
		Connector			3 m	D5A-9514		
					5 m	D5A-9515		

D5A

Specifications

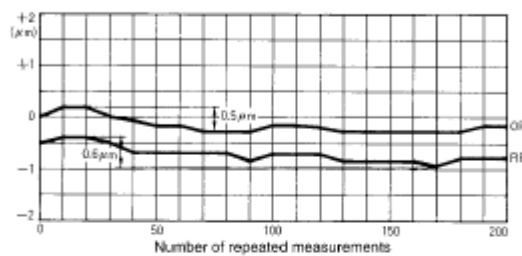
Ratings

Item	Electrical ratings
Contact output models	M5, M8, M16 Type: 10 mA at 24 VAC 10 mA at 12 VDC
Solid-state output models	100 mA at 5 to 24 VDC±10% Leakage current: 0.15 mA max. Residual voltage: 3 V max. Power consumption: 3 mW max.

Engineering Data

Repeat Accuracy Examples (Reference Data)

M5 Type (Contact Output) With
Repeat Accuracy of 1 μ m max.
D5A-1□□□ Series



Characteristics

Degree of protection	D5A-1□□, D5A-2□□: IP40 Other than the above models: IP67
Repeat accuracy *1	M5 (D5A-1□□□ series), M8, slim type: 1 μ m max. M5 (D5A-2□□□ series), M16, limit type: 3 μ m max.
Durability *2	Mechanical
	10,000,000 operations min.
	Electrical
	1,000,000 operation min. (Contact output models: 24 VAC, 10 mA, resistive load, Solid-state output models: 24 VAC, 100 mA, resistive load)
Deviation in electrical durability after 1,000,000 operations	M5, M8, M16, slim type: 10 μ m max. Limit type: 20 μ m max.
Operating speed	1 μ m/s to 0.5 m/s
Rated frequency	50/60 Hz
Insulation resistance	100 M Ω min. (at 250 VDC) between each terminal and non-current-carrying metal part
Contact resistance (Initial value)	800 m Ω max. (initial) with 1 m cable, 2.4 Ω max. (initial) with 3 m cable, 4 Ω max. (initial) with 5 m cable
Dielectric strength	1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 min between each terminal and non-current-carrying metal part
Vibration resistance	Malfunction
	10 to 55 Hz, 1.5-mm double amplitude
Shock resistance	Mechanical
	1,000 m/s ² min.
	Malfunction
	300 m/s ² min.
Temperature coefficient *3	M5, M8, slim type: $\pm 20 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ max. M16 type: $\pm 40 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ max. Limit type: $\pm 50 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ max.
Ambient operating temperature	-20°C to +75°C (with no icing)
Ambient operating humidity	35% to 85%RH (35% to 95%RH with the seal rubber)

Note: The above figures are initial values.

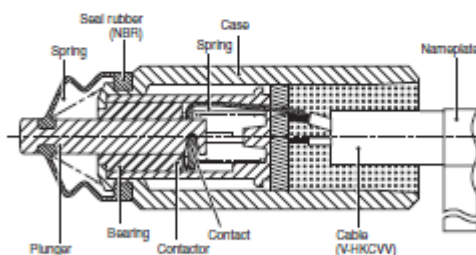
*1. Contact your OMRON sales representative for measurement conditions of the repeat accuracy.

*2. Durability values are calculated at an operating temperature of +5°C to +35°C, and an operating humidity of 40% to 70%RH. Contact your OMRON sales representative for more detailed information on other operating environments.

*3. The value indicates the operating position change rate for a change of 1°C in the ambient temperature. The specifications depend on the model. Contact your OMRON sales representative for details.

Structure and Nomenclature

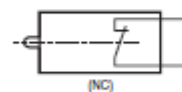
Structure



Contact Form/Output Circuit Diagram

Contact Output Models

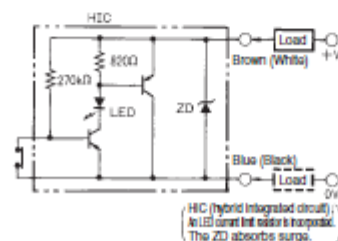
M5, M8, M16 type



Note: NO Switches are not available with contact output models.

Solid-state Output Models (PNP Transistor Output)

M8, Slim, M16, Limit type



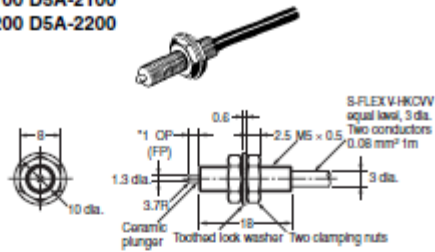
Note: The load may be connected to either the +V or 0 V terminal.
Core wire colors have been changed accompanying changes in standards. The old core wire colors are given in parentheses.

D5A

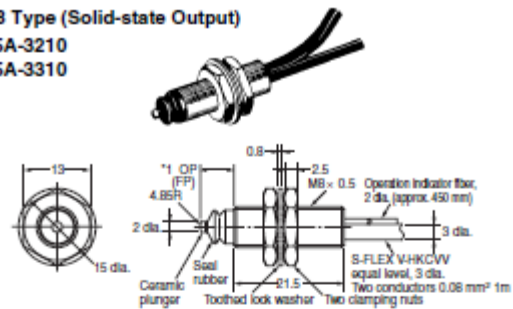
Dimensions and Operating Characteristics

(Unit: mm)

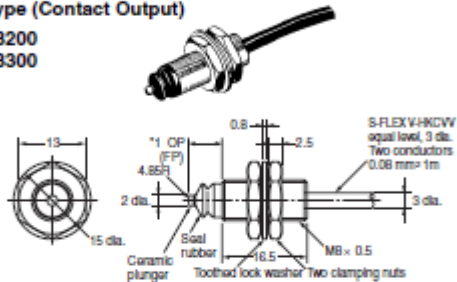
M5 Type (Contact Output)

D5A-1100 D5A-2100
D5A-1200 D5A-2200


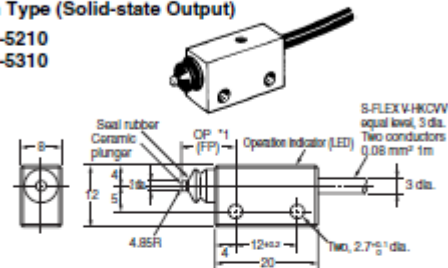
M8 Type (Solid-state Output)

D5A-3210
D5A-3310


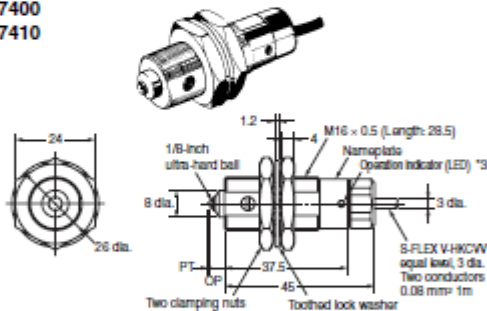
M8 Type (Contact Output)

D5A-3200
D5A-3300


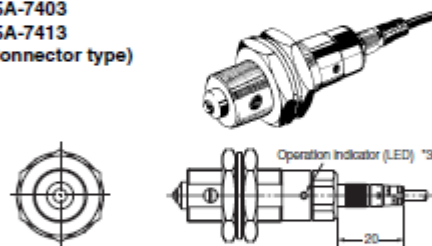
Slim Type (Solid-state Output)

D5A-5210
D5A-5310


M16 Type (Contact Output/Solid-state Output)

D5A-7400
D5A-7410


M16 Type (Contact Output/Solid-state Output)

D5A-7403
D5A-7413
(Connector type)


Note: 1. The dimensions are the same as the left model's.
2. Cables with connectors are not sold separately.

Note: 1. Unless otherwise specified, a tolerance of ± 0.4 mm applies to all dimensions.

2. Special screw dimensions apply to the case screws (pitch: 0.5 mm). Mounting is not possible with standard tapping. Use the provided special nuts.

Operating characteristics	Model	D5A-1100 D5A-2100	D5A-1200 D5A-2200	D5A-3200 D5A-3210	D5A-3300 D5A-3310	D5A-5210	D5A-5310	D5A-7400, D5A-7410 D5A-7403, D5A-7413
Operating force	OF	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
Pretravel	PT	0.29 N	0.49 N	0.49 N	0.98 N	0.49 N	0.98 N	2.45 N
Overtravel	OT	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.
Movement	MD	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	2 mm
Differential	MD	5 μ m	5 μ m	5 μ m	5 μ m	5 μ m	5 μ m	5 μ m
Operating Position	OP	Free Position	Free Position	Free Position	Free Position	Free Position	Free Position	Free Position
Free Position	FP	(2 mm)	(2 mm)	(6.5 mm)	(6.5 mm)	10.5 $\pm$ 0.4 mm	10.5 $\pm$ 0.4 mm	(4.4 mm) (5 mm)

*1. The operating position of these types is the same as the free position because of high sensitivity (repeat accuracy: 1 μ m max.). This does not apply to M16 limit switch types.

*2. Total movement is 1.9 to 2.1 mm. Set the appropriate stroke (plunging depth) to 1.0 to 1.5 mm from the FP.

*3. Not available in the contact output type.

(5) Datasheet Photodiode QP1-6-T05



QP1-6 T05

Quadrant Photodiode

Special characteristics:

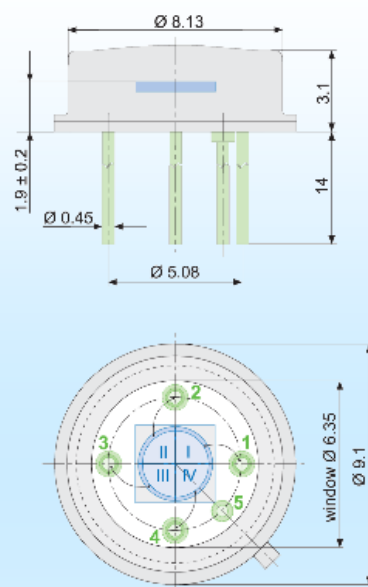
Small gap
Low dark current
High shunt resistance
High resolution

Parameters:	QP1-6 T05
Elements*	4
Active Area	1mm ² Ø 1,13mm
Gap (µm)	16, Oxid
Dimensional outline	clear glass
operating temperature	-40 ...+100 °C
storage temperature	-55 ...+125 °C
Spectral Responsivity (A/W)	
(833 nm)	typ. 0,4
(900 nm)	typ. 0,64
Dark current (nA)	
(10 V)	typ. 0,1*
Breakdown voltage (V)	
at I ₀ = 2 µA (V)	15
Capacitance (pF)	
10 V	max.1*
Rise time (ns)	
850 nm, 10 V, 50 Ω	20
Uniformity of Sensivity	
	typ. ± 1 % max. ± 2 %

www.silicon-sensor.com

Version: 2010-03-25
Order number: 500139

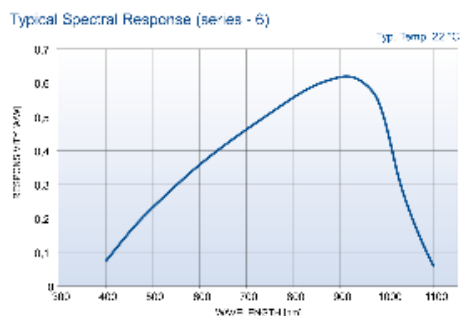
Package (T05):



Pin-Connection

Pin-No.	Connection
1	Anode 1
2	Anode 2
3	Anode 3
4	Anode 4
5	Cathode/ Case

www.pacific-sensor.com



Disclaimer: Due to our policy of continued development, specifications are subject to change without notice.

Handling Precautions:

soldering temperature: 260 °C for max. 10 s. The device must be protected against solder flux vapour!
 min. Pin - length: 2 #mm
 ESD - protection: Standard precautionary measures are sufficient.
 Storage: Store devices in conductive foam.
 Avoid skin contact with window!
 Clean window with Ethyl alcohol if necessary.
 Do not scratch or abrade window.

International Sales:

Silicon Sensor International AG

Peter-Behrens-Straße 15
 D-12459 Berlin
 Germany
 Phone: +49(0)30 / 63 99 23 - 99
 Fax: +49(0)30 / 63 99 23 - 33
 Sales: sales@silicon-sensor.de

U.S.A.:

Pacific Silicon Sensor, Inc

5700 Corsa Avenue #105
 Westlake Village
 CA 91362 USA
 Phone: +1-818-706-3400
 Fax: +1-818-889-7053
 E-Mail: sales@pacific-sensor.com

(6) Datasheet Photodiode APD AD1100-9 TO5i



AD1100-9 TO5i

NIR Enhanced Response Avalanche Photodiode

Special characteristics:

quantum efficiency > 80% at λ 760 - 910 nm
high speed, low noise
1130 μ m diameter active area
low slope multiplication curve

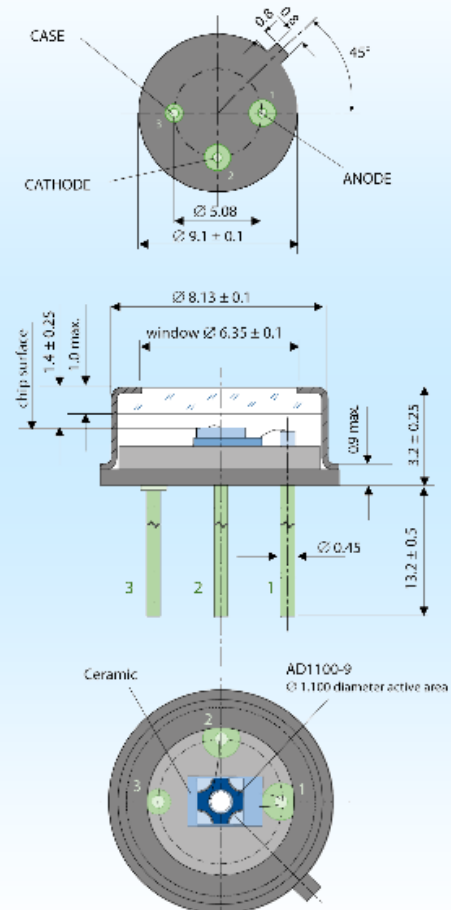


Parameters:	AD1100-9 TO5i
Active Area	1mm ² Ø 1,13mm
Dimensional outline	
window material	clear glass
operating temperature	-40 ... +100 °C
storage temperature	-55 ... +125 °C
Spectral Responsivity (A/W) (905 nm, at M=100)	min. 55 typ. 60
Dark current (nA) (at M=100)	typ. 4 - 6 max. 10
Breakdown voltage (V) at I ₀ = 2 μ A (V)	180 - 240
Capacitance (pF) at M=100	3
Rise time (ns) at M=100	1,3
Temp. coefficient U _{br} (V/K)	typ. 1,55
Cut-off frequency (GHz) (-3 dB)	0,3
N.E.P. (w/Hz ^{1/2}) (at M=100)	8*10 ⁻¹⁴
Optimum Gain	40 - 60
Max. Gain	> 200
Excess Noise factor at M=100	2,5
Excess Noise index at M=100	0,2
Noise current at M=100 (pA/Hz ^{1/2})	typ. 0,15

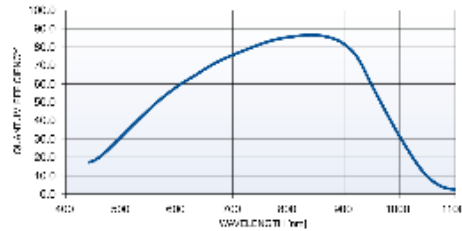
www.silicon-sensor.com

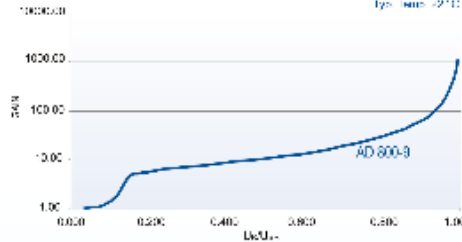
Version: 2010-04-30
Order number: 500014

Package (TO5i):

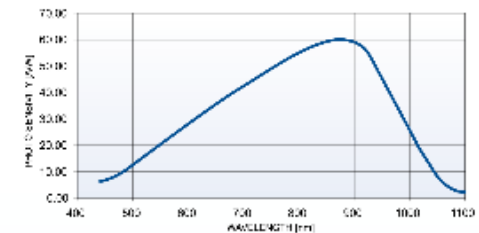

www.pacific-sensor.com

Quantum efficiency for M = 100


Dark current - I (U_b/U_{ref})

Gain = * (U_b/U_{ref})


Spectral Responsivity at M = 100



Disclaimer: Due to our policy of continued development, specifications are subject to change without notice.

measurement conditions:

Setup of photo current 10 nA at M = 1 and irradiation by a LED (880 nm, 80 nm bandwidth). Increase the photo current up to 1 μ A, (M = 100) by internal multiplication due to an increasing bias voltage.

Maximum Ratings:

max. electrical power dissipation: 100mW at 22 °C
max. optical peak value, once: 200mW for 1s
max. continuous optical operation: I_{ph} (DC) $\leq$ 250 μ A
 $\leq$ 1 mA for signal 50 μ s 'on'/1ms 'off'
($P_{elect} = P_{opt} * S_{sens} * M * U_b$)

Application Hints:

Current should be limited by a protecting resistor or current limiting - IC inside the power supply.
Use of low noise read-out -IC.
For high gain applications bias voltage should be temperature compensated.
For low light level applications, blocking of ambient light should be used.

Handling Precautions:

soldering temperature: 260 °C for max. 10 s. The device must be protected against solder flux vapour!
min. Pin - length: 2 mm
ESD - protection: Standard precautionary measures are sufficient.
Storage: Store devices in conductive foam.
Avoid skin contact with window!
Clean window with Ethyl alcohol if necessary.
Do not scratch or abrade window.

International Sales:

Silicon Sensor International AG

Peter-Behrens-Straße 15
D-12459 Berlin
Germany
Phone: +49(0)30 / 63 99 23 - 99
Fax: +49(0)30 / 63 99 23 - 33
Sales: sales@silicon-sensor.de

U.S.A.:

Pacific Silicon Sensor, Inc

5700 Corsa Avenue #105
Westlake Village
CA 91362 USA
Phone: +1-818-706-3400
Fax: +1-818-889-7053
E-Mail: sales@pacific-sensor.com

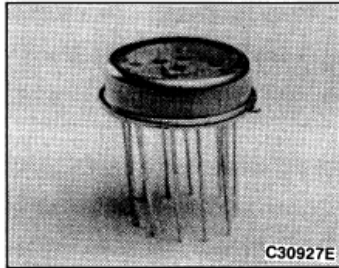
(7) Datasheet Photodiode APD 4 cadrans C30927E

EG&G CANADA LTD.
Optoelectronics Division
Formerly **RCA**
Effective January 1, 1991

Electro
Optics

Photodiode C30927E DATA SHEET

Quadrant Silicon Avalanche Photodiodes for Tracking Applications



VP-104

RCA types C30927E-01, C30927E-02, and C30927E-03 are quadrant silicon photodiodes made using a double-diffused "reach-through" structure. The quadrant structure has a common avalanche junction, with separation of the quadrants achieved by segmentation of the light-entry p+ surface opposite the junction. With this design, there is no dead space between the elements and therefore no loss of response at boresight.

The C30927E-01, C30927E-02, and C30927E-03 are optimized for use at wavelengths of 1060, 900, and 800 nm respectively. Each device type will provide high responsivity and excellent performance when operated within about 50 nm of the specified wavelength.

The quadrant avalanche photodiodes are useful in a variety of tracking and alignment applications.

Maximum Ratings

Limiting Values¹

Reverse Bias Current	200 max. A
Photocurrent Density, i_{ph} , at 22°C:	
Average value, continuous operation	5 mA/mm ²
Peak value	20 mA/mm ²
Forward Current, I_F , at 22°C:	
Average value, continuous operation	5 max. mA
Peak value (for 1 second duration, non-repetitive)	50 max. mA
Maximum Total Power Dissipation at 22°C	0.1 max. W
Ambient Temperature:	
Storage, T_{stg}	-60 to +100 °C
Operating, T_A	-40 to +60 °C
Soldering:	
For 5 seconds	200 °C

Optical Characteristics

Full Angle for Totally Illuminated Photosensitive Surface > 90 deg.

- High Quantum Efficiency -
C30927E-03 85% typical at 800 nm
C30927E-02 85% typical at 900 nm
C30927E-01 18% typical at 1060 nm
- Fast Time Response -
Rise Time typically 3 ns
Fall time typically 3 ns
- Large Area -
1.77 mm²
- Hermetically-Sealed Low-Profile TO-8 Package

Mechanical Characteristics

Photosensitive Surface:
Shape Circular
Configuration Quadrant
Total useful area 1.77 mm²
Total useful diameter 1.5 mm

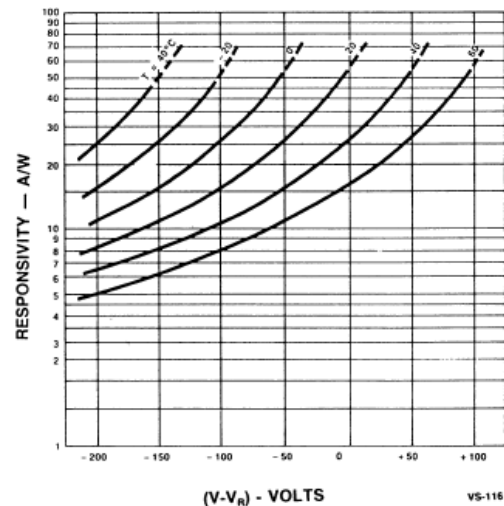


Figure 1 - Typical Variation of Responsivity at 800 nm for type C30927E-03 as a Function of Temperature and Voltage Difference From the Designated Voltage V_R (See Footnote 2)

RCA Inc., Electro Optics

C30927E

Electrical Characteristics at $T_A = 22^\circ\text{C}$

At the DC reverse operating voltage V_R supplied with the device and at light spot diameter of 1.0 mm (0.04) centered at boresight, unless otherwise specified. See footnote 2.

	Min.	Typ.	Max.	Units
Breakdown Voltage, V_{BR}	350	425	485	V
Temperature Coefficient of V_R for constant Gain	—	2.4	—	V/°C
Gain	—	100	—	—
Responsivity:				
C30927E-03 at 800 nm	45	55	—	A/W
C30927E-02 at 900 nm	50	62	—	A/W
C30927E-01 at 1060 nm	12	15	—	A/W
Quantum Efficiency:				
C30927E-03 at 800 nm	—	85	—	%
C30927E-02 at 900 nm	—	85	—	%
C30927E-01 at 1060 nm	—	18	—	%
Total Dark Current, I_d	—	0.1	0.2	μA
Total Noise Current, i_n (All quadrants): $f = 10\text{ kHz}$, $\Delta f = 1.0\text{ Hz}$ See Figure 5	—	1.0	1.5	pA/Hz ^{1/2}
Capacitance:				
Total all quadrants	—	3	5	pF
Between quadrants	—	—	0.5	pF
Resistance Between Paralleled Quadrant Pairs (See Figure 6)	8	—	50	k Ω
Crossover at Boresight: 10% to 90% (25 μm spot) (See Figure 8)	—	75	—	μm
Series Resistance (Each quadrant)	—	—	15	Ω
Rise Time, t_r : $R_L = 50\Omega$, $\lambda = 900\text{ nm}$, 10% to 90% points	—	3	4	ns
Fall Time: $R_L = 50\Omega$, $\lambda = 900\text{ nm}$, 90% to 10% points	—	3	4	ns

¹ Exceeding these values can cause damage to the device.

² A specific value of V_R is supplied with each device. when the photodiode is operated at this voltage, the device will meet the electrical characteristics limits shown above. The voltage value will be within the range of 275 to 425 volts.

³ There is a resistance between the quadrant elements which varies as a function of the applied voltage. In Figure 6 the typical measured resistance between paralleled quadrant pairs is shown. For equivalent circuit considerations, the resistive element between any two adjacent quadrants is twice this value.

⁴ The response dips at boresight (approx. 10%) observed in the scans of Figure 9 are caused by a slight difference in antireflection coating in the cross hair region as compared to the rest of the active area.

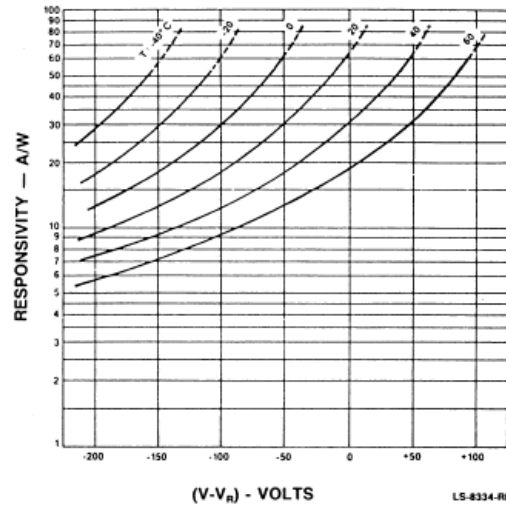


Figure 2 - Typical Variation of Responsivity at 900 nm for type C30927E-02 as a Function of Temperature and Voltage Difference from the Designated Voltage V_R (See Footnote 2)

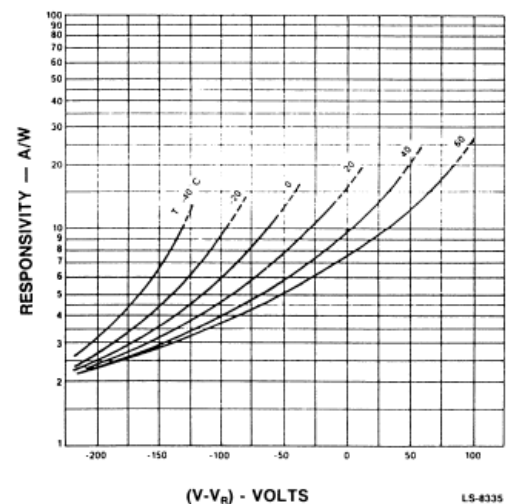


Figure 3 - Typical Variation of Responsivity at 1060 nm for type C30927E-01 as a Function of Temperature and Voltage Difference From the Designated Voltage V_R (See Footnote 2)

C30927E

Electrical Characteristics at $T_A = 22^\circ\text{C}$

At the DC reverse operating voltage V_R supplied with the device and at light spot diameter of 1.0 mm (0.04) centered at boresight, unless otherwise specified. See footnote 2.

	Min.	Typ.	Max.	Units
Breakdown Voltage, V_{BR}	350	425	485	V
Temperature Coefficient of V_R for constant Gain	—	2.4	—	V/°C
Gain	—	100	—	—
Responsivity:				
C30927E-03 at 800 nm	45	55	—	A/W
C30927E-02 at 900 nm	50	62	—	A/W
C30927E-01 at 1060 nm	12	15	—	A/W
Quantum Efficiency:				
C30927E-03 at 800 nm	—	85	—	%
C30927E-02 at 900 nm	—	85	—	%
C30927E-01 at 1060 nm	—	18	—	%
Total Dark Current, I_d	—	0.1	0.2	μA
Total Noise Current, I_n				
(All quadrants):	—	1.0	1.5	pA/Hz ^{1/2}
$f = 10\text{ kHz}$, $\Delta f = 1.0\text{ Hz}$ See Figure 5				
Capacitance:				
Total all quadrants	—	3	5	pF
Between quadrants	—	—	0.5	pF
Resistance Between Paralleled Quadrant Pairs (See Figure 6)	8	—	50	k Ω
Crossover at Boresight: 10% to 90% (25 μm spot) (See figure 8)	—	75	—	μm
Series Resistance (Each quadrant)	—	—	15	Ω
Rise Time, t_r : $R_L = 50\Omega$, $\lambda = 900\text{ nm}$, 10% to 90% points	—	3	4	ns
Fall Time: $R_L = 50\Omega$, $\lambda = 900\text{ nm}$, 90% to 10% points	—	3	4	ns

¹ Exceeding these values can cause damage to the device.

² A specific value of V_R is supplied with each device, when the photodiode is operated at this voltage, the device will meet the electrical characteristics limits shown above. The voltage value will be within the range of 275 to 425 volts.

³ There is a resistance between the quadrant elements which varies as a function of the applied voltage. In Figure 6 the typical measured resistance between paralleled quadrant pairs is shown. For equivalent circuit considerations, the resistive element between any two adjacent quadrants is twice this value.

⁴ The response dips at boresight (approx. 10%) observed in the scans of Figure 9 are caused by a slight difference in antireflection coating in the cross hair region as compared to the rest of the active area.

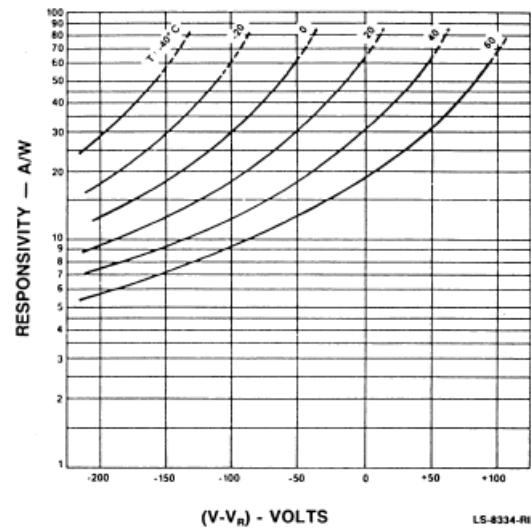


Figure 2 - Typical Variation of Responsivity at 900 nm for type C30927E-02 as a Function of Temperature and Voltage Difference from the Designated Voltage V_R (See Footnote 2)

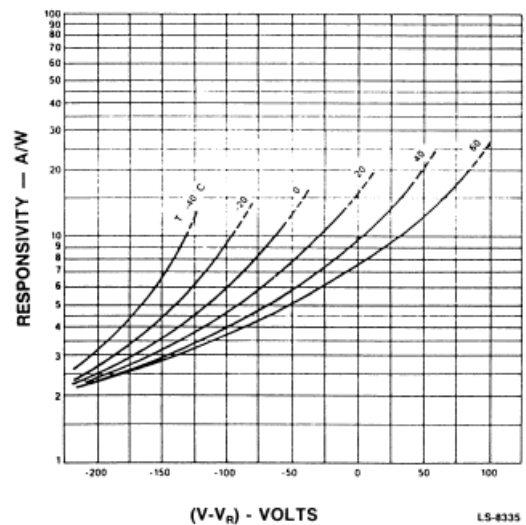


Figure 3 - Typical Variation of Responsivity at 1060 nm for type C30927E-01 as a Function of Temperature and Voltage Difference From the Designated Voltage V_R (See Footnote 2)

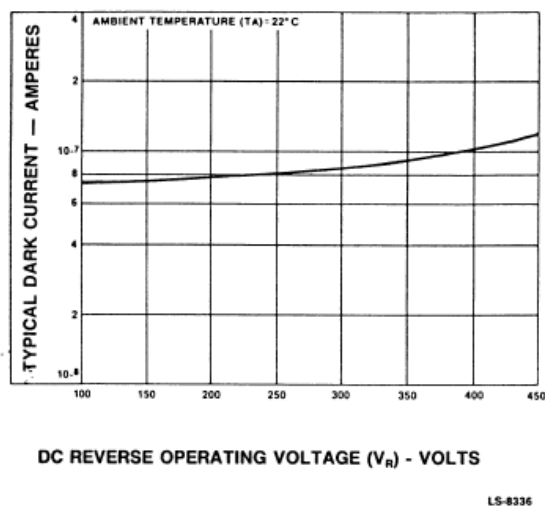


Figure 4 - Typical Total Dark Current vs Operating Voltage

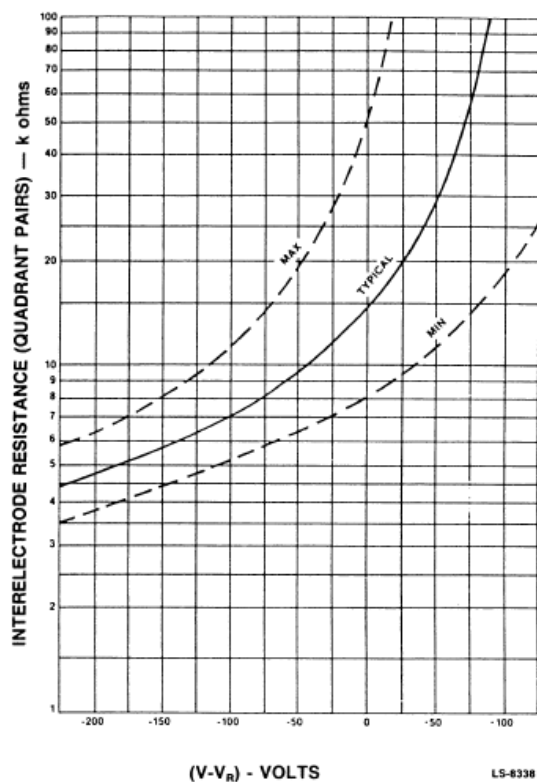


Figure 6 - Typical Interelectrode Resistance vs Operating Voltage (See Footnote 3)

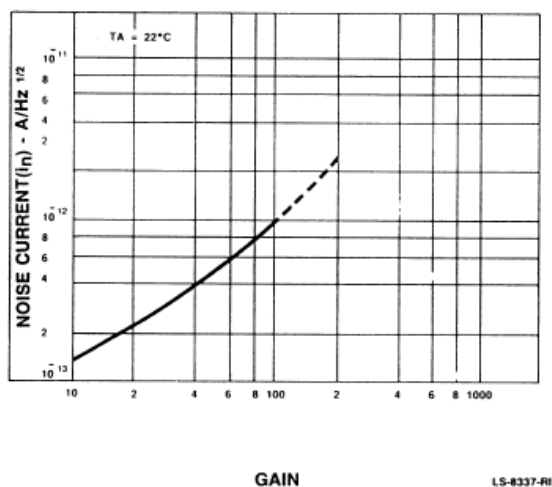


Figure 5 - Typical Noise Current vs Gain (All Quadrants Paralleled)

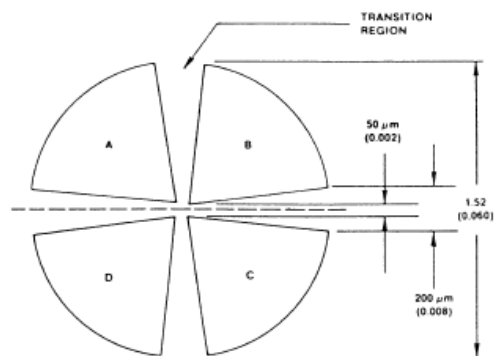


Figure 7 - Quadrant Geometry

Warning — Personal Safety Hazards

Electrical Shock - Operating voltages applied to this device present a shock hazard.

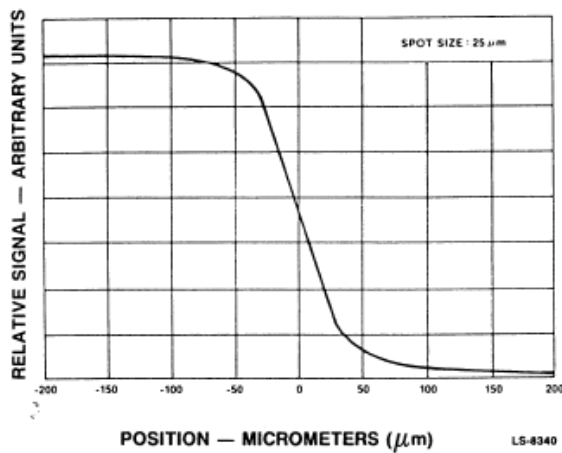


Figure 8 - Scan Showing Typical Crossover Characteristic at Boresight. Quadrant B & C Grounded. (See Scan Line Figure 7)

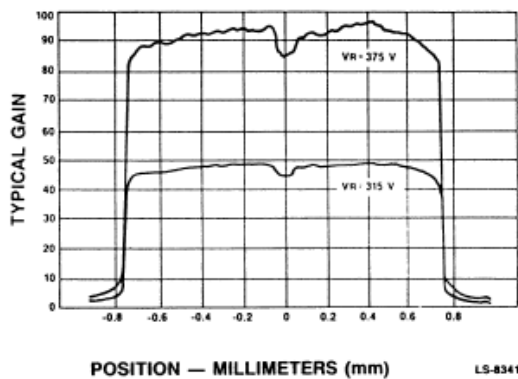


Figure 9 - Typical Response vs Light Spot Position Scanned Diagonally Through Boresight - All Quadrants Connected (See Footnote 4)

Dimensions in millimeters. Dimensions in parentheses are in inches.

For further information, please contact your local RCA Electro Optics representative or Canada J7V 7X3

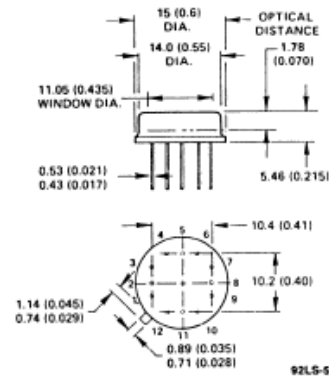
EG&G CANADA LTD.
Optoelectronics Division

Formerly **RCA**

Effective January 1, 1991

or otherwise under any patent or patent rights of RCA INC. or its affiliates.

RCA Inc., Electro Optics



Optical distance from outside surface of window to quadrant avalanche photodiode surface = 1.78 mm (0.070 inch).

Pin Connections

1. Quadrant C, Anode
2. No Connection, Do Not Use
3. Quadrant B, Anode
4. No Connection, Do Not Use
5. Case (Ground)
6. No Connection, Do Not Use
7. Quadrant A, Anode
8. No Connection, Do Not Use
9. Quadrant D, Anode
10. No Connection, Do Not Use
11. Positive Lead (Cathode)
12. No Connection, Do Not Use

Schematic Arrangement

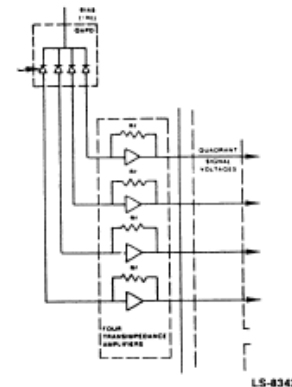


Figure 10 - Dimensional Outline and Pin Connections

Improving its products, the type designation and data are subject to change, unless otherwise of future manufacture of these devices or materials.

furnished by RCA is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication

(8) Datasheet IC SAA1042



Order this document by SAA1042/D

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

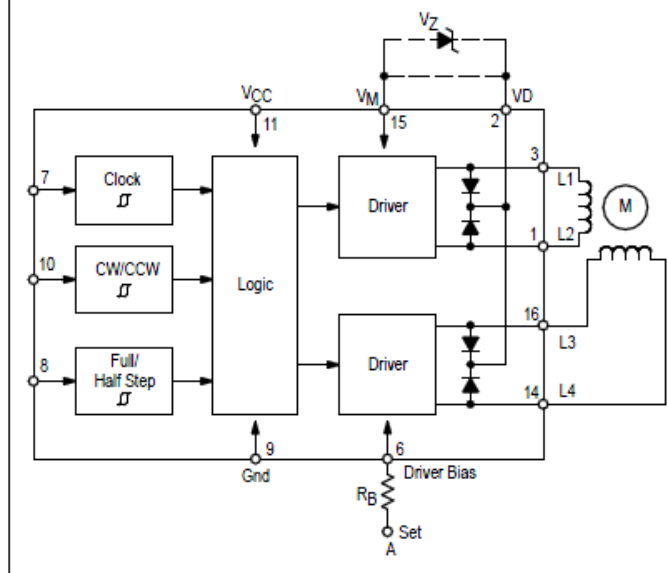
STEPPER MOTOR DRIVER

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

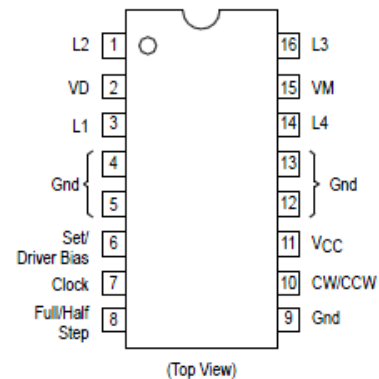


V SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648C

Figure 1. Representative Block Diagram



PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
SAA1042V	$T_J = -30^\circ \text{ to } +125^\circ \text{C}$	Plastic DIP

SAA1042**MAXIMUM RATINGS** ($T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	SAA1042V	Unit
Clamping Voltage (Pins 1, 3, 14, 16)	V_{clamp}	20	V
Over Voltage ($V_{\text{OV}} = V_{\text{clamp}} - V_M$)	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)	$V_{\text{in clock}}$ $V_{\text{in Full/Half}}$ $V_{\text{in CW/CCW}}$	V_{CC}	V
Power Dissipation (Note 1)	P_D	2.0	W
Thermal Resistance, Junction-to-Air	θ_{JA}	80	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	θ_{JC}	15	
Operating Junction Temperature Range	T_J	-30 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

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. $P_D = P_{\text{drive}} - P_{\text{logic}}$.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$, 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 ($I_{\text{Pin 6}} = -400 \mu\text{A}$, Pins 1, 3, 14, 16 Open) $V_M = 6.0 \text{ V}$ $V_M = 12 \text{ V}$ $V_M = 24 \text{ V}$	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			5.0 V 10 V 15 V 20 V	— — — —	— — — —	0.8 1.5 2.5 3.5	
Input Reverse Current, High State ($V_{\text{in}} = V_{\text{CC}}$)			5.0 V 10 V 15 V 20 V	— — — —	— — — —	2.0 2.0 3.0 5.0	
Input Forward Current, Low State ($V_{\text{in}} = \text{Gnd}$)			5.0 V 10 V 15 V 20 V	-10 -25 -40 -50	— — — —	— — — —	
Output Voltage, High State ($V_M = 12 \text{ V}$) $I_{\text{out}} = -500 \text{ mA}$ $I_{\text{out}} = -50 \text{ mA}$	1, 3, 14, 16	V_{OH}	5.0 – 20 V	— —	$V_M - 2.0$ $V_M - 1.2$	— —	V
Output Voltage, Low State $I_{\text{out}} = 500 \text{ mA}$ $I_{\text{out}} = 50 \text{ mA}$		V_{OL}	5.0 – 20 V	— —	0.7 0.2	— —	
Output Leakage Current, Pin 6 = Open ($V_M = V_D = V_{\text{clamp max}}$)	1, 3, 14, 16	I_{DR}	5.0 – 20 V	-100	—	—	μA
Clamp Diode Forward Voltage (Drop at $I_M = 500 \text{ mA}$)	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.

VD — (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:

$$V_{\text{clamp}} = V_M + 6.0 \text{ V}$$

$$V_Z = V_{\text{clamp}} - V_M - V_F$$

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

$$V_{\text{clamp}} \leq 20 \text{ V for SAA1042V} \leq 30 \text{ V for SAA1042AV}$$

Pins 2 and 15 can be linked, in this case $V_Z = 0 \text{ V}$.

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 k Ω is chosen according to Figure 2.

The maximum voltage permitted at the output pin is $V_M + 6.0 \text{ V}$ (see Maximum Ratings table), in this application $V_M = 12 \text{ V}$, 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:

$$V_Z = 6.0 \text{ V} - 1.7 \text{ V} = 4.3 \text{ V}.$$

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:

$$L1 = L3 = \text{high and } L2 = L4 = \text{low, (see Figure 6)}.$$

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:

$$P_D = 0.9 \text{ W} + 0.08 \text{ W} = 0.98 \text{ W}.$$

The junction temperature can then be computed using Figure 8.

SAA1042

Figure 2. Bias Resistor R_B versus Motor Current

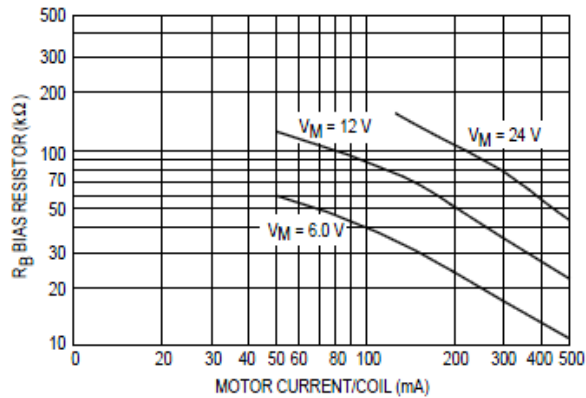


Figure 3. Drive Stage Power Dissipation

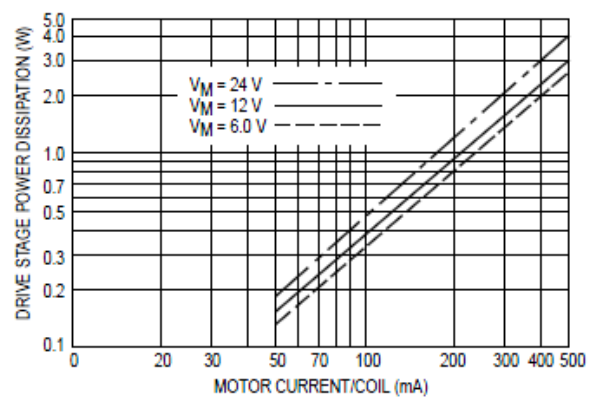


Figure 4. Clamp Diode Forward Current versus Forward Voltage

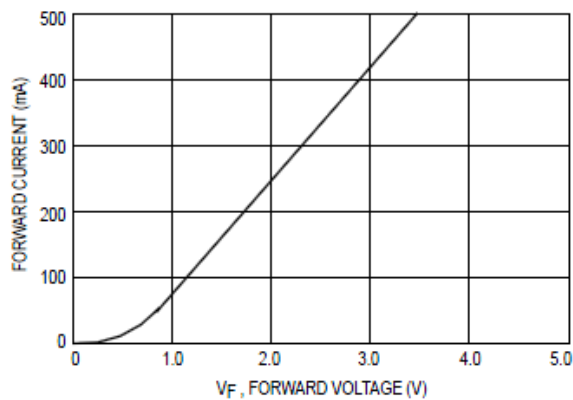


Figure 5. Power Dissipation versus Logic Supply Voltage

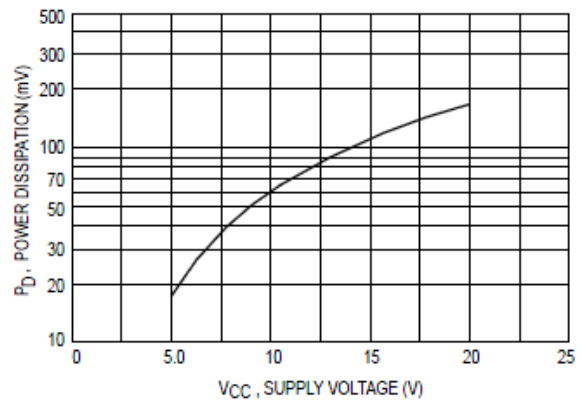
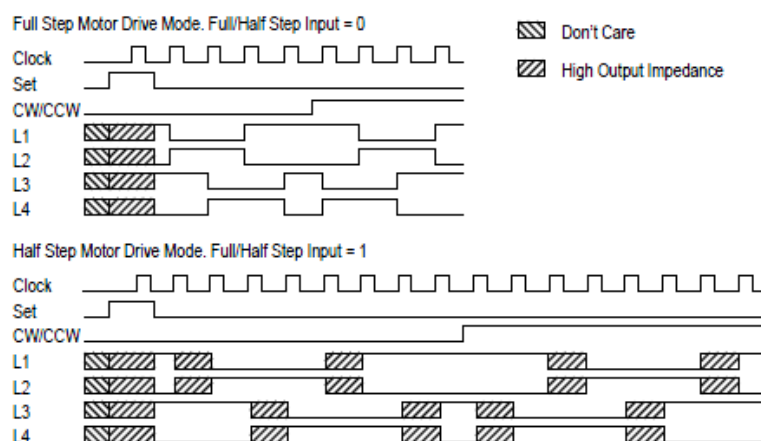


Figure 6. Timing Diagram



SAA1042

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

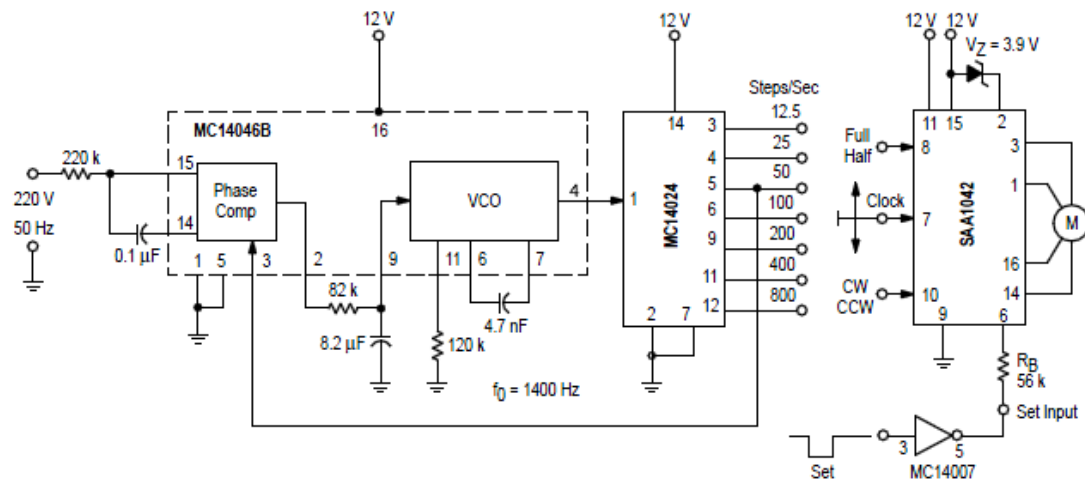
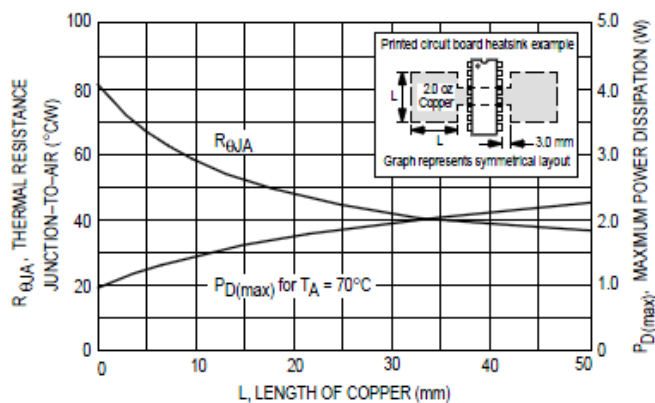
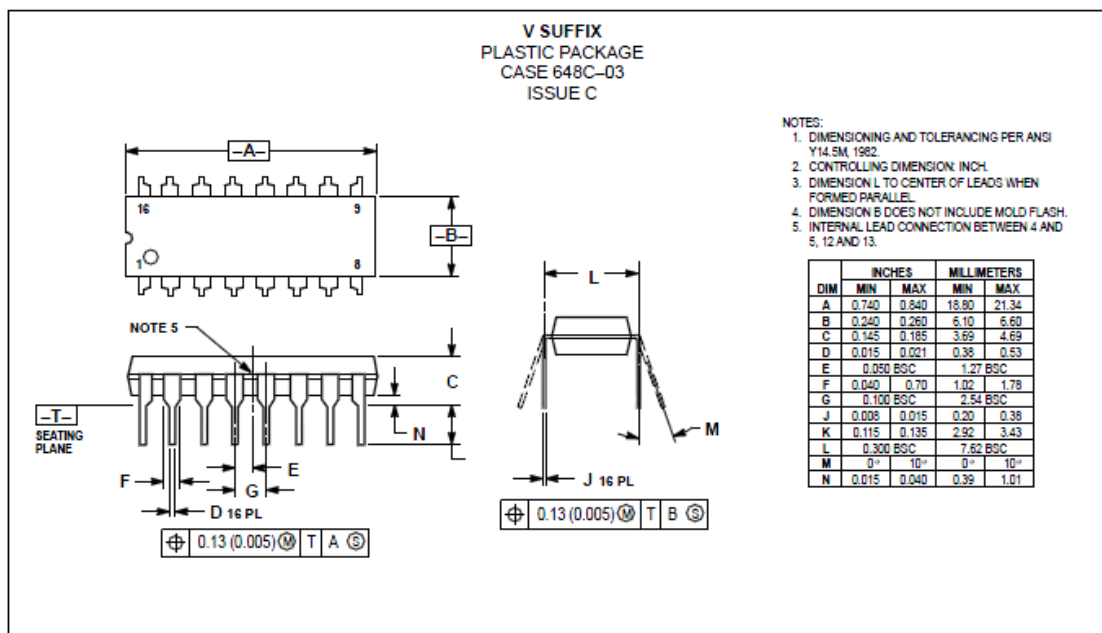


Figure 8. Thermal Resistance and Maximum Power Dissipation versus P.C.B. Copper Length



SAA1042

OUTLINE DIMENSIONS



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 800-244-8809
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

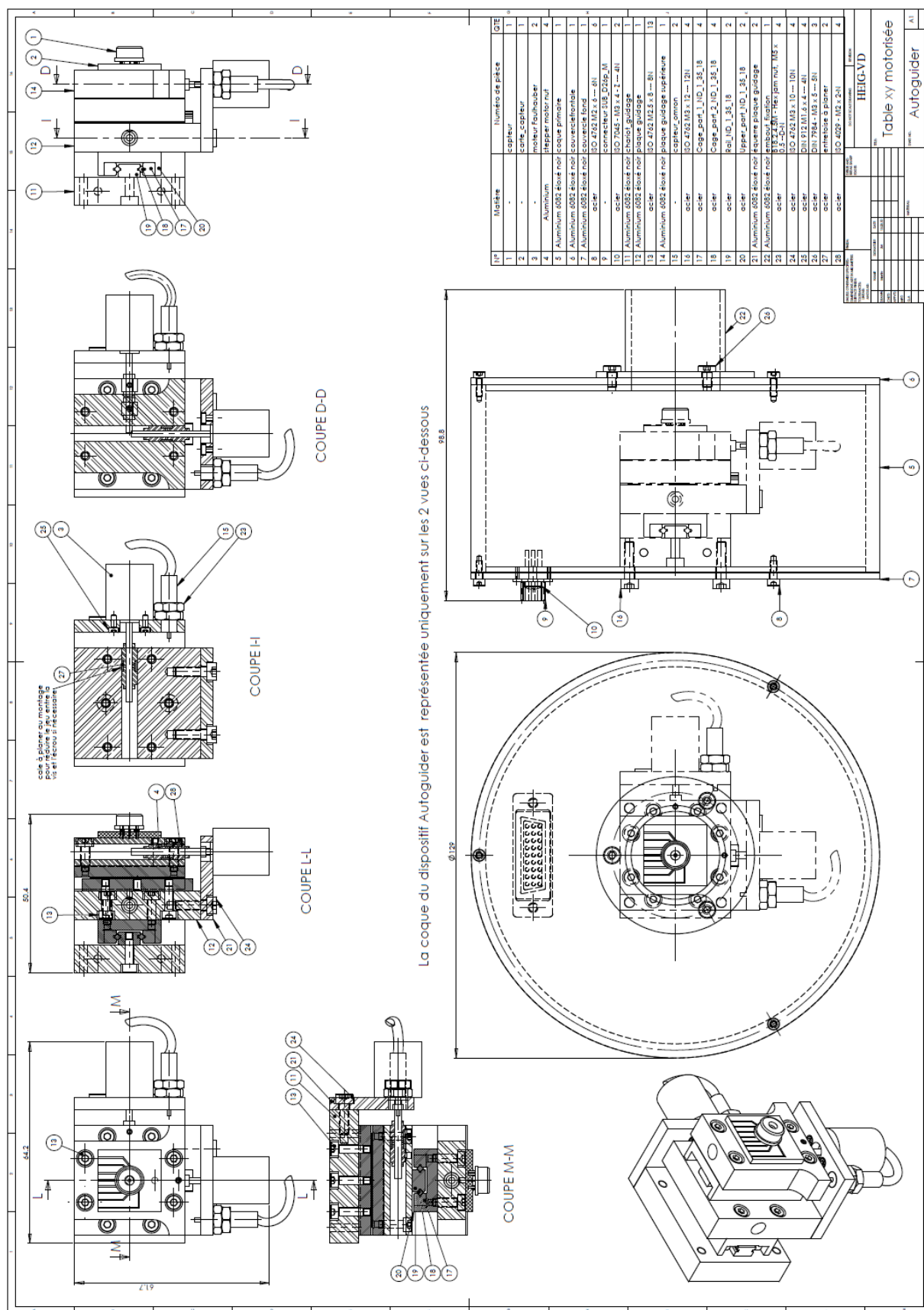
ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

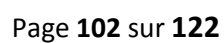


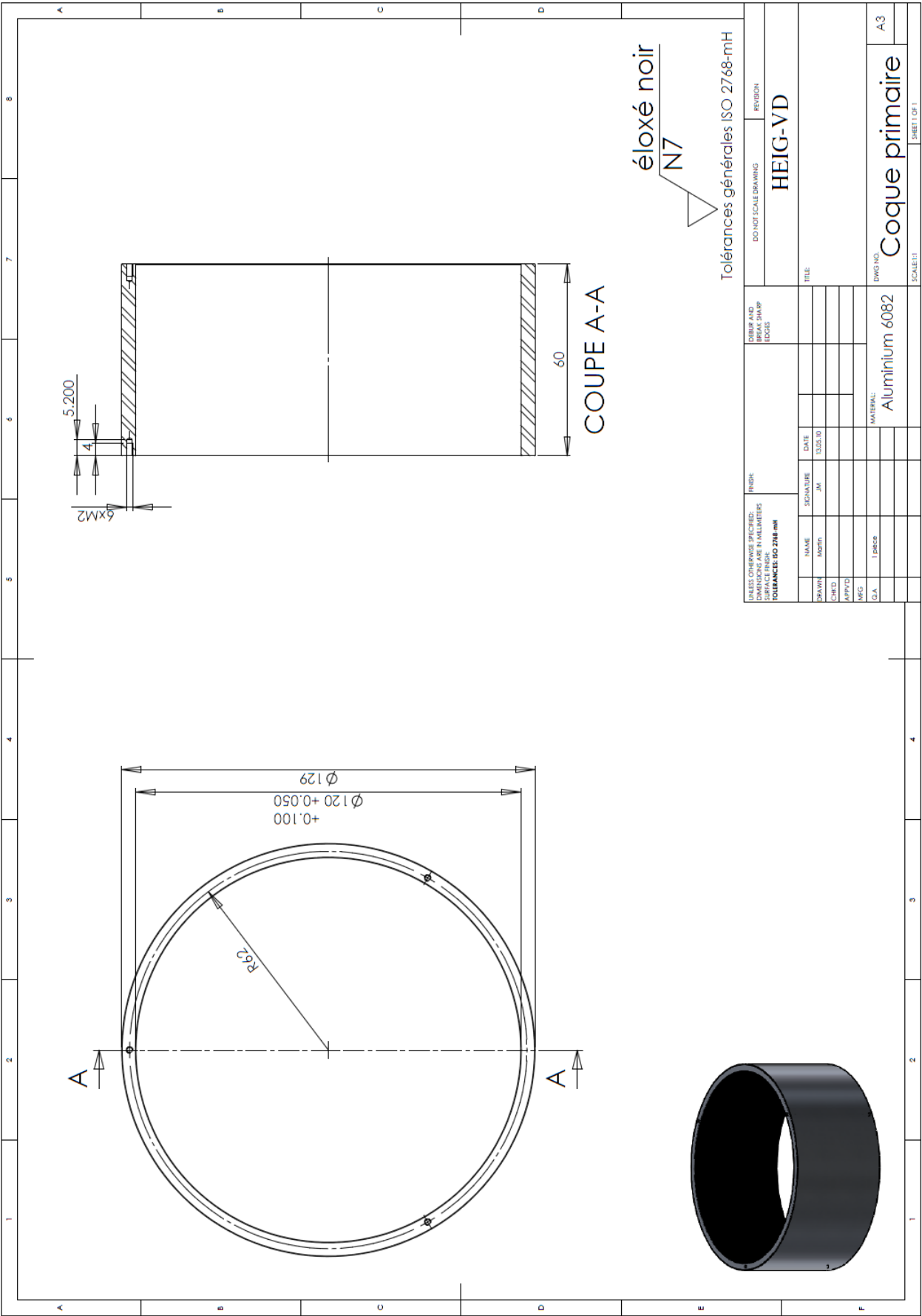
SAA1042/D

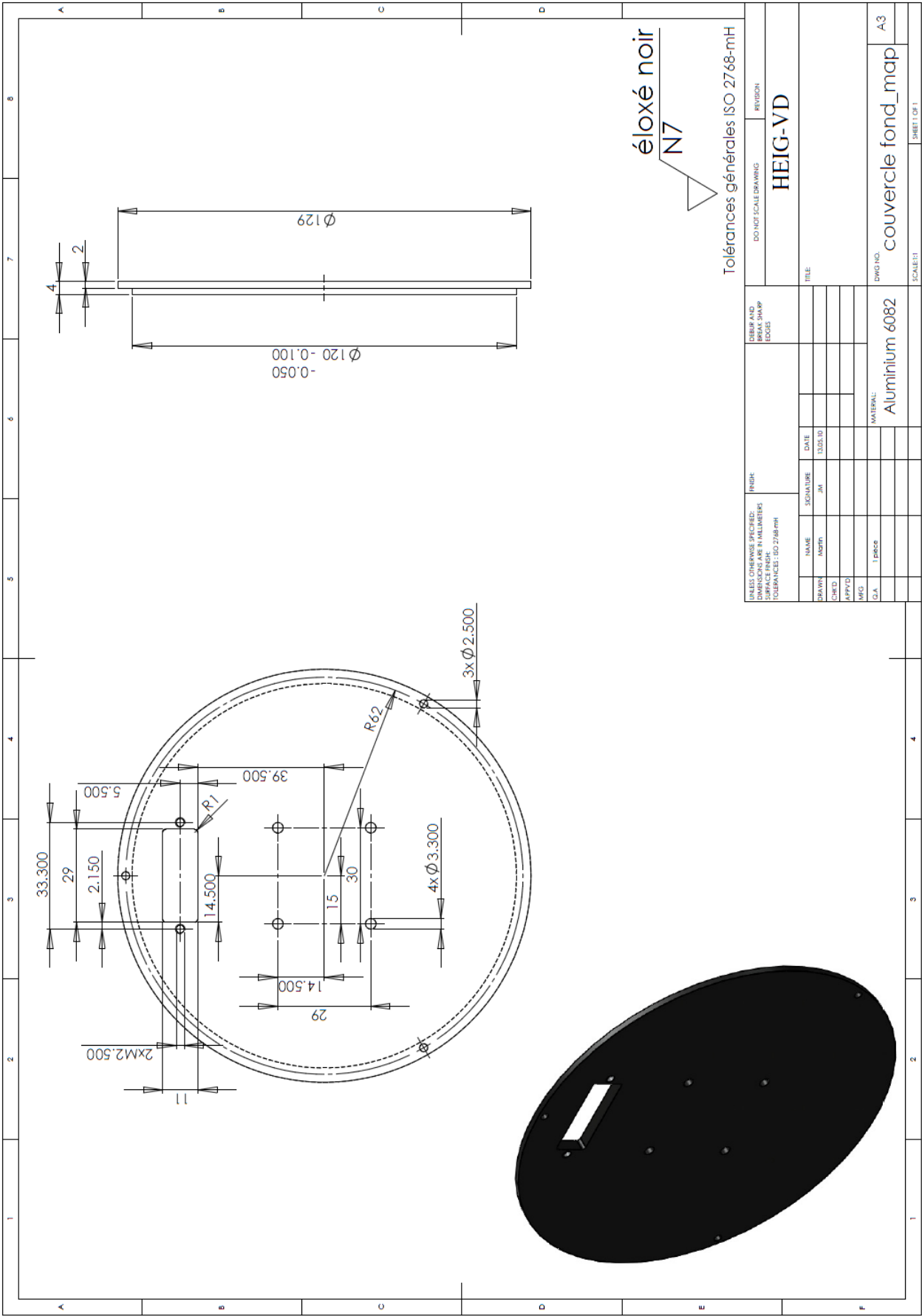


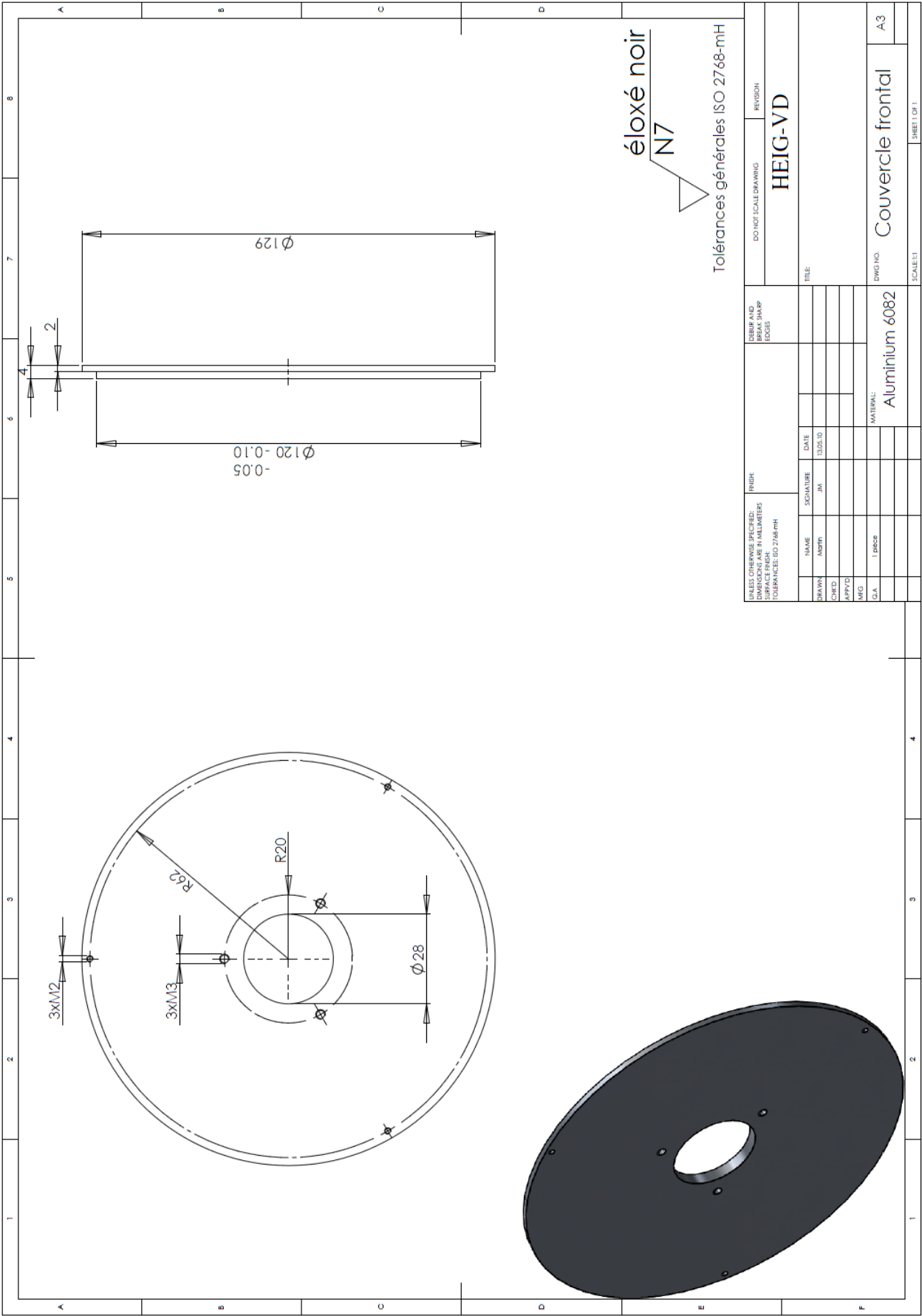
(9) Dessins mécaniques

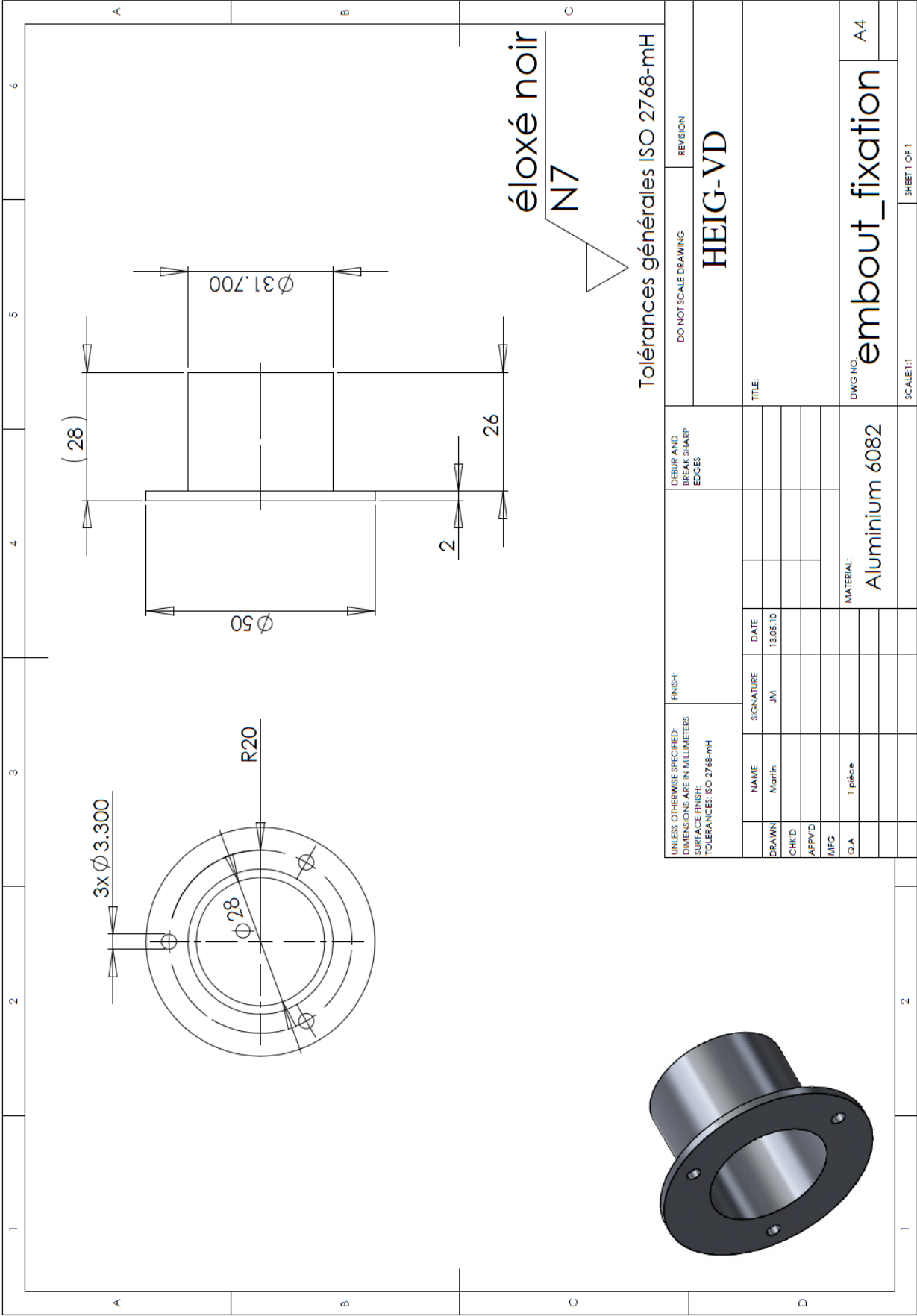


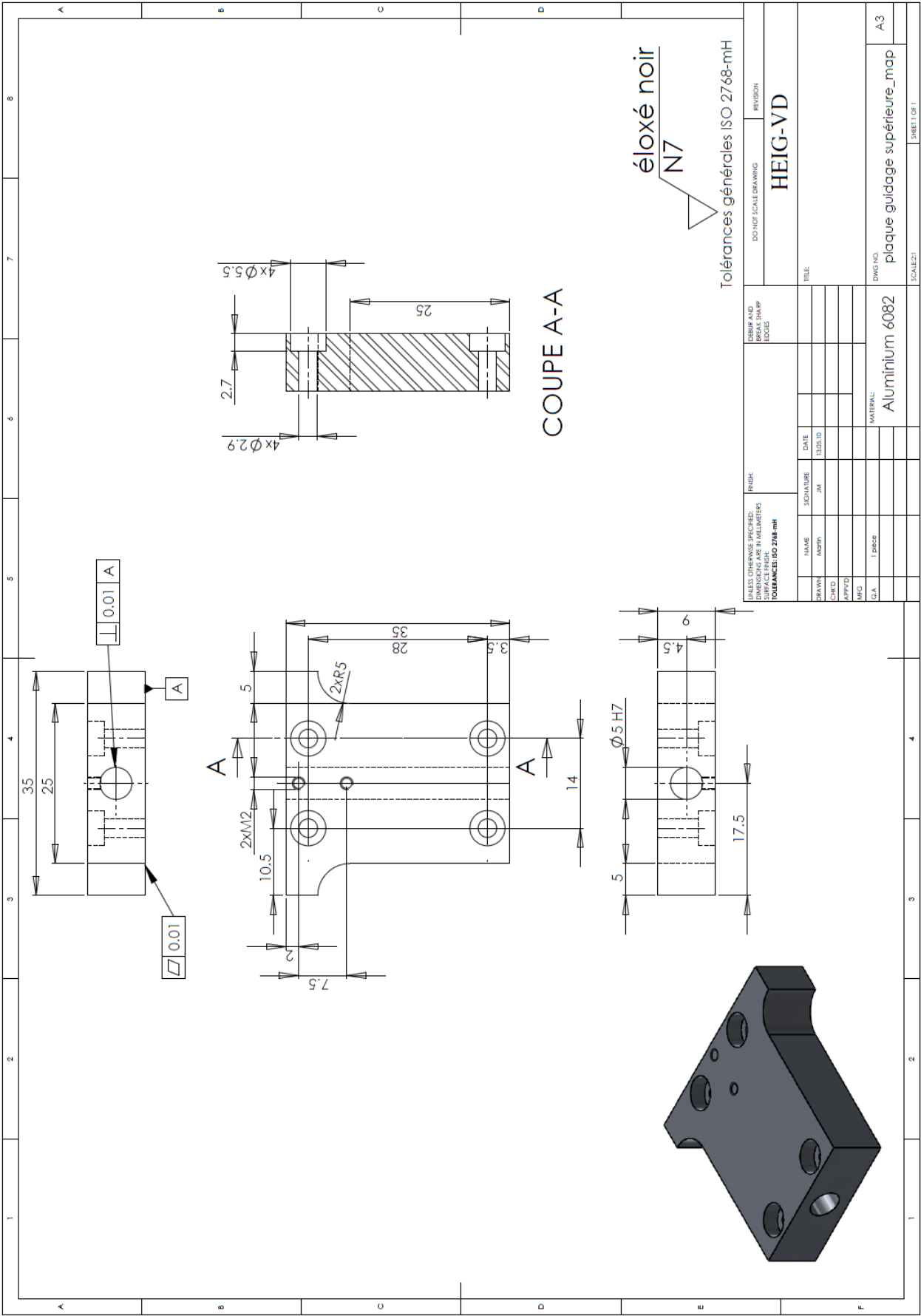


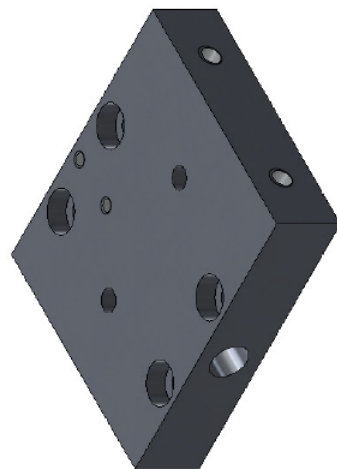


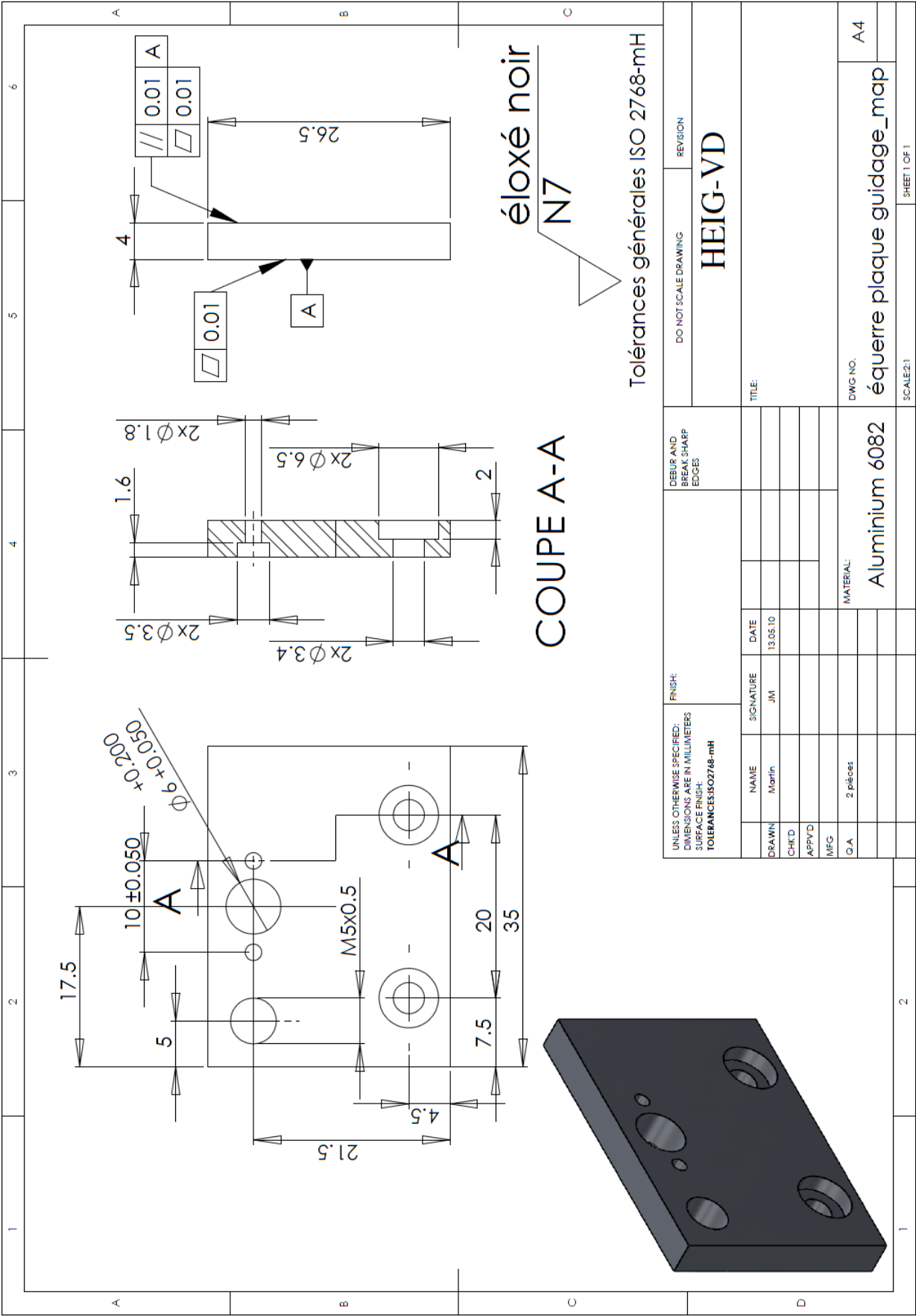




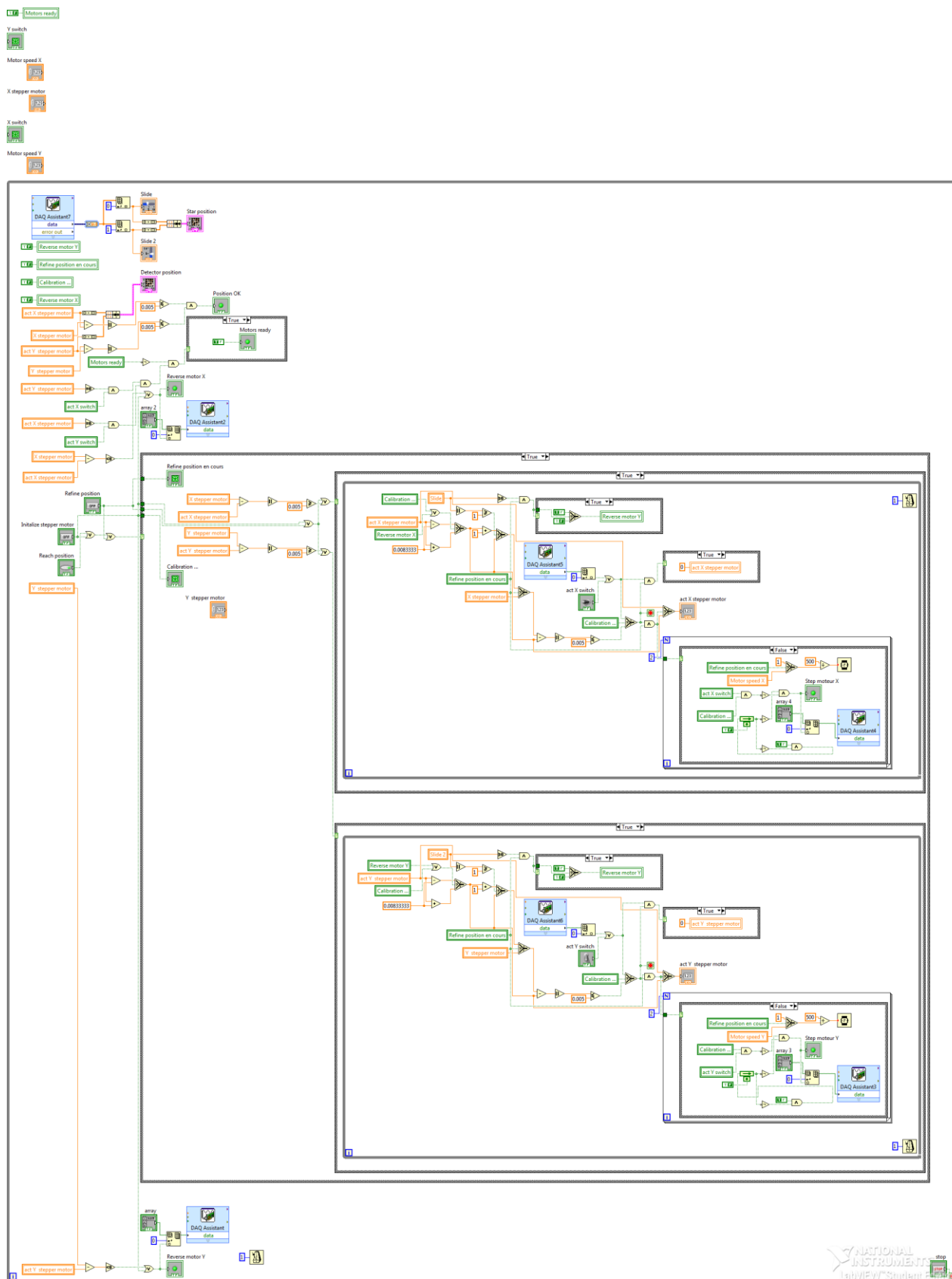




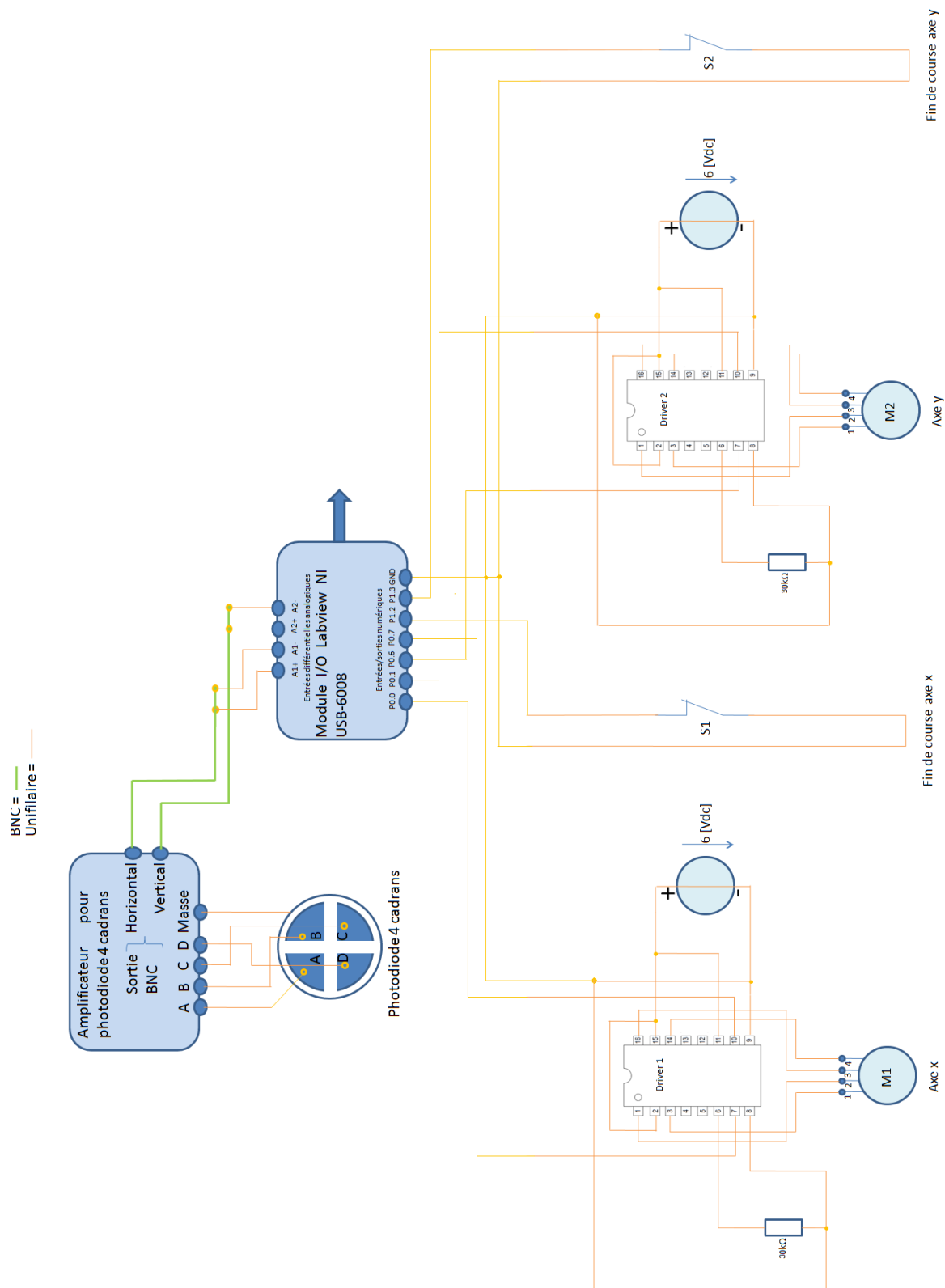




(10) Programme Labview



(11) Schéma de câblage du système *autoguideur*



(12) Liste de pièces commandées

Matériel	Quantité	Prix	Contact	Remarque
Falhauber Stepper Motor AM1524-2R-V-6-35-83 Lead screw M2x0.2x25 optional nut 2.8000.08.353	2 2 4	fr. 740.00	Nicolas Surdez Regional Sales Manager Tel.: +41 (0)91 611 32 38 Mobile: +41 (0) 79 512 62 41 MINIMOTOR SA 6980 Croglio, Switzerland	rabais école 35% et TVA comprise
Schneeberger table sur roulement Schneeberger ND1-35.18	2	fr. 380.00	Doris Meier SCHNEEBERGER AG Lineartechnik Verkauf Innendienst St. Urbanstrasse 12 CH-4914 Roggwil (+ 41 (0)62 918 42 73 2+ 41 (0)62 918 42 20	
Distrelec Connecteur D-Sub HD-D26 PY/2, broches droites à souder	1	fr. 6.00	Distrelec - Unité de Daetwyler Suisse SA Grabenstrasse 6 Case postale 8606 Naenikon Téléphone: 044 - 944 99 22 Fax: 044 - 944 99 88	
Art n° 124988 Omron			Florent Pochon FSE/FAE Sensing, Safety & ICD Ing. ETS OMRON Chemin des Fayards 2 CH-1032 Romanel s/Lausanne (+41 (0) 21 643.75.75 (+41 (0) 21 643.75.84 (direct)	rabais école 30% compris
DSA-1100 Limit switch	2	fr. 196.00		
Silicon Sensor Photodiode QP1-6-TO5 Photodiode APD AD1100-9 TO5i	1 1	fr. 100.00 fr. 180.00	Silicon Sensor International AG - Peter-Behrens-Straße 15 - D-12459 Berlin	
LITLEDIODE				
IC stepper motor SAA1042	2	fr. 75.00	commande sur internet	http://www.littlediode.com
TOTAL		fr. 1'672.00		

(13) Mesures**Mesure de position 1****Conditions**

Lumière ambiante :	non
Grandissement :	1x
Øétoile :	150 microns
p:	56.66 mm
p':	56.66 mm
ajustement focal:	oui
moyennage :	8
x0:	13.95 mm
y0:	9.69 mm
alimentation	11 V
puissance	0.0153 mW
Echelle de mesure amplificateur 4 cadrans : 1V/10 μ A	

$\Delta x[\text{micron}]$	$u_x[V]$	$\Delta y[\text{micron}]$	$\Delta u_y[V]$
-100	-7.4	-120	-6.56
-90	-7.4	-110	-6.56
-80	-7.2	-100	-6.48
-70	-7	-90	-6.32
-60	-6.72	-80	-6.32
-50	-6.24	-70	-6
-40	-5.52	-60	-5.76
-30	-4.56	-50	-5.52
-20	-3.36	-40	-4.88
-10	-2	-30	-3.92
0	0	-20	-2.8
10	1.36	-10	-1.68
20	2.96	0	0
30	4.64	10	1.28
40	6.16	20	3.04
50	7.52	30	4.72
60	8.8	40	5.76
70	9.4	50	6.8
80	10	60	7.68
90	10.2	70	8.6
100	10.4	80	9
110	10.6	90	9.2
120	10.8	100	9.4
130	10.8	110	9.4
140	10.8	120	9.6
		130	9.6

Mesure de position 2

Conditions

Lumière ambiante :	non
Grandissement :	1x
Øétoile :	100 microns
p:	56.66 mm
p':	56.66 mm
ajustement focal:	oui
moyennage :	8
x0:	13.705 mm
y0:	9.44 mm
alimentation	20V
puissance	0.0101 mW
Echelle de mesure amplificateur 4 cadrans : 1V/10 μ A	

$\Delta x[\text{micron}]$	$u_x[V]$	$\Delta y[\text{micron}]$	$\Delta u_y[V]$
-100	-7.36	-120	-6.4
-90	-7.28	-110	-6.4
-80	-7.12	-100	-6.32
-70	-6.96	-90	-6.24
-60	-6.88	-80	-6.16
-50	-6.56	-70	-6
-40	-6.08	-60	-5.76
-30	-5.2	-50	-5.6
-20	-3.84	-40	-5.12
-10	-1.84	-30	-4.56
0	0	-20	-3.6
10	2.08	-10	-2.08
20	4.32	0	0
30	6.24	10	1.92
40	7.6	20	4
50	8.4	30	6.16
60	8.8	40	7.6
70	9	50	8.4
80	9.4	60	9
90	9.4	70	9.2
100	9.6	80	9.4
110	9.6	90	9.6
120	9.8	100	9.6
130	9.8	110	10
		120	9.8
		130	10

Mesure de position 3

Conditions

Lumière ambiante :	oui
Grandissement :	0.33x
Øétoile :	50 microns
p:	114.15mm
p':	37.67 mm
ajustement focal:	oui
moyennage :	lecture analogique
x0:	13.50mm
y0:	11.25mm
alimentation	20V
puissance	0.0087 mW

Echelle de mesure amplificateur 4 cadrans : 1V/10 μ A

$\Delta x[\text{micron}]$	$u_x[V]$	$\Delta y[\text{micron}]$	$\Delta u_y[V]$
-66.6	-2.68	-53.28	-2.16
-63.27	-2.65	-49.95	-2.14
-59.94	-2.63	-46.62	-2.15
-56.61	-2.61	-43.29	-2.11
-53.28	-2.58	-39.96	-2.06
-49.95	-2.54	-36.63	-2.01
-46.62	-2.5	-33.3	-1.93
-43.29	-2.44	-29.97	-1.85
-39.96	-2.4	-26.64	-1.73
-36.63	-2.32	-23.31	-1.61
-33.3	-2.24	-19.98	-1.44
-29.97	-2.12	-16.65	-1.26
-26.64	-2.02	-13.32	-1.06
-23.31	-1.87	-9.99	-0.81
-19.98	-1.7	-6.66	-0.56
-16.65	-1.49	-3.33	-0.26
-13.32	-1.25	0	0
-9.99	-1.01	3.33	0.47
-6.66	-0.68	6.66	0.8
-3.33	-0.33	9.99	1.15
0	0	13.32	1.53
3.33	0.46	16.65	1.89
6.66	0.81	19.98	2.19
9.99	1.22	23.31	2.5
13.32	1.6	26.64	2.78
16.65	1.97	29.97	3.03

$\Delta x[\text{micron}]$	$u_x[V]$	$\Delta y[\text{micron}]$	$\Delta u_y[V]$
19.98	2.34	33.3	3.26
23.31	2.65	36.63	3.43
26.64	2.98	39.96	3.62
29.97	3.26	43.29	3.74
33.3	3.47	46.62	3.84
36.63	3.65	49.95	3.91
39.96	3.84	53.28	4.03
43.29	3.98	56.61	4.1
46.62	4.12	59.94	4.15
49.95	4.21	63.27	4.15
53.28	4.28	66.6	4.35
56.61	4.37	69.93	4.35
59.94	4.43	73.26	4.32
63.27	4.48		
66.6	4.52		
69.93	4.55		
73.26	4.58		

Mesure APD**Conditions**

Lumière ambiante : non

Grandissement : 3x

Øétoile : 333 microns

p: 37mm

p': 114 mm

résistance R1 :

résistance2 : 5010000 résistance 3 : 3330000 résistance 5 : 2020000

résistance1 : 9850000 [ohm] résistance 4 : 2510000

alimentation 10V

puissance lumineuse 0.046 mW

U_alim [VDC]	U_bias[VDC]	courant[μA]	Résistance R1
0	-0.1379	0.014	
5	0.469	0.46	
10	3.499	0.66	
15	8.33155	0.677	
20	13.1444	0.696	
25	17.8883	0.722	
30	22.4155	0.77	
35	26.44035	0.869	
40	29.8151	1.034	
45	32.52005	1.267	
50	34.6537	1.558	
55	36.3441	1.894	
60	37.78825	2.255	
65	38.9172	2.648	
70	39.8196	3.064	
75	40.722	3.48	
80	41.47665	3.911	
85	42.1131	4.354	
90	42.65105	4.807	
95	43.21855	5.257	
100	43.78605	5.707	
105	44.521	6.14	
110	45.76815	6.521	
115	47.2911	6.874	
120	49.0603	7.202	
125	50.9477	7.518	
130	52.94345	7.823	
135	54.9392	8.128	
140	57.0236	8.424	
145	59.0883	8.722	

U_alim [VDC]	U_bias[VDC]	courant[μA]	Résistance R1
150	61.153	9.02	
155	63.24725	9.315	
160	65.31195	9.613	
165	67.485	9.9	
170	69.4315	10.21	
180	73.62	10.8	
190	77.54255	11.417	
200	81.3666	12.044	
210	85.102	12.68	
220	88.76845	13.323	
230	92.28715	13.981	
240	95.6975	14.65	
250	98.9798	15.332	
260	102.0848	16.032	
187.4	104.55965	16.535	resistance 2
190	105.71677	16.823	
200	110.08553	17.947	
210	114.2088	19.12	
220	118.1968	20.32	
240	125.26098	22.902	
260	131.45843	25.657	
230	134.94848	28.544	resistance 3
240	138.28182	30.546	
250	141.32545	32.635	
260	144.19592	34.776	
270	146.73339	37.017	
280	149.17429	39.287	
290	151.33547	41.641	
270	154.81359	45.891	resistance 4
280	156.96482	49.018	
290	158.98553	52.197	
300	160.76779	55.471	
280	161.61588	58.606	resistance5
290	163.52376	62.612	
300	165.27408	66.696	

(14) Pin-out proposé pour le connecteur SUB-D

SUB-D mâle		SUB-D femelle	
départ	arrivée	départ	arrivée
broche n°1	capteur, pin A	broche n°1	ampli, borne A
broche n°2	capteur, pin B	broche n°2	ampli, borne B
broche n°3	capteur, pin C	broche n°3	ampli, borne C
broche n°4	capteur, pin D	broche n°4	ampli, borne D
broche n°5	capteur, masse	broche n°5	ampli, masse
broche n°6		broche n°6	
broche n°7		broche n°7	
broche n°8		broche n°8	
broche n°9	M1, borne 1	broche n°9	driver 1, pin 3
broche n°10	M1, borne 2	broche n°10	driver 1, pin 1
broche n°11	M1, borne 3	broche n°11	driver 1, pin 16
broche n°12	M1, borne 4	broche n°12	driver 1, pin 14
broche n°13		broche n°13	
broche n°14		broche n°14	
broche n°15	M2, borne 1	broche n°15	driver 2, pin 3
broche n°16	M2, borne 2	broche n°16	driver 2, pin 1
broche n°17	M2, borne 3	broche n°17	driver 2, pin 16
broche n°18	M2, borne 4	broche n°18	driver 2, pin 14
broche n°19		broche n°19	
broche n°20	S1, borne 1	broche n°20	USB 6008, P1.2
broche n°21	S1, borne 2	broche n°21	USB 6008, GND
broche n°22		broche n°22	
broche n°23	S2, borne 1	broche n°23	USB 6008, P1.3
broche n°24	S2, borne 2	broche n°24	USB 6008, GND
broche n°25		broche n°25	
broche n°26		broche n°26	

15 Journal de travail

16.02.10	Recherche de documentation en astronomie amateur, introduction du rapport	6h00
17.02.10	Recherche de documentation en astronomie amateur, introduction du rapport	8h30
24.02.10	Recherche de documentation et visite de l'observatoire de M. Claude D'èramo	8h30
26.02.10	Recherche et documentation, introduction du rapport	4h00
27.02.10	Recherche sur les propriétés du mesurande, avance dans le rapport	8h00
02.03.10	Recherche documentaire sur les capteurs optiques, rapport	6h00
03.03.10	Recherche sur les propriétés du mesurande, et capteurs optiques, rapport	9h00
04.03.10	Recherche sur les propriétés du mesurande, avance dans le rapport	3h30
06.03.10	Recherche documentaire sur les capteurs optiques, rapport	3h00
10.03.10	Concept de mesure et recherche sur les capteurs optiques, rapport	8h00
16.03.10	Principe de mesure et concept de mesure, rapport	5h00
17.03.10	Recherche de capteur 4 cadrans utilisables, recherche moteur piézo-électrique	8h30
24.03.10	Principe de mesure, recherche sur les systèmes Peltier, recherche moteur	8h30
25.03.10	Recherche sur les moteurs piézoélectrique, discussion sur le principe de détection avec M. Mayor	8h30
27.03.10	Principe de la table xy	3h00
29.03.10	Recherche moteur, dessin platine xy	5h00
30.03.10	Recherche capteur APD, téléphone capteur et moteur, dessin platine	8h00
31.03.10	Recherche moteur pas-à-pas, discussion sur la mécanique développée avec Mr. Dumusc, rechercher capteur APD	8h30
01.04.10	Téléphones concernant le moteur pas-à-pas et les capteurs, rapport	3h00
05.04.10	Construction mécanique Solidworks de la platine xy	6h00
06.04.10	Construction mécanique Solidworks de la platine xy	4H00
14.04.10	Construction mécanique Solidworks de la platine xy + commande de 2 type de capteur (1 photodiode APD et 2 photodiodes 4 cadrans)	5h00
15.04.10	Discussion avec Mr. Dumusc pour la partie mécanique	1h00
20.04.10	Confirmation de commande des photodiodes, recherche de guidage	8h30
21.04.10	Construction platine avec nouveaux guidages + nouveaux moteurs	8h30
24.04.10	Rapport banc d'essai optique	1h00
28.04.10	Recherche fin de course + construction mécanique de la platine + recherche IC pilotage du moteur pas-à-pas, programmation Labview pour interface utilisateur et prototype	8h30
29.04.10	Amélioration platine xy, programmation Labview interface utilisateur	5h00
30.04.10	Calcul d' inertie pour le dimensionnement moteur + programmation Labview	5h00
04.05.10	Mécanique Solidworks (3D+M.A.P.), demande d'offre pour moteurs+guidage	5h00
05.05.10	Mécanique Solidworks (3D+M.A.P.), commencement montage du premier banc d'essai pour tester la photodiode 4 cadrans	9h00
06.05.10	programmation Labview, mécanique Solidworks (M.A.P)	4h00
07.05.10	montage du 1 ^{er} banc optique, test d'une photodiode 4 cadrans	2h30
08.05.10	Dimensionnement des moteurs au propre, dernier contrôle des calculs	7h00
12.05.10	Mise en plan Solidworks + rdv avec M.Ottonin pour les pièces mécaniques	8h00
13.05.10	Mise en plan Solidworks, résolution du problème de pré-contrainte	6h00
15.05.10	Mise en plan Solidwork du dessin d'ensemble	8h00
17.05.10	Mise en plan des pièces	3h00
18.05.10	Résolution du problème de pré-contrainte (discussion M.Oberson et M. Mentano)	8h00
19.05.10	rdv m.Ottonin, pièces données à l'atelier, programmation Labview pour interface	8h00
26.05.10	Programmation Labview, cablage de la photodiode (soudure) et montage du premier banc d'essai optique	8h00
27.05.10	Rapport (chapitre interface utilisateur)	2h00

01.06.10	Montage du banc d'essai, premier essai avec interface Labview	8h00
02.06.10	Pièces mécaniques usinées, amélioration banc optique avec un oscilloscope	8h00
09.06.10	Rapport intermédiaire	7h30
10.06.10	Rapport intermédiaire	12h00
22.06.10	Programmation Labview	2h00
23.06.10	Programmation Labview	2h00
24.06.10	Programmation Labview	5h00
29.06.10	Cablage avec blindage du banc optique, installation du nouvel oscilloscope, calibration du banc d'essai	6h00
30.06.10	détermination par expérience du plan principal de l'objectif, calibrage avec un trou de 150mu	9h00
01.07.10	Mesure de la tension différentielle en fonction de la position pour une étoile de 150mu et de 100mu	9h00
06.07.10	Mesure tension différentielle en fonction de la position pour une étoile de 50mu et mesure de la puissance de chaque étoile simulée	8h00
07.07.10	Montage du banc pour tester l'APD, mesure du gain de l'APD	9h00
08.07.10	Rapport final	9h00
09.07.10	Rapport final	9h00
12.07.10	Mesure de déplacement étoile 50 microns avec lumière ambiante	8h00
14.07.10	Rapport final, Labview, algorithme « Refine position »	8h00
15.07.10	Rapport final, réception moteurs, contrôle et modification des écrous, montage de la platine	9h00
16.07.10	Rapport final	7h00
19.07.10	Montage de l'électronique pour l'interfaçage avec Labview, premiers tests	10h00
20.07.10	Tests, correction d'erreurs dans l'interface Labview, essais concluants de déplacement absolue, essais concluants des diverses fonctions (calibrations, etc.), rapport final	9h00
21.07.10	Rapport final	8h00
22.07.10	Relecture du rapport, correction finale et gravage du tout	8h00
23.07.10	Rendu du travail de diplôme, rangement et boire une bonne bière dans la fontaine de l'école...	1h00