



PROJET TUTEURÉ DE LICENCE DE PHYSIQUE

UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS

ANNÉE 2015/2016

---

# VARIATIONS DE LA DISTANCE TERRE-LUNE DUES AUX SURCHARGES

---

*Auteurs :*

LANGY Hauarii  
HUARD Thomas  
GRISEY Nicolas

*Encadrants :*

MEMIN Anthony  
FIENGA Agnès

Projet réalisé au *Laboratoire Géoazur*





# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Présentation du contexte . . . . .	1
1.2	Problématique . . . . .	2
1.3	Plan du rapport . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Estimation de la distance Terre-Lune</b>	<b>3</b>
2.1	Calern . . . . .	3
2.2	Télémétrie Laser . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Mouvement de la station de Calern induit par les surcharges</b>	<b>4</b>
3.1	Définitions . . . . .	4
3.2	Facteurs agissants sur la distance Terre-Lune . . . . .	5
3.3	Mesures des déplacements horizontaux et verticaux . . . . .	5
3.4	Analyse . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Variation de la distance Terre-Lune induite par les surcharges</b>	<b>8</b>
4.1	Calculs de la distance Terre-Lune . . . . .	8
4.2	Analyse . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>14</b>



# Chapitre 1

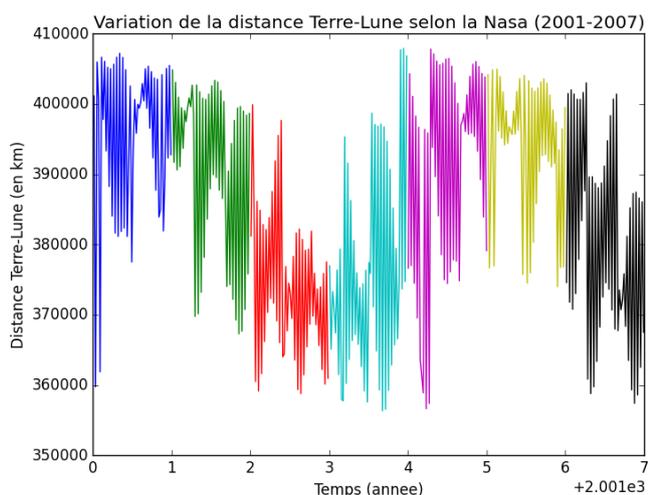
## Introduction

### 1.1 Présentation du contexte

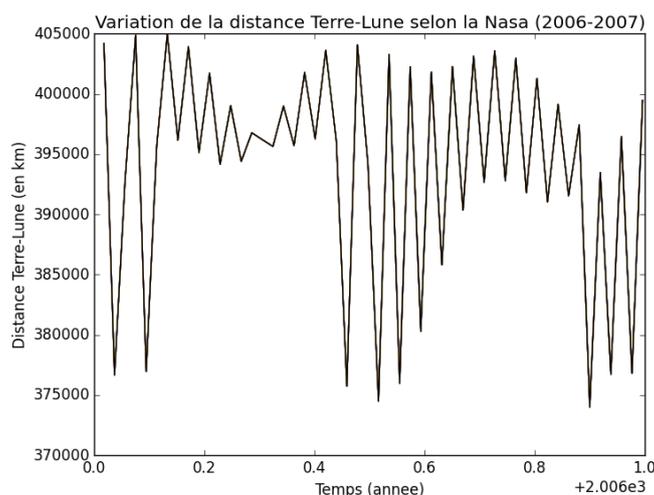
La Lune, satellite de la Terre, exerce sur notre planète une force gravitationnelle qui se manifeste notamment par le phénomène des marées. En effet, l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil provoquent sur Terre le phénomène de marée océanique, c'est-à-dire une variation continue du niveau réel de la mer et les marées terrestres qui ont pour conséquences une déformation élastique de la Terre. Ainsi la distance Terre-Lune varie au cours du temps, notamment à cause des interactions gravitationnelles produites par la Lune et les autres planètes mais aussi à cause de la structure interne de la Lune et de la Terre. Depuis sa formation, la Lune ne cesse de s'éloigner de notre planète à une vitesse estimée à 3,78 centimètres par an. Connaître précisément la distance Terre-Lune permet d'améliorer notre compréhension du système Terre-Lune. Il existe deux stations de Télémétrie-Laser qui mesure la distance Terre-Lune :

- l'observatoire d'ApachePoint au Nouveau Mexique.
- la station de Télémétrie Laser, situé à Calern au niveau du plateau de Caussols dans la région PACA. Elle effectue plus de 50% des observations de la distance Terre-Lune.

De nos jours, la distance Terre-Lune est estimée à une précision de quelques centimètres. Les éphémérides fournies par la Nasa nous permettent d'illustrer la variation de cette distance. (ouvrage contenant les positions de la Lune à intervalles réguliers, environ 1 point/semaine).



(a) Variation de la distance Terre-Lune sur 7 ans



(b) Variations sur un an

FIGURE 1.1 – Graphes représentant la variation de la distance Terre-Lune selon la Nasa.

## 1.2 Problématique

- Amélioration de la distance Terre-Lune : prendre en compte tous les effets qui l'influencent, notamment les mouvements de la station laser, qui est l'unique moyen actuel pour estimer cette distance, et qui ne sont pas encore intégrés à l'analyse des données (observations)
- Parmi ces effets, le phénomène de charge peut avoir un impact non-négligeable. Ce phénomène est dû aux redistributions de masses qui agissent sur la Terre, la Terre n'étant pas rigide, cela provoque une déformation de la croûte terrestre.

Il est donc légitime de se demander, quel est l'impact des effets de charges dans l'estimation de la distance Terre-Lune ?

## 1.3 Plan du rapport

Notre étude est essentiellement basée sur des données numériques des modèles de mesures de déplacement de la station (atmosphériques, hydrologiques, océaniques). Afin de répondre à notre problématique, nous estimerons le déplacement de la station à partir des données des modèles. Dans un premier temps, nous traitons numériquement les données des modèles atmosphériques, océaniques et hydrologiques de 2001 à 2007 inclus et quantifierons le déplacement de la station dans un repère {Est, Nord, Vertical} moyenné sur un an.

Puis à l'aide d'un deuxième programme, nous récupérerons ces données afin de calculer la nouvelle distance Terre-Lune après un déplacement de la station dans le repère cartésien. Autrement dit, on calcule la distance Terre-Lune en prenant en compte les effets de charges.

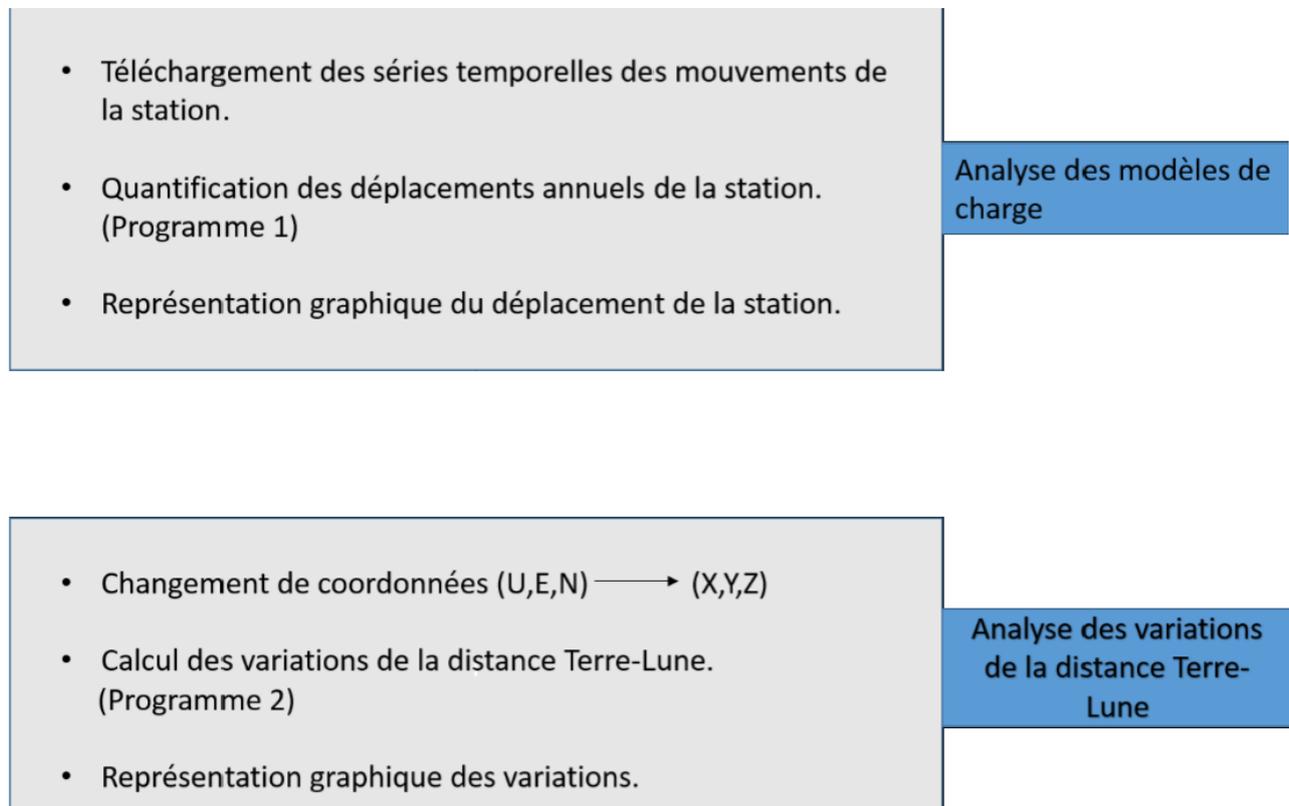


FIGURE 1.2 – Démarche du rapport

## Chapitre 2

# Estimation de la distance Terre-Lune

### 2.1 Calern

En 1988, avec la fusion du "Centre d'Étude et de Recherches en Géodynamique et Astronomie" (CERGA) et l'Observatoire de Nice, l'Observatoire de la Côte d'Azur voit le jour sur le plateau de Calern. Les qualités essentielles de ce plateau calcaire semi-désertique de 20 km<sup>2</sup> de l'arrière pays grassois favorisent l'observation de par ses nuits claires, une atmosphère pas trop sèche, l'absence de brumes et de poussières, et une circulation des vents en couches horizontales due à la fois à la topographie des lieux et à la présence du vent marin qui stabilise l'atmosphère. Il est connu pour être un des précurseurs dans l'utilisation d'instruments nouveaux dans leur discipline tels que la télémétrie laser ou encore l'interférométrie. Aujourd'hui, la vie scientifique du plateau se poursuit avec des projets qui exploitent l'expérience acquise, et les liens particuliers entre astronomie et géophysique.

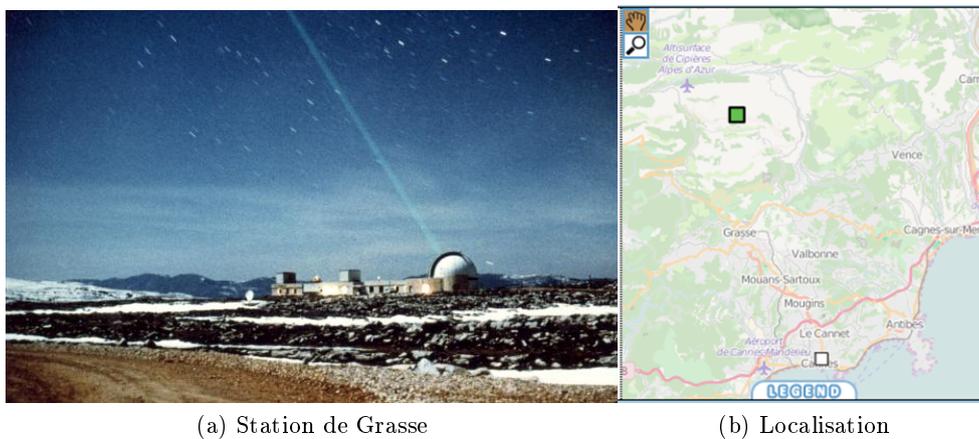


FIGURE 2.1 – Images représentant la station de Calern et sa localisation.

### 2.2 Télémétrie Laser

On envoie une succession de pulsation laser de la Terre (de Grasse) sur plusieurs réflecteurs de la Lune qui se réfléchissent, on détecte la quantité de photons qui reviennent sur Terre par un photomultiplicateur. C'est la technique de positionnement géodésique SLR (Satellite Laser Ranging). Le temps de parcours est mesuré pour un trajet aller-retour de la lumière laser grâce à des horloges. On ne prendra pas en compte le retard induit par la traversée de l'atmosphère. On supposera que la vitesse de propagation de la lumière dans le vide est approximativement égale à celle dans l'atmosphère. On peut alors estimer la distance Terre-Lune. Cependant, cette distance n'est pas la même au cours de l'année. Elle varie à cause de la déformation de la Terre en partie causée par les effets de charges.

## Chapitre 3

# Mouvement de la station de Calern induit par les surcharges

### 3.1 Définitions

- **Charge océanique** : c'est la déformation de la surface de Terre due aux redistributions des masses dans les océans. En effet, les effets de marée, la fonte des glaces et la modification de la circulation des courants océaniques provoquent des variations de pression au fond des océans. La force qui en résulte au niveau des planchers océaniques provoque des déformations qui se répercutent jusqu'à l'intérieur des continents.
- **Charge atmosphérique** : c'est la déformation de la surface de la Terre due aux redistributions des masses dans l'atmosphère qui se traduisent par une variation de pression.
- **Charge hydrologique** : c'est la déformation de la Terre induite par le cycle hydrologique : circulation de l'eau sur les surfaces continentales, infiltration...

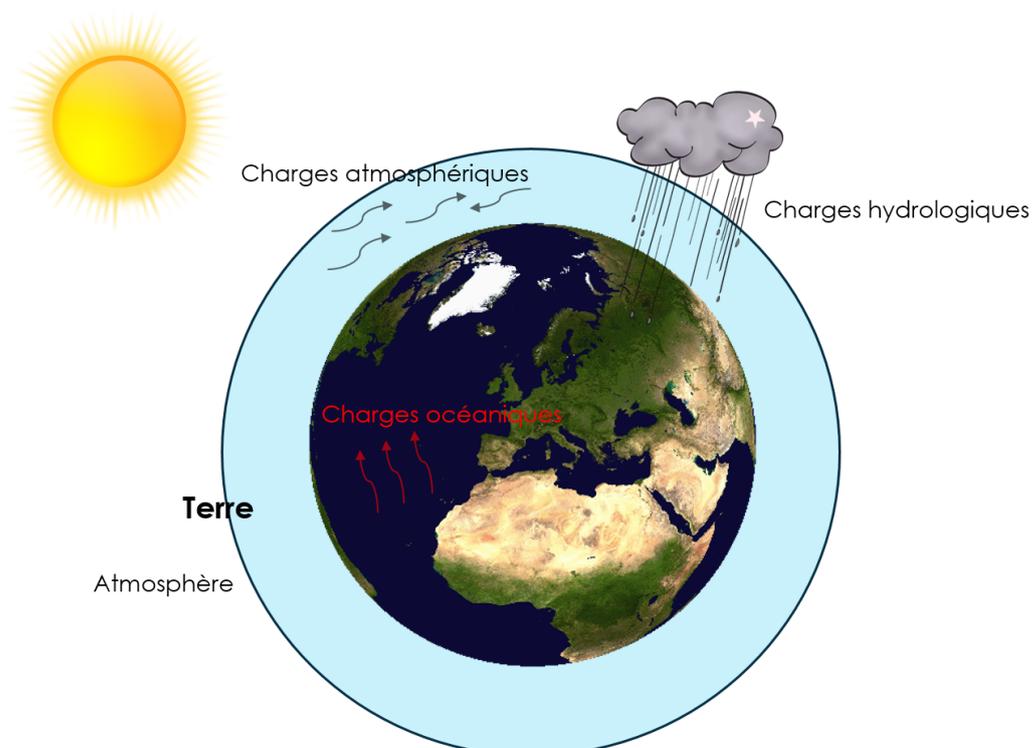


FIGURE 3.1 – Dessin représentant les charges sur Terre

## 3.2 Facteurs agissants sur la distance Terre-Lune

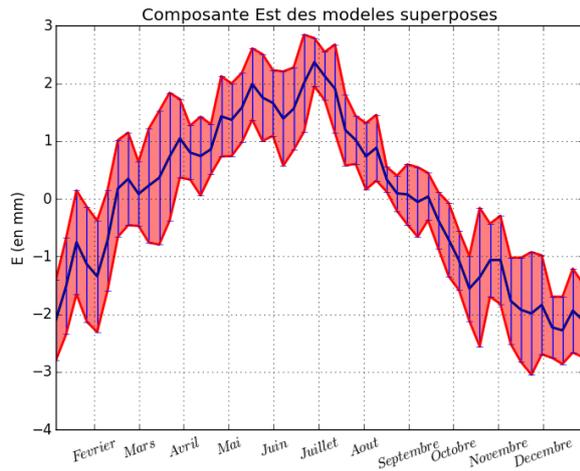
Ce sont les facteurs qui jouent un rôle sur le déplacement de la station de Calern.

- **Tectonique des plaques** : Pour notre étude, on suppose que la station est sur la même plaque.
- **Marée solide** : générée par le soleil et la lune, agit sur la dynamique et provoquent des mouvements sur la croûte terrestre.
- **Les charges** .

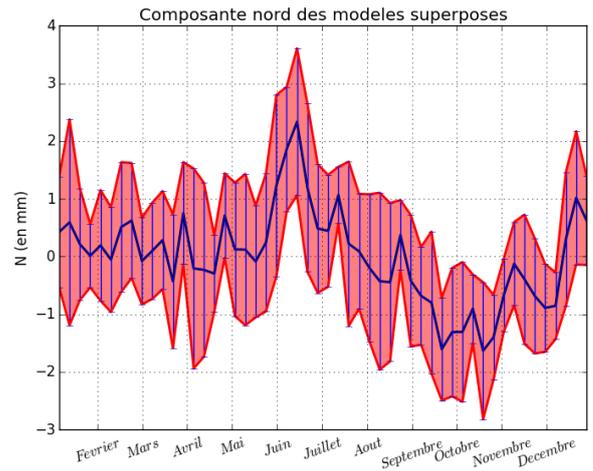
## 3.3 Mesures des déplacements horizontaux et verticaux

Nous récupérons les données de 3 charges respectivement hydrologiques, atmosphériques et océaniques sur <http://loading.u-strasbg.fr/displ;trf.php>

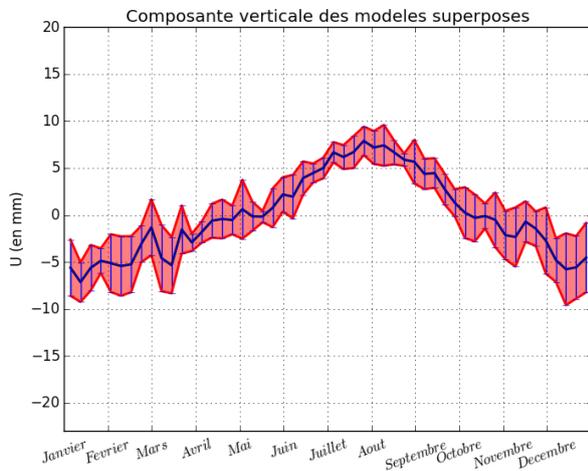
Nous traitons ces données dans un logiciel de programmation Python afin d'obtenir les variations horizontales, c'est-à-dire les composantes Est et Nord ainsi que les variations verticales suivant la composante Verticale au cours du temps. Pour cela, nous effectuons la moyenne de toutes ces mesures pour les 7 années sur un an afin d'amplifier le signal saisonnier et de réduire le signal de plus haute fréquence. Ainsi, nous obtenons les mouvements de la station de Calern induits par les 3 charges. Nous insérons une courbe de tendance pour obtenir une meilleure estimation du signal saisonnier et nous estimons par moindre carré son amplitude. Dans les figures (a),(b),(c),(d), les barres d'erreurs en rouge correspondent aux écarts-types des données, c'est-à-dire la variabilité du signal sur 7 ans. Voyons les variations horizontales (Est et Nord) et verticale (U) de la station causées par ces effets de charge :



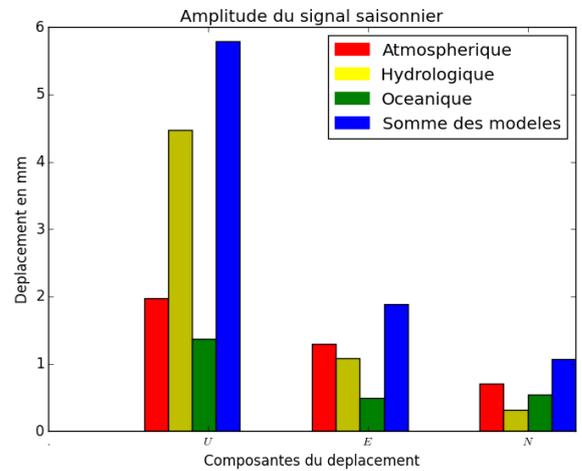
(a) Variation suivant E



(b) Variation suivant N



(c) Variation suivant V



(d) Histogramme des modèles superposes

FIGURE 3.2 – Différents graphes représentant le déplacement de la station selon les modèles

### 3.4 Analyse

Dans la figure (a), le déplacement horizontal suivant la direction Est augmente entre Janvier et Juillet avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cela varie entre -2.2mm et 2.2mm, soit 4.4mm.

On peut voir dans la figure (b) que le déplacement horizontal suivant la direction Nord subit des petites variations entre Janvier et Mai. En Juin, on observe un pic important avec une forte augmentation du déplacement, ensuite celui-ci a tendance à diminuer jusqu'à Mi-October avant d'augmenter de nouveau. Le déplacement varie entre environ -1.6mm et 2.2mm soit de 3.8mm.

Dans la figure (c), de Janvier à Avril, le déplacement vertical (U) subit des petites variations. Ensuite à partir de Avril, le déplacement augmente jusqu'à atteindre un pic en Août. On peut observer un écart d'environ 12 mm entre mi-Mars et Août. D'Août à Décembre, le déplacement diminue jusqu'à atteindre une valeur proche de celle de Mars. Ainsi le déplacement vertical (U) varie entre environ -7mm et 7mm soit de 14mm. Cela n'est pas à négliger et cela impacte sur les variations de la distance Terre-Lune.

La figure (d) représente l'amplitude du signal saisonnier des trois composantes E, N et U. On remarque que le facteur hydrologique joue un rôle plus important pour la composante verticale (U) et que le facteur atmosphérique joue un rôle plus important pour la composante horizontale (E et N). Le facteur océanique ici, n'impactera que très peu sur le déplacement. Pour le déplacement horizontal

(Est, Nord), les variations ne sont pas à négliger. Cependant, ils impactent beaucoup moins par rapport aux variations du déplacement vertical ( $U$ ) (à peine 25%), donc l'amplitude de la composante verticale correspond à l'amplitude du déplacement de la station Télémétrie Laser (à 75% près). Ces variations horizontales ont donc un rôle mineur devant les variations verticales dans l'estimation de la distance Terre-Lune.

## Chapitre 4

# Variation de la distance Terre-Lune induite par les surcharges

### 4.1 Calculs de la distance Terre-Lune

Nous allons voir théoriquement comment calculer de manière géométrique la distance Terre-Lune sachant que la Terre se déforme, donc en prenant en compte un déplacement de la station sur Terre.

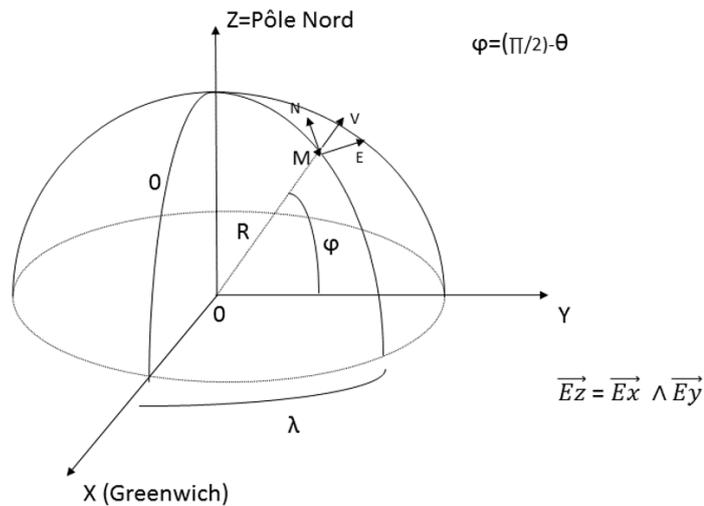


FIGURE 4.1 – Repères {Est, Nord, Verticale} dans le repère cartésien {x, y, z}

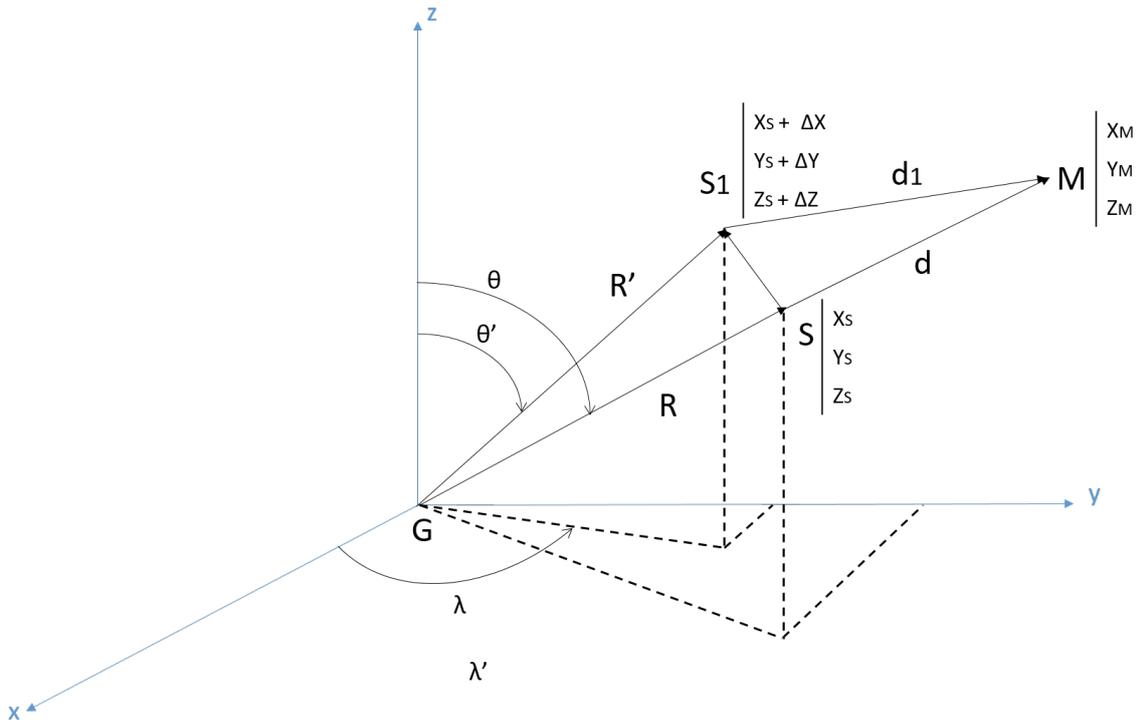


FIGURE 4.2 – Schéma représentant la distance Terre-Lune avec un déplacement sur Terre

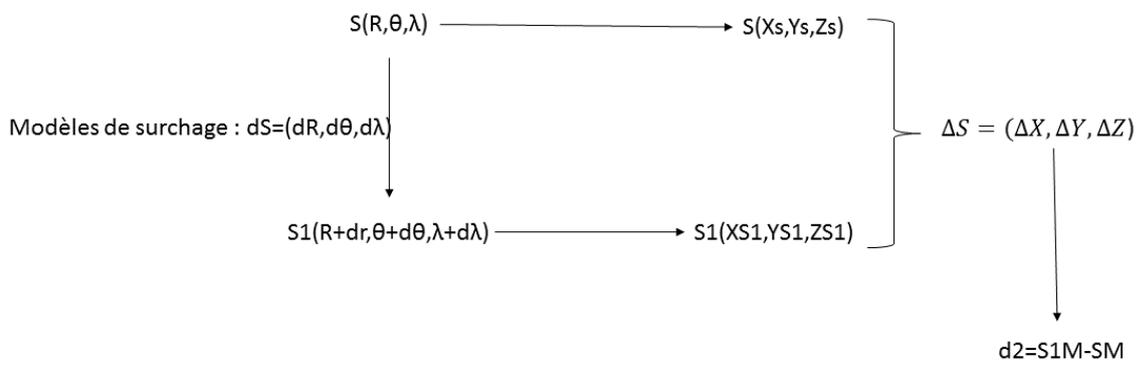


FIGURE 4.3 – Processus pour trouver  $d_2$

**G** : Centre de la Terre  
**R** : Rayon de la Terre  
**R'** : Rayon de la Terre + déplacement **ds**  
**S** : Un point à la surface de la Terre  
**M** : Position de la Lune (**hypothèse** : on assimile la Lune à un objet ponctuel)  
**d** : Distance moyenne Terre-Lune partant d'un point à la surface de la Terre  
**S1** : Nouvelle position du point après un déplacement **ds**  
**d1** : Nouvelle distance Terre-Lune  
**SS1** : Déplacement **ds**  
**d2** : Variation relative de la distance Terre-Lune  
**co-latitude de S** :  $\theta$  : Angle que fait S dans le plan (zGy)  
**longitude de S** :  $\lambda$  : Angle que fait la projection de S dans le plan (xGy)  
**co-latitude de S'**  $\theta'$  :  $\theta + d\theta$   
**longitude de S'**  $\lambda'$  :  $\lambda + d\lambda$

A partir des coordonnées de co-latitude  $\theta$  et de longitude  $\lambda$  de la station de Grasse, on définit d'abord les coordonnées de S, notre point sur la Terre :

$$\begin{cases} x_s = R \sin(\theta) \cos(\lambda) \\ y_s = R \sin(\theta) \sin(\lambda) \\ z_s = R \cos(\theta) \end{cases}$$

Puis les coordonnées de M :

$$\begin{cases} x_m = (R + d) \sin(\theta) \cos(\lambda) \\ y_m = (R + d) \sin(\theta) \sin(\lambda) \\ z_m = (R + d) \cos(\theta) \end{cases}$$

On peut calculer la norme de SM, la distance Terre-Lune  $d$  :

$$d = \sqrt{(x_s - x_m)^2 + (y_s - y_m)^2 + (z_s - z_m)^2}$$

Ensuite, pour avoir  $d1$ , nous avons besoin de trouver les coordonnées de S1 :

$$\begin{cases} x_{s1} = x_s + dx \\ y_{s1} = y_s + dy \\ z_{s1} = z_s + dz \end{cases}$$

On trouve les composantes de déplacement SS1 suivantes :

$$\begin{cases} dx = R(\sin(\theta + d\theta) \cos(\lambda + d\lambda) - \sin(\theta)\cos(\lambda)) + dr \sin(\theta + d\theta) \cos(\lambda + d\lambda) \\ dy = R(\sin(\theta + d\theta) \sin(\lambda + d\lambda) - \sin(\theta) \sin(\lambda)) + dr \sin(\theta + d\theta) \sin(\lambda + d\lambda) \\ dz = R(\cos(\theta) + d - \cos(\theta)) + dr \cos(\theta + d\theta) \end{cases}$$

Nous avons obtenu les variations de longitude  $d\theta$  et latitude  $d\lambda$  à partir de la variation  $ds$  avec ses composantes Est, Nord et Verticale :

$$\xrightarrow{ds} \begin{cases} se = R \sin(\theta) d\lambda \\ sn = R d\theta \\ sv = dr \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} d\lambda = se/R \sin(\theta) \\ d\theta = sn/R \\ dr = dv \end{cases}$$

On calcule alors la norme  $d1$  qui est la variation de la distance Terre-Lune :

$$d = \sqrt{(xs1 - xm)^2 + (ys1 - ym)^2 + (zs1 - zm)^2}$$

Pour finir, on calcule  $d2$  qui est la valeur relative de la distance Terre-Lune, donc le déplacement (horizontal et vertical sommés) de la station sur Terre :

$$d2 = d1 - d$$

Voyons à présent l'impact qu'a l'effet combiné de ces charges sur le déplacement de la station :

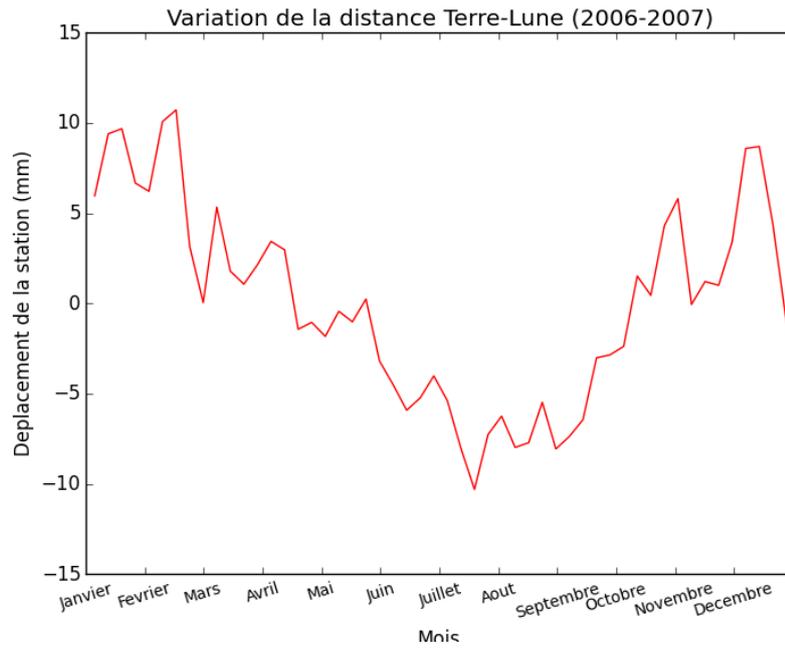


FIGURE 4.4 – Déplacement de la station par les modèles

## 4.2 Analyse

En Janvier, le déplacement de la station est environ 11mm. Ensuite, il diminue jusqu'à atteindre un minimum de -11 mm en Juillet et augmente encore jusqu'au mois de Janvier. On en déduit que la cause de ces déplacements est représenté majoritairement par le déplacement vertical  $U$ . En effet, de Novembre à Février, il pleut beaucoup et la station s'enfonce donc dans la croûte terrestre de 11mm. Cela augmente donc l'estimation de la distance Terre-Lune d'environ 1.1 cm. De Juin à Septembre, il fait chaud et il ne pleut plus, la Terre qui était déformée cherche à retrouver sa forme d'équilibre qui se traduit par un déplacement de 11mm aussi. Dans ce cas, l'estimation de la distance Terre-Lune est diminuée d'environ 1.1 cm

## Chapitre 5

# Conclusion

Nous avons vu que les variations de la distance Terre-Lune sont dues aux facteurs géophysiques qui engendrent des déplacements verticaux et horizontaux de la station de Télémétrie Laser de Calern. Pour étudier ces variations, nous avons créé des programmes informatiques en Python, permettant d'une part de quantifier les déplacements verticaux et horizontaux, d'autre part d'estimer avec plus de précision la variation de la distance Terre-Lune. Cependant, nous n'avons pris en compte qu'un seul facteur, le phénomène de surcharge et seulement trois effets de charges différentes. Cela nous a permis de voir que le déplacement vertical de la station de l'ordre de la dizaine de millimètres joue un rôle majeur dans les variations de la distance Terre-Lune et que la charge hydrologique est prédominante suivant la verticale. On peut ainsi conclure que le déplacement de la station impacte les variations de la distance Terre-Lune. Il est également possible de prédire la variation de la distance Terre-Lune à partir d'une autre technique de positionnement géodésique, le GPS. Il permet de déterminer les coordonnées géographiques de n'importe quel point situé à la surface du globe avec précision et s'utilise en association avec une carte pour se repérer et se positionner. Nous pourrions comparer des données GPS aux données prédites par la Nasa.

## Chapitre 6

# Bibliographie

### Liens internet

- [http://grgs.obs-mip.fr/recherche/themes/mesures\\_geodesiques](http://grgs.obs-mip.fr/recherche/themes/mesures_geodesiques)
- <https://www.oca.eu/spip.php?rubrique149>
- <http://www-g.oca.eu/cerga/lassat/lasersat.htm>

### Source de données pour les modèles

- [http://loading.u-strasbg.fr/displ\\_itrf.php](http://loading.u-strasbg.fr/displ_itrf.php)

### Manuscrits

- Thèse de Doctorat : *Elaboration de l'éphéméride INPOP : modèle dynamique et ajustement aux données de télémétrie Laser Lune*, Hervé MANCHE, 12 Janvier 2011

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier notre encadrant Mr. MEMIN Anthony de l'aide qu'il nous a apporté durant toutes les étapes de ce projet tuteuré, de son soutien et de sa disponibilité ainsi que Mme. FIENGA Agnès. Nous tenons également à remercier le Laboratoire Géoazur pour son accueil ainsi que l'Université de Nice Sophia Antipolis, le corps enseignant et plus précisément notre coordinatrice Mme Doya Valérie pour la proposition de sujets de projets intéressants qui nous ont permis d'acquérir une expérience minime dans le domaine de la recherche scientifique.