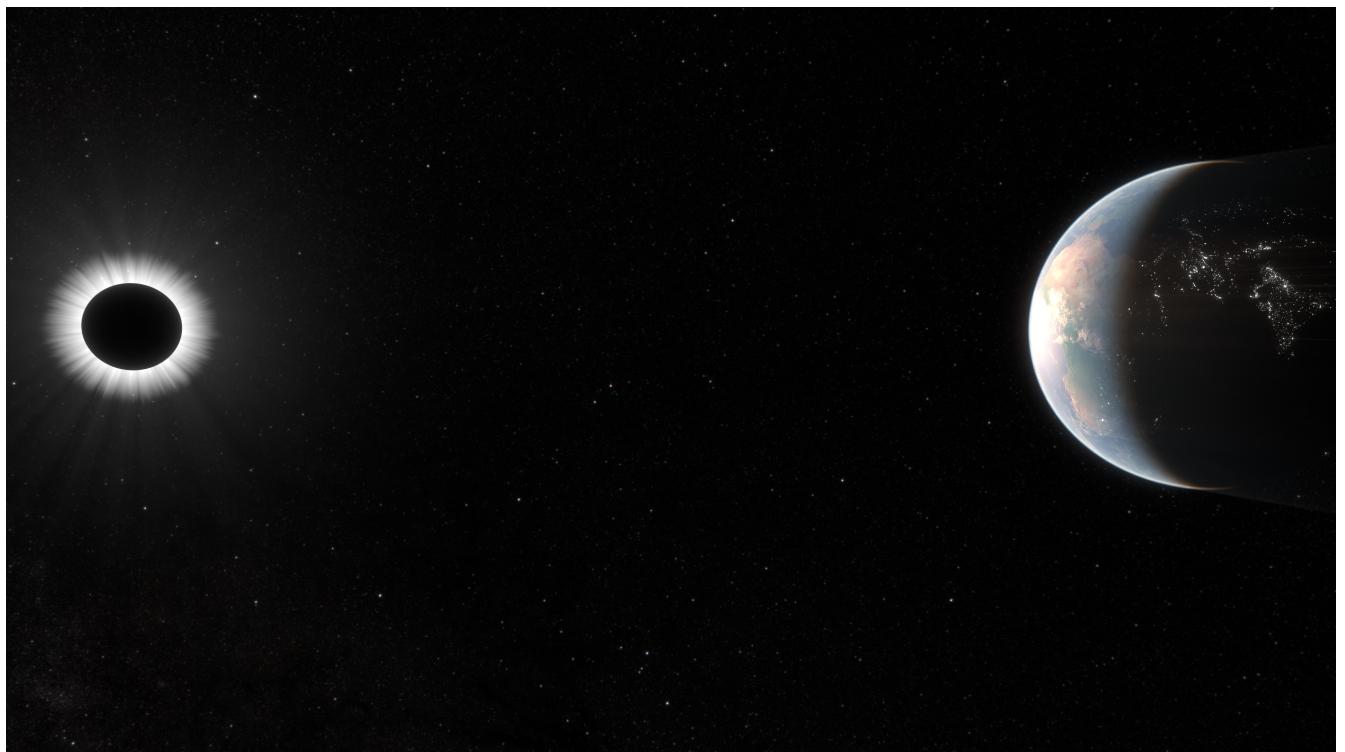


Rapport de Stage

Vincent Callegari

August 23, 2024



Contents

1	Introduction	3
1.1	la problématique	3
1.2	Entreprise du stage	3
2	travail demandé	4
2.1	objectif du stage	4
2.2	tâches	4
3	travail effectué	6
3.1	première observations	6
3.2	calcul des observations	6
3.3	contrôle optimal	9
3.4	analyse de résultat	10
4	Conclusion	11
4.1	compétence acquise	11
4.2	travail réalisé	11
4.3	possibilités pour aller plus loin	11
5	Glossaire	13

1 Introduction

1.1 la problématique

Le but de ce stage est de trouver des trajectoires viable de satellite pour observer la couronne solaire en utilisant la Lune comme corps occultant, le tout avec comme système de propulsion une voile solaire.

La voile solaire fonctionne de la même manière qu'une voile normale à l'exception qu'elle utilise la quantité de mouvement de la lumière au lieu de la quantité de mouvement de l'air pour changer de vitesse. Les forces générées par des voiles solaires ne peuvent pas être dirigées dans toutes les directions et sont très faibles en comparaison d'autres formes de propulsion les plus utilisés par les véhicules spatiaux mais ont le grand avantage de ne pas dépendre de carburant.

L'observation de la couronne solaire est compliquée car elle est bien moins lumineuse que le soleil lui-même. Afin d'observer cette couronne, il est donc nécessaire d'occulter le disque solaire. Il est possible d'effectuer de telles observations en utilisant un coronographe. Cependant plus l'objet utilisé pour occulter le soleil est grand et éloigné, plus l'observation peut être précise. Les planètes, planètes naines et autre astre sphérique opaque sont donc des objets idéaux pour effectuer des mesures car leurs tailles excèdent largement tout objet occultant que l'humanité peut construire à ce jour.

L'objet du système solaire qui semble le plus indiqué pour être utilisé comme astre occultant est la Lune car son absence d'atmosphère significative et sa grande proximité avec la Terre combinée avec sa petite taille permettent d'effectuer des observations à distance relativement faible (environ égale à la distance Terre-Lune) tout en ayant les avantages énoncés plus tôt.

Sur Terre il est possible d'effectuer des observations de la couronne solaire durant les éclipses totales où la Lune joue le rôle d'objet occultant. Cependant ces observations ont lieu en moyenne une fois tous les 18 mois et ne permettent des observations de quelques minutes à peine. L'idée serait de placer un satellite sur des trajectoires qui permettent de faire des observations plus souvent et pendant plus longtemps.

La contrepartie lorsque l'on utilise une planète comme objet occultant est qu'on ne peut contrôler sa trajectoire et que le satellite est contraint de suivre l'objet, ce qui demande de résoudre un certain nombre de problèmes et de se plier à un certain nombre de contraintes.

C'est ici l'objectif de mon stage, étudier les possibilités d'effectuer des observations de la couronne solaire en utilisant la Lune comme objet occultant.

Dans ce rapport, je vais détailler le travail que j'ai effectué et les conclusions et résultats auxquels je suis arrivé ainsi que les compétences acquises au cours du stage.

1.2 Entreprise du stage

l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA) est un laboratoire public de recherche. Il est implanté dans de nombreux sites comme la région parisienne, Bordeaux, Grenoble, Rennes etc ... J'ai effectué mon stage sur le site de Sophia Antipolis (Alpes Maritimes). Le laboratoire a été fondé en 1967 (il s'appelait alors seulement l'Institut de recherche en informatique et en automatique ou IRIA) dans le cadre de l'initiative du plan Calcul visant à s'assurer que la France conserve une indépendance en innovation informatique.

2 travail demandé

2.1 objectif du stage

Le travail qui m'a été demandé durant ce stage regroupait plusieurs tâche : tout d'abord, étudier comment se déplaçait la zone d'observation de la Lune au cours du temps (la zone d'observation étant où le soleil est caché par la lune mais où la couronne solaire reste visible). Ensuite il fallait , à partir de ces résultats, essayer de trouver des trajectoires qui permettraient de traverser la zone d'observation de manière répéte et de rester le plus longtemps possible à l'intérieur de cette zone lorsque l'on la traversait.

Étant donné qu'il y aura sans doute de nombreuses forces perturbatrices et qu'une trajectoire passive (un objet sans contrôle qui ne subit que les forces de gravité de la Terre, Lune, Soleil etc ...) ne traversera sans doute pas la zone d'observation très souvent, il est nécessaire d'ajouter au système un contrôle de trajectoire sous la forme d'une voile solaire. Cette voile permettrait au satellite de changer et de corriger sa trajectoire afin de maximiser les observation.

Il s'agit d'un problème de contrôle optimal.

Le but final du projet est de présenter un rapport final rapportant tous les résultats et observations faîtes lors du stages ainsi que des programmes capable de calculer différentes valeur utile (zone d'observation, trajectoire de satellite ou contrôle de ce dernier)

2.2 tâches

En résumé mon travail se répartit en plusieurs étapes décrite ci après:

- calculer la trajectoire de la zone d'observation
- trouver des trajectoires passive (sans contrôle) qui permettent des observations
- trouver des trajectoires active (avec contrôle) qui permettent des observations répétés
- résumer mes résultats dans un rapport

Calculer les trajectoires de la zone d'observation demandera dans un premier temps d'étudier de la littérature scientifique en rapport avec ce thème puis de définir avant d'implémenter des modèles mathématiques afin de pouvoir passer à la seconde étape.

L'étape suivante consiste à trouver des trajectoire passive (c'est à dire sans contrôle). Pour cela il faudra implémenter un programme qui simulera la dynamique de l'objet ainsi que trouver une méthode adapté pour évaluer des trajectoires effectuant des observations afin de sélectionner les meilleur scénario et avoir une idée générale de la forme des observations.

Par la suite il faudra étudier ajouter un contrôle dans l'optique de maximiser le nombre d'observations. C'est à ce moment là que l'on pourra obtenir une réponse sur la possibilité d'utiliser une voile solaire et les solutions alternative.

Pour finir il faudra résumer tout le travail et tous les résultats obtenu dans un rapport rédigé en anglais ainsi que rendre les programmes informatique produits lisible et clair dans l'optique d'utilisations futures de ces codes par des personnes potentiellement étrangères au projet.

3 travail effectué

3.1 première observations

Avant de commencer à travailler sur le problème, il fallait que j'en apprennent plus sur les notions du projet, j'ai donc lu divers articles sur des projets d'occultation solaire à l'aide de la Terre (utilisée comme astre occultant), une thèses sur les voiles solaires, ainsi qu'un cours sur le contrôle optimal car je n'ai pas encore eu de cours sur ce sujet.

J'ai commencé par analyser le déplacement de la zone d'observation de la Lune, j'ai utilisé comme base des travaux qui avait déjà été effectué en utilisant la Terre comme objet occultant. J'ai utilisé des notions basiques de géométrie pour déterminer où se trouvait la zone d'observation de la Lune en fonction de sa position, étant donnée que l'opération consistant à vérifier que l'objet se situait dans la zone d'observation était une des opérations qui sera la plus utilisé dans les calculs j'ai également déterminé quel paramètres pouvaient être négligés afin de rendre le calcul plus simple.

Après avoir utilisé des outils graphiques pour visualiser clairement la forme de la zone d'observation et avoir déjà calculé à la main des candidats d'observation qui semblait être intéressante j'ai recherché une bonne méthode pour évaluer des trajectoires.

Je suis arrivé à la conclusion que chercher à trouver des orbites effectuant plusieurs observations était inefficace en comparaison de chercher des orbites faisant une seule longue observations à cause du fait que la majorité des observations possibles sont courtes contre quelque rares mais très longues observations.

3.2 calcul des observations

Une fois cette étape théorique passé , j'ai implémenté le modèle dans Matlab ainsi qu'une méthode permettant de calculer le temps passé dans la zone d'observation en fonction d'une vitesse et position initiale situé dans la zone d'observation. Cette méthode simule la dynamique du système avant et après la position initiale pour déterminer l'instant où l'objet entre dans la zone et l'instant où ce dernier en sort ce qui permet de calculer le temps d'observation.

J'ai pu obtenir de premiers résultat consistant simplement à fixer tout les paramètres sauf un et d'afficher dans un graphe les variations causée. Ces résultats ont permis de mettre en évidence deux points de l'orbite lunaire qui semblait être assez intéressants pour effectuer des observations : ces deux points se situant aux moments où le Soleil, la Terre et la Lune forment un angle d'environ 60 degrés (observation ascendante et observation descendante). Du point de vue de la Terre cela représente les moments où un tiers de la Lune est illuminé par le Soleil. le satellite se situera aussi sur l'orbite de la Lune mais 60 degrés plus loin (le Soleil, la Terre et le satellite formerais donc un angle de 120 degrés) mais se déplacerait dans la même direction que la Lune afin d'accompagner la zone d'observation (voir figure 1). Il faut noter cependant que ces résultats sont valables dans un modèle très simplifié (orbite lunaire ronde, soleil fixe, distance de la zone d'observation exactement égale au rayon de l'orbite lunaire etc...), les vrais résultats ont des orbites assez similaires mais de nombreux facteurs font que les valeurs optimales ne correspondent pas exactement à ce qui est énoncé ci dessus.

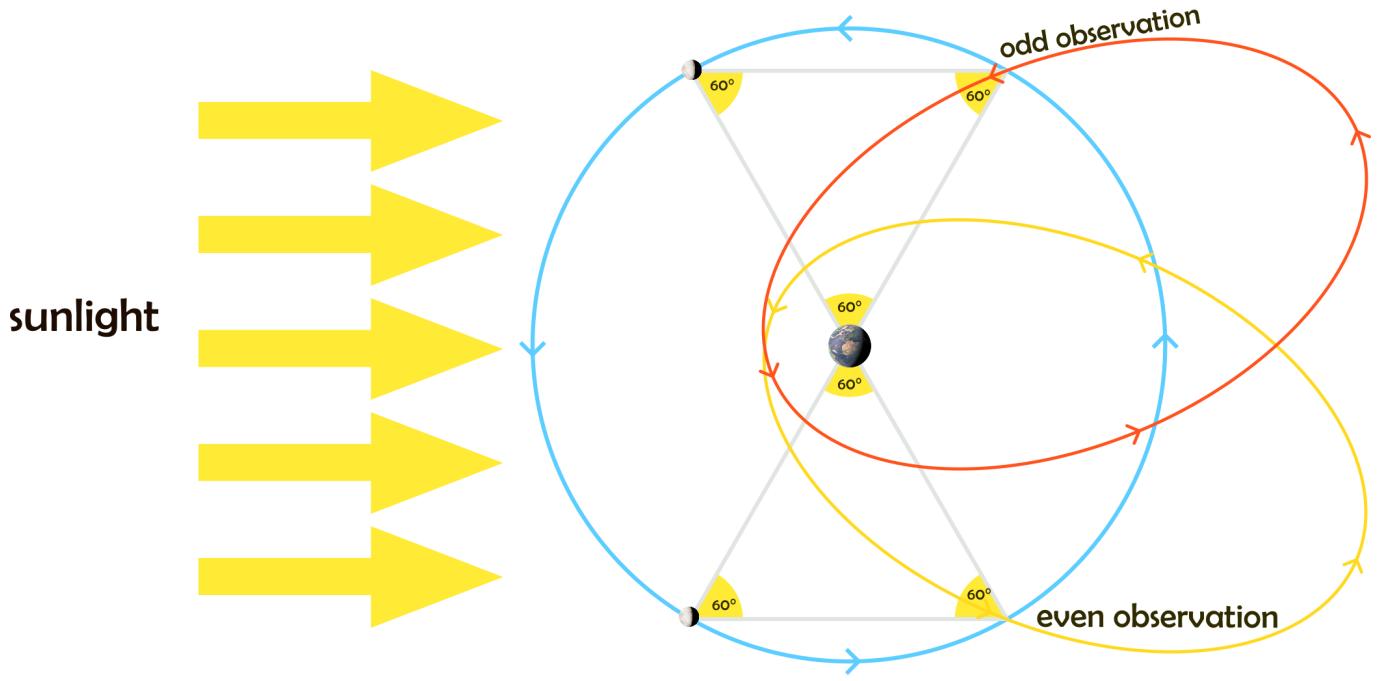


Figure 1: orbite keplerienne qui permettent de faire des observations aux points d'intérêt mentionné plus tôt

J'ai également amélioré le modèle en prenant en compte de plus en plus de facteur comme l'excentricité et l'inclinaison de l'orbite de la Lune, la gravité de la Lune qui influence la dynamique du satellite ainsi que les variations de l'orbite de la Lune et de la Terre causé par l'influence gravitationnelle du Soleil sur le système Terre Lune (voir figure 2).

Aux termes du projet, le code MATLAB que j'ai réalisé avait d'une longueur approximativement 600 lignes et effectuait plusieurs opérations qui sont listées ci dessous:

- simuler la dynamique du système à trois corps Soleil Lune Terre (l'influence de du système Terre-Lune sur le soleil est négligé);
- obtenir des approximation des emplacements des observations optimales dans le but de trouver de bonnes conditions initiales à l'aide d'un modèle simplifié;
- optimiser les observations optimales pour chaque minimum trouvé à l'étape précédente
- obtenir des images graphiques et des fichiers csv contenant les données.

Le code à besoin en entrée de multiples informations sur la dynamique du problème dont la plupart des facteurs sont fournis directement dans le code. La partie venant de l'extérieur du code sont les positions et vitesses initiales du soleil de la Lune et de La Terre ainsi que quelques informations sur le nombre d'observations qu'il faut récupérer.

Ce code pourrait être facilement adapté en une librairie qui pourrait être ensuite incorporer dans des outils plus avancer par d'autres utilisateur.

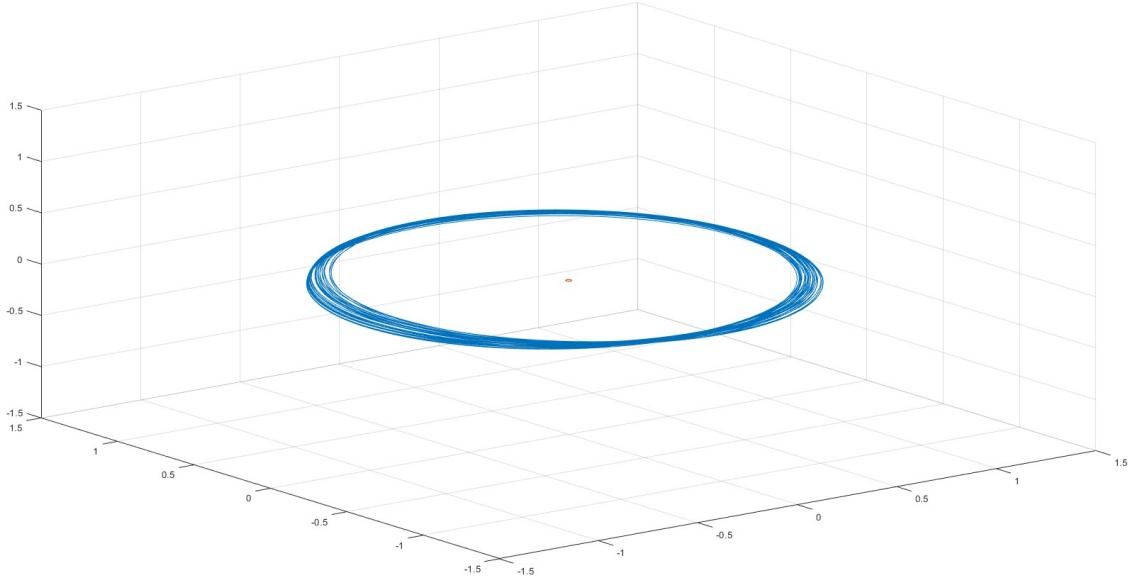


Figure 2: variation de l'orbite lunaire sur 2 ans

Ce travail permis de confirmer l'intérêt des deux points de l'orbite lunaire qui semblait être les plus intéressants avec des temps d'observation situé entre 15 et 25 heures. En sachant qu'il y a deux observations de ce type pour chaque période synodique lunaire (environ 29.53 jours), cela permettrait de faire des observations pendant environ 2.8% du temps (ou 1.4% du temps en n'en faisant qu'une sur deux) de la mission ce qui est bien mieux que ce que l'on peut faire sur Terre (une observation de 10 minutes tout les 18 mois en moyenne soit environ 0.0015% du temps).

Le fait que les temps d'observation soit bien plus long aux points spécifiques où le satellite est lancé depuis la zone d'observation à la même vitesse que cette dernière m'a poussé à faire un test dans lequel le satellite étant toujours lancé à la même vitesse que la zone d'observation sans se soucier de sa période. Ce test a bien confirmé que les 2 observations trouvées précédemment sont bien les plus efficaces mais a permis de mettre en évidence un 3^{eme} point de l'orbite lunaire aux alentours de 0° (ie quand le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés dans cet ordre). Cependant, cette troisième trajectoire n'est pas idéale car, en plus de ne pas avoir une période similaire à celle de la lune, l'observation a lieu à proximité de la zone d'ombre de la Terre ce qui rendrait toutes les observations impossibles si la zone d'observation traversait celle de la Terre. De plus, l'excentricité de l'orbite associée à cette trajectoire est aux alentours de 1 ce qui implique que le satellite pourrait facilement quitter le système Terre-Lune ce qui pourrait être un problème en plus d'impliquer une énergie de mise en orbite initiale plus importante, c'est pourquoi cette observation n'a pas été étudiée plus que ça.

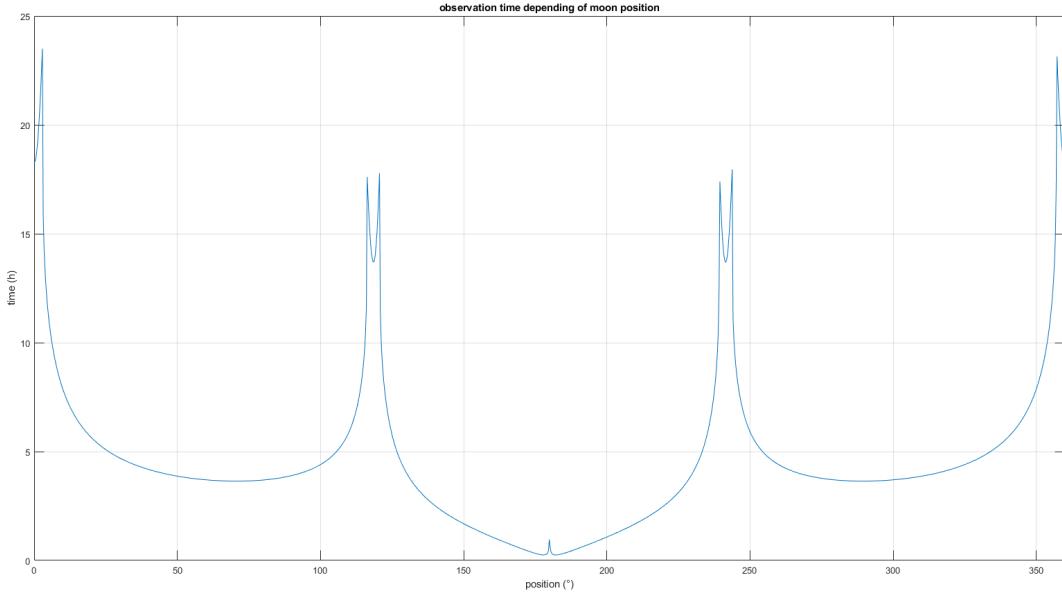


Figure 3: temps d’observation en fonction de l’anomalie vraie de la Lune

3.3 contrôle optimal

l’étape suivante consistait à calculer la trajectoire du satellite pour joindre les différentes observations. pour cela j’ai utilisé une librairie en Julia permettant de résoudre des problème de contrôle optimal, l’idée était de calculer tout les transferts possibles entre différentes observations.

j’ai implémenté deux versions du problème, l’une d’entre elle cherche à minimiser l’énergie cinétique lors d’un transfert, tandis que l’autre cherche à minimiser l’accélération maximale lors du transfert

Après avoir implémenté une version simplifiée du problème des voiles solaires (poussée faible dans n’importe quelle direction), il se trouve que les accélérations demandée semblait trop élevée pour utiliser une voile solaire, l’option d’utiliser un satellite à poussée faible a donc été sélectionné.

concernant les transferts, j’ai effectué une analyse des résultats qui m’ont permis de sélectionner 2 scénarios possible de mission dans lesquels un satellite effectue une observation sur 2 en utilisant une poussée faible.

suite à ces premier calcul j’ai mis à jour le programme pour prendre en compte l’équation de la masse, j’ai utilisé comme moteur le RIT-10 evo.

ce nouveau code à ensuite été rafiné pour effectué les opérations suivantes :

- simuler la dynamique du système à trois corps Soleil Lune Terre (l’influence de du système Terre-Lune sur le soleil est négligé);
- définir et résoudre un modèle de contrôle optimal de transfert avec bord fixé en minimisant l’énergie dépensée.
- répéter l’opération pour plusieurs scénario

3.4 analyse de résultat

à plusieurs moments durant ce stage j'ai du commenter des résultats de calculs, j'ai du rechercher les raisons et les causes qui ont mené à certain résultat inattendus ainsi que de déduire des potentiels calculs supplémentaire ou les prochaines étapes du projet. Pour commencer j'ai utilisé les résultats du solver qui trouvait les plus long temps d'observations pour isoler des les points les plus intéressants (observation ascendante et observation descendante) pour faire des observations. Suite à ces analyse j'en ai conclu que ce qui semblait le plus intéressant était d'optimiser les observations indépendamment les unes des autres puis de chercher par la suite des trajectoire de transfert qui permettrait de passer d'une orbite à l'autre.

J'ai également du faire de choix en fonctions de ces résultat. J'ai par exemple remarqué qu'en prenant une période de révolution plus courte pour le satellite (de l'ordre de 0.92 période lunaire au lieu de 1) les temps d'observation obtenue était plus court. Je pense que la cause de ces résultat vient du fait que la contrainte de vitesse lié à la période fixée du satellite est de trop, cependant donner au satellite la liberté d'avoir n'importe quelle vitesse en partant des optimums trouvé avec le modèle simplifié donne de très mauvais résultat. J'ai donc décidé d'optimiser d'abord avec la norme de vitesse fixé par la période du satellite (fixé à 0.92) puis de résoudre à nouveau avec un modèle modifié laissant la vitesse libre en prenant comme condition initiale le résultat de l'algorithme précédent. Il est probable qu'il faille remplacer le modèle simplifié par un autre plus performant. Un qui prendrait en compte le temps d'observation en fixant la vitesse de l'objet à la vitesse de la zone d'observation comme dans la figure 2 par exemple. Mais la forme assez complexe des optimums (deux pics très rapproché) et le fait que les observations des résultats ont rarement montré des trajectoire à vitesse nulle au centre de la zone (les vitesses sont souvent nulles près des bord de la zone) ont fait que je n'ai pas eu le temps d'implémenter un autre modèle.

Ensuite j'ai du analysé les résultats de mon second code fait en Julia pour essayé de comprendre pourquoi les accélérations maximale des transferts ne diminuait pas même en faisant des transferts sur plus longtemps. Il s'avère que, si l'on considère un modèle simplifié d'une Lune et d'une Terre avec une orbite circulaire sur le même plan, les orbites d'observations sont sensiblement les mêmes avec pour unique différence une rotation autour du vecteur normal au plan écliptique. Cette rotation est proportionnelle aux temps entre deux observation. Cela signifie que plus deux observations sont éloigné plus il faudra faire tourner l'orbite d'observation sur un grand angle ce qui explique que la les accélérations maximales ne diminuaient pas. Effectuer un transfert sur une observation deux fois plus lointaine dans le temps nécessite de faire tourner l'orbite d'observation deux fois plus loin également. C'est cette conclusion suggérant qu'il y a un seuil d'accélérations minimal que doit atteindre le satellite pour effectuer un nombre important d'observations par an qui à mené à l'abandon des voiles solaires au profit d'un moteur à poussée faible.

4 Conclusion

4.1 compétence acquise

Pour conclure ce stage m'a permis d'obtenir de nombreuses compétences. J'ai eu l'occasion de maîtriser les bases du contrôle optimal. Ce stage m'a également permis de mettre en application ces connaissances en utilisant une librairie permettant de résoudre des problèmes de ce type.

J'ai également renforcé mes compétences en programmation en apprenant un nouveau langage de programmation : le Julia qui est un langage utilisé en recherche pour le calcul scientifique et la résolution numérique de problème. J'ai également grandement amélioré mes connaissances dans le langage de programmation Matlab qui est lui aussi un langage utilisé pour la résolution numérique de problèmes.

le fait de programmer en deux langages différent m'a forcé faire transiter les résultats d'un programme à l'autre en utilisant des fichiers csv ce qui m'a permis de faire des applications plus propres et à renforcé mes capacité à créer des codes pouvant être inclus et utilisés dans d'autres applications que celles pour lesquelles ils avaient été initialement programmés.

J'ai eu également l'occasion d'écrire un compte-rendu de projet (qui n'est pas ce rapport de stage) intégralement en Anglais ce qui, en plus de renforcé mes compétences en Anglais, m'a permis de devenir plus doué dans la rédaction de rapports scientifiques en vue de publication.

4.2 travail réalisé

Durant ce stage j'ai produit de nombreux résultat qui pourront être réutilisé par d'autres personnes à l'avenir. on compte permis ces résultats :

premièrement j'ai produits deux programme, un programme réalisé avec le langage MATLAB qui calcule toutes les observations faisable sur un intervalle de temps, ce programme prends en entrée plusieurs fichiers CSV contenant des paramètre sur le code à exécuter ainsi que les positions initiales de la Terre la Lune et le Soleil. Ce code produits comme résultat plusieurs ficheirs CSV correspondant aux temps de départ, et de fin d'observation ainsi que les positions et vitesses qu'aurait un objet effectuant ces observations à l'entrée et la sortie de la zone d'observation.

J'ai également produit un code en Julia qui prends en entrée les résultats du code précédent (dans le même format de fichier) et calcule des trajéctoire avec contrôle qui permettent de relier des observations de sorties et des observations. ce programme donne en sortie de nombreuses données de résultats sous le format CSV.

Ces deux programmes donnent aussi chacun des graphiques et des images qui permettent d'avoir un support visuel des résultats.

4.3 possibilités pour aller plus loin

Si mon stage avait duré plus longtemps, j'aurais pu continuer à explorer les possibilité pour des missions d'observations de la Lune en essayant d'améliorer mes codes, j'aurais pu aussi étudier des possibilité que j'ai laisser de côté comme la troisième observations qui pourrait peut être fournir des scénario viable avec une voile solaire. J'ai aussi manqué de temps pour vérifier certaines des observations que j'ai durant ce stage, si j'avais eu plus de temps, j'aurais pu faire de nombreux

tests, comparatifs et vérification qui permettront certainement de mieux comprendre les variables importantes du problème, notamment essayer d'expliquer ce qui cause l'existence de ces pics de temps élevé (observation ascendante et observation descendante) ce qui pourrait permettre de créer un modèle simplifié plus efficace que celui utilisé actuellement.

5 Glossaire

Glossary

contrôle dans un problème de contrôle optimal le contrôle est une fonction qui dépend de l'état et du temps qui influence la dynamique d'un système, dans le cadre de ce stage, le contrôle est une fonction qui indique un vecteur 3D en fonction du temps. 4

coronographe un télescope équipé d'un disque opaque cachant la partie la plus lumineuse de l'objet observé permettant d'observer les détails les moins lumineux, utilisé majoritairement pour observer la couronne solaire d'où son nom. 3

couronne solaire l'atmosphère du soleil. 3

observation correspond à une trajectoire passive (sans contrôle) durant laquelle l'objet se situe dans la zone d'observation, une observation commence lorsque l'objet entre dans la zone et s'arrête quand il en sort. 4, 5

observation ascendante observation type assez longue ayant lieu entre le premier croissant et le premier quartier de la Lune, durant l'observation l'objet s'éloigne de la Terre.. 5, 8, 9

observation descendante observation type assez longue ayant lieu entre le dernier quartier et le dernier croissant de la Lune, durant l'observation l'objet se rapproche de la Terre.. 5, 8, 9

voile solaire une méthode de propulsion expérimentale utilisant la pression solaire pour avancer, génère des forces extrêmement faibles mais ne coûte pas de carburant. 3

zone d'observation région dans laquelle le soleil est intégralement caché par l'objet occultant mais où l'intégralité de la couronne est visible, ici l'astre occultant sera toujours la Lune. 4, 5