

Etude préliminaire d'un télescope terrestre à grand champ

Ing. T. JOHNEN
Ing. E. LEGRAND
GRAMME – Liège

Cet article présente une étude réalisée en prévision d'un appel d'offres pour un télescope terrestre à grand champ lancé par des astronomes Espagnols auquel AMOS souhaitait participer. Le travail a porté sur une première conception 3D du télescope, une modélisation par éléments finis et le dimensionnement des moteurs. Le but de l'étude réalisée était de fournir à la société un début d'offre permettant à celle-ci, moyennant quelques adaptations simples au cahier des charges, de répondre à l'appel d'offres.

Mots-clefs : télescope, astronomie, optique, miroir, lentille, Catia, Samcef, éléments finis, dimensionnement moteur.

This article describes a study carried out in anticipation to a call for tender for a ground-based telescope with a large field of view required by Spanish astronomers in which AMOS wanted to take part. The work focused on a first 3D design of the telescope, as well as finite element modeling and sizing of engines. The purpose of the study was to provide the company with an early quotation which would enable it, thanks to some simple adaptations to the schedule of conditions, to meet the request for quotation.

Keywords : telescope, astronomy, optic, mirror, lens, Catia, Samcef, finite elements, sizing of engine.

1. Introduction

Il y a de cela quatre cents ans, un homme eut l'idée d'utiliser un jeu de lentilles pour le pointer vers le ciel. Cet acte aux apparences insignifiantes a servi de tournant pour l'Humanité en lui permettant de prendre conscience au fil des années que l'univers qui l'entoure ne contient pas que les planètes du système solaire et des étoiles mais une multitude de choses toutes plus surprenantes les unes que les autres.

Ainsi, l'Homme construit des instruments optiques depuis 4 siècles. Ceux-ci n'ont cessé d'être améliorés de décennie en décennie et sont aujourd'hui plus que jamais au centre d'une véritable résolution technologique. Cela n'est pas étonnant. En effet, André Boisshot et James Lequeux disaient : « *L'astronomie s'est toujours distinguée nettement des autres sciences, car elle est par essence une science d'observation, et non une science expérimentale, comme la physique ou la chimie. L'astronome ne peut agir sur le milieu qu'il étudie, mais doit se contenter de l'observer de l'extérieur. Cela explique que les progrès de l'astronomie, plus que ceux d'aucune autre science, soient liés au développement des instruments d'observation*¹. » Ce domaine de la technique a donc encore de belles années devant lui car l'astronomie restera sans doute une préoccupation de l'Homme pendant longtemps.

Le défi auquel les opto-mécaniciens font face tous les jours est d'arriver à intégrer des instruments optiques nécessitant une précision mille fois supérieure à celle du squelette mécanique au sein duquel ils sont placés. Les ondes que les télescopes observent ont des longueurs d'onde pouvant aller de 10 nm (10^{-9} mètre) pour l'ultraviolet à 1 mm pour l'infrarouge. Et les défauts sur l'optique doivent être de grandeur inférieure ! En général, l'état de surface d'un miroir doit être précis à quelques dizaines de nanomètres alors qu'en mécanique fine, la précision que l'on obtient actuellement est de l'ordre de quelques dizaines de μm (10^{-6} mètre). Le défi que doit relever l'opto-mécanicien tous les jours, est donc de concevoir un habillage mécanique aussi rigide et stable que possible, qui supporte les optiques sans les influencer.

¹ Boisshot A. est un astronome ayant surtout travaillé en radioastronomie. Lequeux J. a notamment été le rédacteur en chef de « Astronomy and Astrophysics » durant 15 ans.

Pour construire de tels bijoux technologiques, plusieurs millions d'euros sont nécessaires; le prix augmentant exponentiellement avec la taille du miroir collecteur. Plusieurs années d'études sont indispensables afin d'arriver à un résultat optimal. Bien que la technologie soit maîtrisée et que l'on puisse se baser sur les télescopes construits précédemment, chaque nouvel instrument requiert de recommencer toute l'étude. En effet, les télescopes sont commandés afin de répondre à un ou des buts scientifiques particuliers des astronomes et chacun est donc conçu pour répondre à ces besoins. Bien que des centaines de télescopes soient en fonctionnement à travers le monde, il n'y en a pas deux qui soient identiques.

Cet article va présenter une pré-étude qui devait permettre de répondre à un appel d'offre pour un télescope espagnol de 250 cm. Cet appel d'offre devait sortir durant la période pendant laquelle le TFE, dont cet article est un résumé, a été réalisé. Finalement, il n'est sorti qu'au mois d'octobre, soit après la période du stage. La pré-étude a donc été menée à l'aide d'un cahier de charges qu'AMOS possédait suite à une étude conceptuelle qui avait été commandée par le client avant le début de ce travail.

L'article reprend dans les grandes lignes, l'ordre chronologique dans lequel s'est déroulé tout ce travail, à savoir, d'abord, au paragraphe 2, en quoi consiste un télescope. Une fois cette étape achevée, il a fallu étudier le cahier de charges qui se retrouve dans le paragraphe 3. De là, un premier design du télescope est sorti qui se trouve au paragraphe 4. Une étude mécanique par éléments finis a ensuite été réalisée sur une des parties du télescope, ainsi qu'un premier dimensionnement des moteurs qui le constituent, respectivement aux paragraphes 5 et 6.

Suite à ces dimensionnements, le design du télescope a été modifié et est présenté dans le 7^{ième} paragraphe de cet article.

2. Principe des télescopes

Un télescope (du grec *tele* signifiant « loin » et *skopein* « regarder, voir ») est un instrument optique qui permet d'augmenter la taille apparente des objets observés et surtout leur luminosité. Son rôle de concentrateur de lumière étant aussi, voire plus important que son grossissement optique, il permet d'apercevoir des objets célestes ponctuels invisibles à l'œil nu.

Les télescopes sont principalement utilisés en astronomie, car leurs réglages ne les rendent propices qu'aux observations d'objets très éloignés.

Il ne faut pas confondre le télescope avec une lunette astronomique. En effet, la principale différence entre ces deux instruments réside dans l'utilisation d'éléments optiques. La lunette utilise uniquement des lentilles pour augmenter la taille des objets, cela implique que l'instrument est long par rapport au diamètre des lentilles.



Figure 1 : Une des premières lunettes astronomiques réalisée par Galilée.

Au contraire, les éléments principaux d'un télescope sont des miroirs. L'utilisation de miroirs a deux avantages. Premièrement, ils permettent de replier le faisceau lumineux, ce qui a pour avantage d'obtenir un instrument beaucoup plus compact.



Figure 2 : Une réplique du télescope de Newton.

Le deuxième avantage se situe au niveau de la physique ondulatoire, le miroir n'influence pas l'onde lumineuse comme le fait une lentille. L'indice de réfraction est fonction de la longueur d'onde ce qui crée des aberrations chromatiques. Quand une onde traverse un milieu transparent, elle est plus ou moins réfractée comme le montre la figure 3.

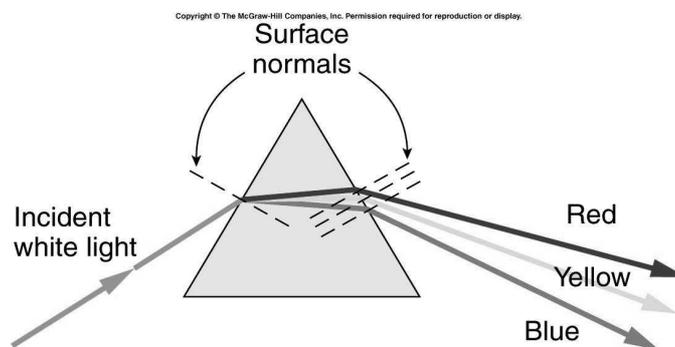


Figure 3 : La lumière se transformant en arc-en-ciel en passant dans un prisme.

3. Le projet ACTUEL

Le télescope ACTUEL est un télescope possédant un miroir collecteur de 250 cm et de 3° de champ de vue (FoV). Il est commandé par des astronomes espagnols de la CEFCA (Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragon) pour être installé au Pico del Buitre, une montagne de la province d'Aragon, proche de la ville de Teruel.

Ce site a été choisi car il est très peu pollué par la lumière des villes avoisinantes comme le montre la figure ci-dessous. Il faut savoir qu'une source lumineuse telle qu'une autoroute éclairée diminue la qualité d'observation d'un site se situant à 50 km de cette autoroute !

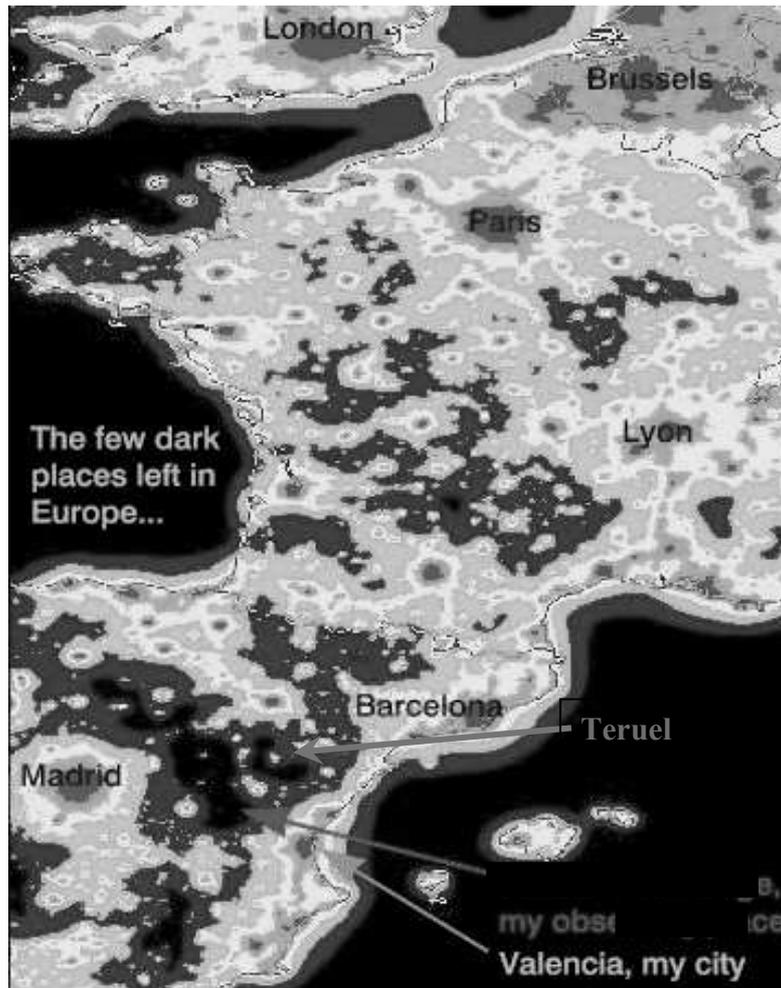


Figure 4 : Pollution lumineuse en Europe.

Une maquette du futur site d'observation est présentée à la figure 5. La grande tour est le dôme du télescope de 250 cm (T250). Le plus petit bâtiment blanc est destiné à protéger un télescope de 80 cm (T80). La structure foncée est le bâtiment de contrôle de ces deux télescopes.

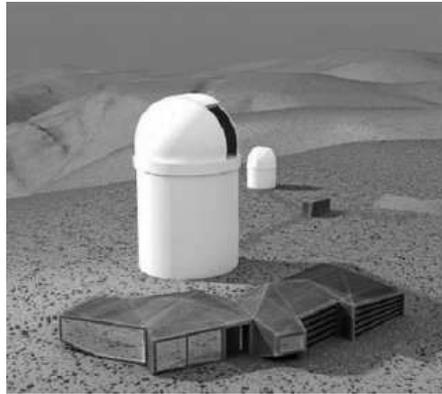


Figure 5 : Maquette du site d'observation.

Le projet dont il est question ici concerne un télescope à grand champ (c'est-à-dire qu'il peut observer une grande zone de l'espace en une exposition). La difficulté de ce type d'instruments réside surtout dans la réalisation de ses éléments optiques. Ce domaine ne sera pas traité ici.

Le télescope doit être de type Ritchey-Chrétien (RC). Il est constitué d'un premier miroir collecteur, appelé miroir primaire qui mesure 250 cm de diamètre. La lumière est renvoyée vers un deuxième miroir, le miroir secondaire. La lumière est enfin collectée par un détecteur se situant derrière le miroir primaire. Celui-ci est donc percé au centre comme le montre la figure 6.

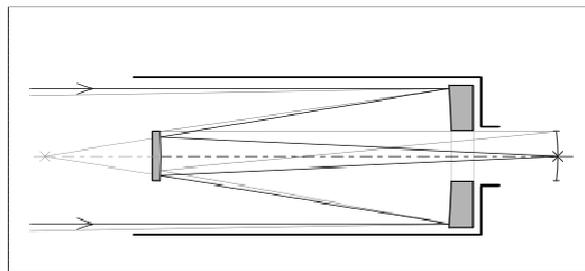


Figure 6 : Configuration Ritchey-Chrétien.

La monture doit être de type Alt-AZ. Elle est constituée de deux axes perpendiculaires, l'un vertical, l'autre horizontal. L'axe horizontal est appelé altitude (OX), l'axe vertical est nommé azimut (OZ). Ces deux axes

déterminent comment le télescope suivra l'objet observé au moyen des moteurs.

Tous ces termes sont présentés à la figure 7.

Nous profitons de ce paragraphe pour préciser les limites de l'étude qui nous avait été demandée : proposer un design de télescope pouvant servir à répondre à l'appel d'offre en portant une attention particulière aux parties "miroir primaire" et "instrumentation". Par la suite, l'étude dimensionnelle d'une autre partie du télescope, ainsi que celle des moteurs sont venues s'ajouter au travail.

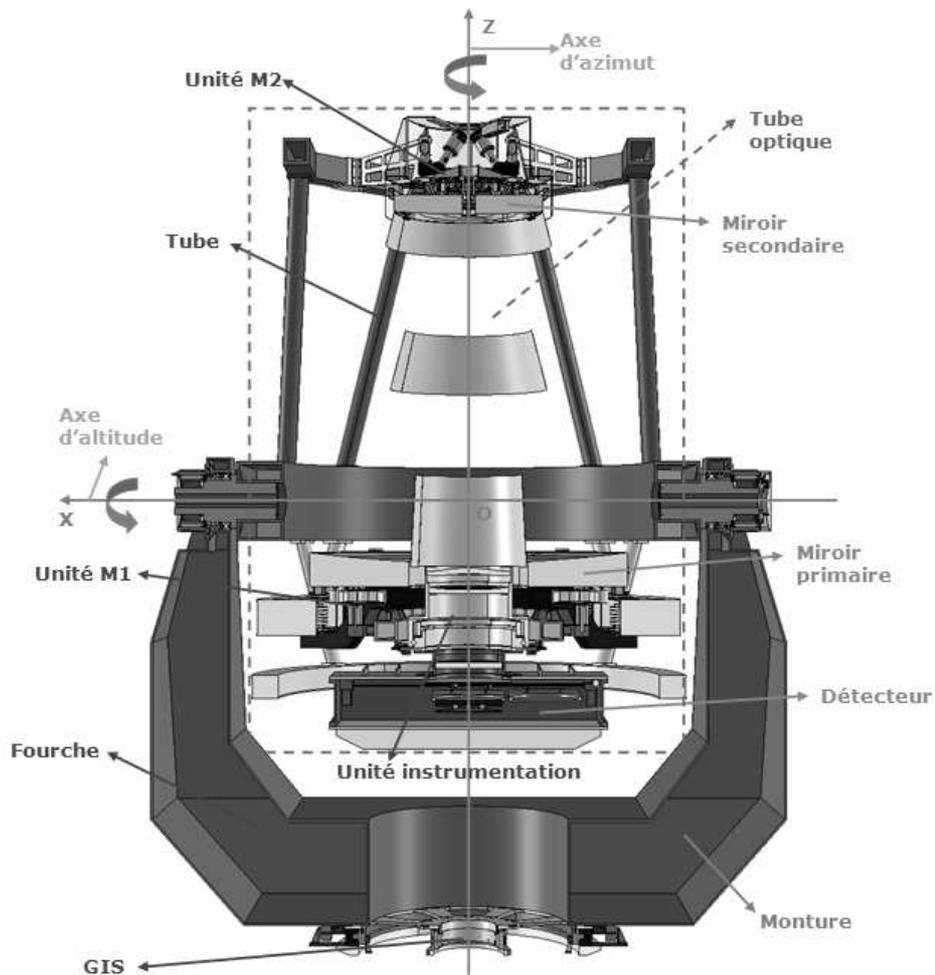


Figure 7 : Coupe du télescope.

4. Le design

Une difficulté de ce projet réside dans la création d'un habillage mécanique indépendant pour soutenir d'une part le miroir primaire, et d'autre part, le détecteur et les lentilles car ce télescope sera amené à pouvoir fonctionner avec plusieurs instruments dont les spécifications ne sont pas encore connues. Il est donc plus aisé de concevoir un support pour le miroir primaire qui restera toujours le même et d'autre part concevoir un support qui permettra de supporter l'instrument sans influencer le miroir primaire. De plus, pour des raisons de coût et d'encombrement, ces deux supports doivent être le plus compact possible.

Il faut également avoir à l'esprit que l'habillage mécanique doit permettre de soutenir les différentes optiques sans les influencer (les déformer). Il faut donc concevoir une architecture à la fois quasi-isostatique et super rigide afin de ne pas sur-contraindre les optiques. En effet, la précision nécessaire pour la fabrication des optiques est mille fois plus importante que celle que nous pouvons espérer obtenir en mécanique fine comme il a été dit dans l'introduction.

4.1 Le tube

Le tube est l'ossature qui permet de soutenir les différentes unités optiques. Les unités sont reliées, au moyen de profilés, à la pièce centrale, nommée la « center piece ». Celle-ci doit être centrée sur les axes d'altitude et d'azimut. Il faut également faire en sorte que le centre de gravité du tube avec les unités optiques incluses (le tube optique) soit centré sur ces deux axes ; ainsi, les moteurs ne devront pas reprendre un couple dû à un mauvais équilibrage du tube optique.

4.2 L'unité M1

L'unité M1 sert à soutenir le miroir primaire. Pour cela, deux supports sont présents : l'un pour reprendre les efforts axiaux, l'autre pour reprendre les efforts latéraux. Ces efforts sont uniquement dus au poids du miroir primaire (2,2 tonnes).

Le support axial est un mécanisme classique qui se nomme en anglais « whiffletree ». Ce mécanisme est constitué de plusieurs étages, chacun d'eux étant constitué soit d'un tripode (trois fixations), soit d'un bipode

(deux fixations), soit d'une aiguille (une fixation) ; le tout étant solidarisé à l'aide de rotules pour former une structure quasi-isostatique.

Le support latéral est un mécanisme composé de plusieurs aiguilles qui, au moyen de contrepoids, exercent une force opposée à la force de gravité exercée par le miroir.

4.3 L'unité M2

L'unité M2 permet de soutenir le miroir secondaire à l'aide de deux supports comme dans le cas de l'unité M1. De plus, un hexapode est présent pour corriger sa position en temps réel.

4.4 L'unité instrumentation-Lentilles

Cette unité est constituée du support qui permet de soutenir le détecteur et les lentilles. Il est dimensionné afin de permettre son intégration dans le « whiffletree » de l'unité M1 et de permettre aux rayons lumineux d'atteindre le détecteur.

4.5 La fourche

Les possibilités offertes aux astronomes par le télescope dépendront de la qualité de la fourche. En effet, celle-ci doit être rigide et stable car c'est elle qui imprime les mouvements de rotation. De plus, elle doit soutenir le tube optique.

4.6 Le G.I.S.

Le GIS signifie en anglais « Ground Interface Structure ». C'est sur cette structure que le télescope repose. Il permet à la fourche de tourner sur l'axe azimutal.

5. Dimensionnement préliminaire du tube

Le dimensionnement de l'ossature a été réalisé à l'aide du logiciel Samcef. Cette ossature doit être correctement dimensionnée car elle doit permettre un désalignement minimum entre les optiques quel que soit l'angle du tube par rapport au zénith.

Le modèle a été conçu dans le module Bacon (c'est-à-dire que tout a été réalisé à l'aide de lignes de commande). Pour concevoir ce modèle, les dimensions du modèle Catia ont été reprises afin d'arriver finalement à une solution acceptable pour une pré-étude. Les différentes unités optiques n'ont pas été complètement modélisées et ont été remplacées par des corps rigides.

Les éléments de modélisation utilisés sont de type poutre et coque. Le modèle de Catia ne pouvait donc pas être importé directement dans Samcef car les éléments auraient été de type tétraédrique. L'avantage a été d'obtenir moins de 5000 nœuds dans le modèle Samcef contre 300000 pour un maillage Catia importé dans celui-ci. Le temps de calcul du modèle a donc été beaucoup plus court avec le modèle créé dans Samcef que s'il avait été importé.

Le matériau utilisé pour l'ensemble du modèle est de l'acier ayant les caractéristiques suivantes :

- module de Young : 210000 N/mm²
- coefficient de Poisson : 0,3
- masse volumique : 7860 kg/m³

Les déformations devant être très faibles, ainsi, c'est le calculateur de modèle élastique (asef) de Samcef qui a été utilisé.

Lors de cette pré-étude, c'est surtout l'effet de la gravité sur la structure quand celle-ci pointe vers l'horizon (la gravité selon OY dans les axes du télescope) qui a été analysé (voir la direction sur la figure 9).

Afin d'optimiser le modèle, nous avons joué sur différents paramètres d'épaisseur des éléments constituant l'ossature. Il y en avait en tout 17 dans le modèle.

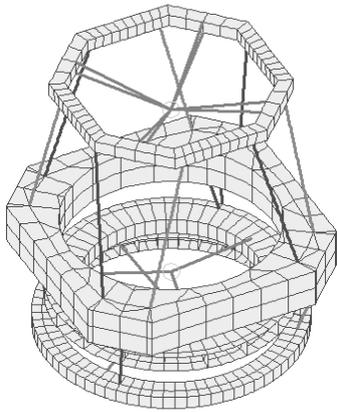


Figure 8 : Dernier modèle Samcef.

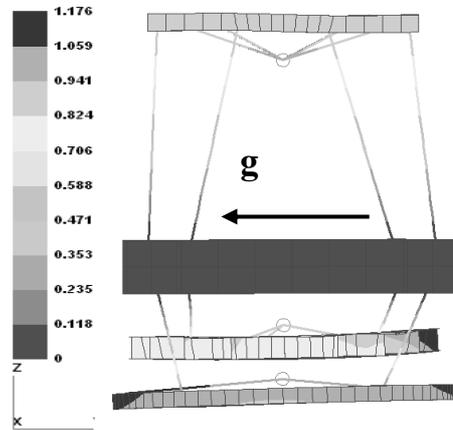


Figure 9 : Dernier résultat sous une gravité selon OY.

Déplacement [mm]	1 ^{er} résultats	Derniers résultats		
	Gravité selon OY	Gravité selon OY	Gravité selon OZ	Gravité à 70° par rapport à OZ
Maximal	7,094	1,176	1,267	0,991
Unité M2	7,094	0,952	0,227	0,388
Unité M1	2,861	0,901	0,627	0,589
Instrumentation	5,828	1,012	0,448	0,542
Masse [kg]	13300	16430		

Tableau 1 : Valeurs récapitulatives des résultats obtenus.

Au vu des deux premières colonnes, les résultats ont été améliorés d'un facteur sept. L'augmentation de la masse de l'ossature est due à l'augmentation des différentes épaisseurs qui la constitue. Les deux dernières colonnes montrent uniquement les déplacements que nous obtenons sans avoir cherché à les optimiser lorsque la gravité est appliquée dans d'autres directions car nous sommes toujours dans une phase de pré-étude pour répondre à un appel d'offre.

6. Dimensionnement préliminaire des moteurs

Le dimensionnement des moteurs est un point auquel il faut faire attention. En effet, comparé à d'autres sites astronomiques, le site de Javalambre est sous l'influence de vents importants.

Les moteurs sont soumis à des couples de quatre natures différentes :

$$T = T_{wind} + T_{bearing} + T_{inertia} + T_{umb}$$

où

- T_{wind} correspond au couple dû au vent ;
- $T_{inertia}$ correspond au couple dû à l'accélération angulaire ;
- $T_{bearing}$ correspond au couple résistant des roulements ;
- T_{umb} correspond au couple engendré par un décentrement entre le CoG de la structure à motoriser et l'axe du ou des moteurs.

Le tableau suivant reprend le récapitulatif des résultats obtenus dans les différents cas analysés.

Couple [Nm]	Moteurs d'altitude		Moteur d'azimut
Vent [m/s]	18	40	0
T_{wind}	4.500	22.220	0
$T_{inertia}$	0	1.060	1.860
$T_{bearing}$	62	60	442
T_{umb}	0	60	0
T_{total}	4.562	23.400	2.915

Tableau 2 : Récapitulatif des couples moteurs calculés pour les deux axes.

La première et la dernière colonne déterminent les couples permanents que devront reprendre les moteurs choisis. Pour l'axe d'altitude, le « peak torque » nécessaire a également été calculé.

7. Améliorations du design

Suite aux différents pré-dimensionnements, le design du télescope ACTUEL a changé. Le changement majeur se situe au niveau de la fourche qui doit permettre l'intégration de moteurs deux fois plus puissants. Un couvercle pour protéger le miroir M1 a été ajouté, de même qu'une chaîne sur la fourche.

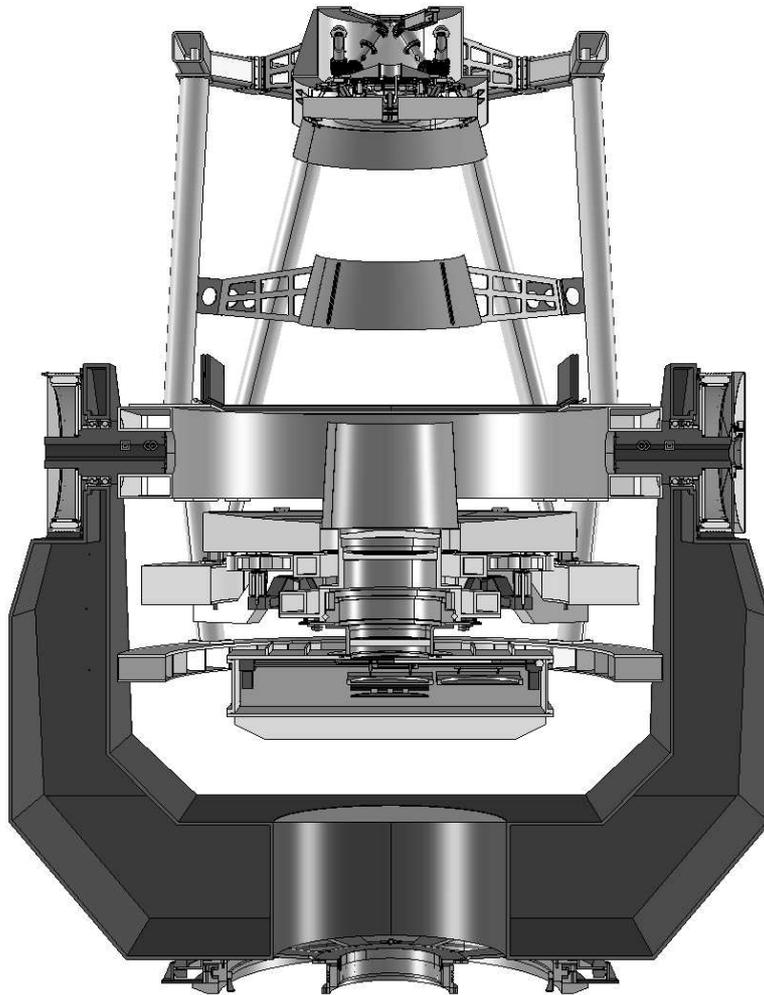


Figure 10 : Design final.

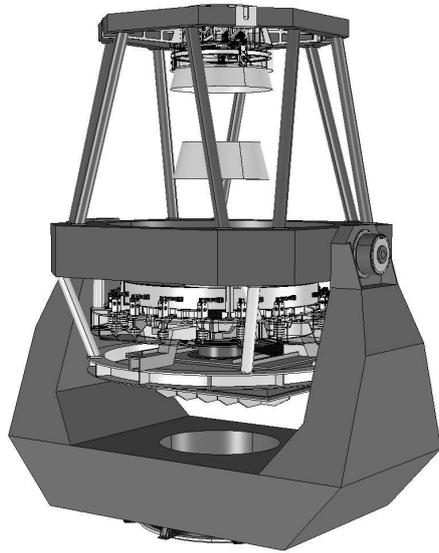


Figure 11 : Premier modèle.

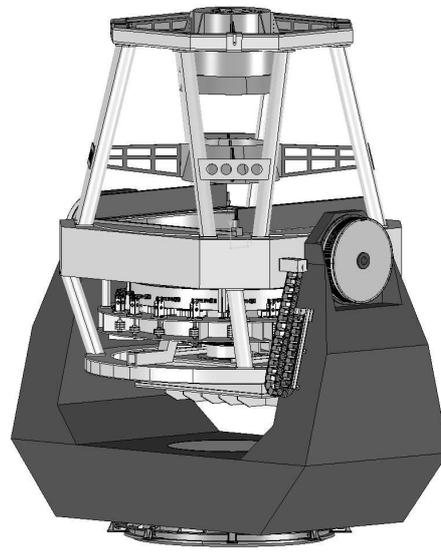


Figure 12 : Dernier modèle.

Ce design est bien proportionné dans son ensemble, par contre il est fort léger. Les épaisseurs sont donc globalement trop faibles. Cette analyse a été menée par comparaison avec un autre projet fort semblable.

8. Conclusions

Le but de ce travail était de proposer un design de télescope afin de répondre à un appel d'offre de la part du CEFCA qui n'est paru qu'après la période du stage. Pour arriver à ce résultat, une recherche documentaire a été réalisée afin de mieux comprendre toute la problématique de la conception d'un tel instrument. La base de données de la société AMOS où cette étude a été menée a également servi de point de départ.

Le design du télescope est très avancé. En effet, en dehors du GIS, presque tous les sous-ensembles sont dessinés. De plus, le télescope est déjà fort détaillé pour un devis grâce à la réutilisation de sous-ensembles existants. Cela ne pourra être qu'un atout lorsque l'offre sera remise.

L'originalité du projet a permis de mettre en évidence son aspect polyvalent, qui a demandé de conjuguer les différentes disciplines de l'ingénierie et de

la science comme la physique optique, la conception mécanique, le calcul par éléments finis et le dimensionnement de moteurs. Les différents domaines abordés relèvent de la mécanique, de l'optique, des éléments finis et de l'électromécanique.

Comme il a été dit dans l'introduction, l'appel d'offre est sorti début octobre 2009. Ce travail a donc permis d'établir une base pour répondre à l'offre. L'offre finale a été rendue début janvier 2010 et nous espérons que le présent travail permettra à AMOS de remporter la commande conduisant à de nouveaux défis et de nouvelles activités intéressantes dans la région.

9. Références bibliographiques

BLANCHARD, Guillaume, *Observation avec une lunette et un télescope*, 1^{ière} édition, Delachaux et Niestlé SA, Paris, 2009.

BOISCHOT, A., et LEQUEUX, J., *Astronomie et Astrophysique*, Encyclopédie Universalis des sciences tome 1, juin 2005, P327.

BOERAEVE, Philippe, *C.A.O. Introduction à la méthode des Eléments Finis (MEF)*, Liège, 2007.

CESCOTTO, S., et MASSONNET, C., *Mécanique des matériaux*, 2^{ième} édition, De Boeck Université, Bruxelles, 1992.

DROUIN, G., GOU, M., THIRY, P., VINET, R., *Eléments de machines*, 2^{ième} édition, Editions de l'école polytechnique de Montréal, Canada, 1986.

ECCS, *Recommendations for Calculating the Effects of Wind on Constructioins*, second edition, Bruxelles, 1987.

FANCHON, Jean-Louis, *Guide de mécanique*, 1^{ière} édition, Nathan, Paris, 2001.

FANCHON, Jean-Louis, *Guide des sciences et technologies industrielles*, 2^{ième} édition, Nathan/AFNOR, Paris, 2006.

GEYL, Roland, *Conception optique - Calcul des combinaisons*, 6^{ième} édition.

HECHT, Eugene, *Optique*, 4^{ième} édition, Pearson Education France, Paris, 2005.

JOHNEN, Tanguy, *Etude préliminaire de télescopes terrestres à grand champ*, Liège, 2009.

MEINEL, A. B., *Astronomical Telescopes*, University of Arizona, Tucson, Arizona, Chapter 6.