

Université Denis Diderot

Science de la Terre, de l'Environnement et des Planètes

Stage de Licence 3

Responsable : Giovanni Occhipinti

Mémoire de Stage de :

Ari JEANNIN

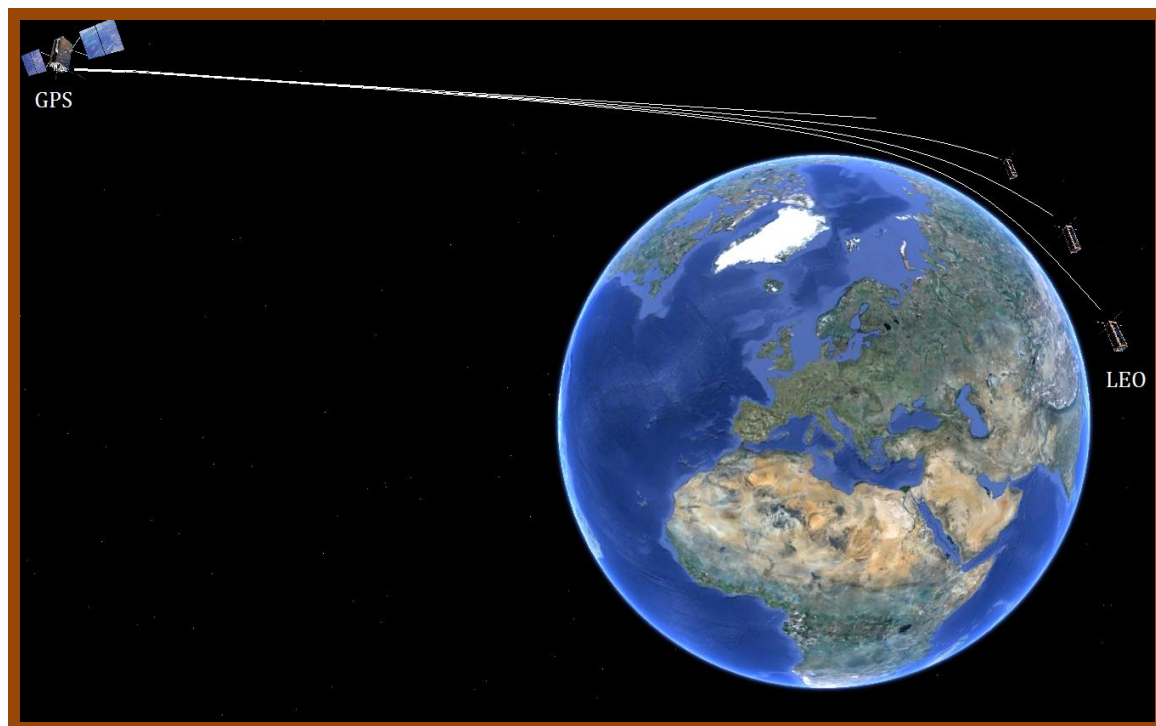
Sous la direction de :

Philippe LOGNONNE

Pierdavide COÏSSON

Titre du stage :

*Occultation troposphérique par la technique du
"Bending angle"*



~ Année Universitaire 2012-2013 ~

Table des matières

I/ Introduction.....	3
II/ La Radio-Occultation.....	4
II.1/ Comment ça marche.....	4
II.2/ A quoi ressemble le signal.....	5
II.3/ Conditions d'occultation.....	6
II.4/ Méthode.....	9
II.4.1/ Calcul de du Bending angle.....	9
II.4.2/ Réfractivité en lien avec Pression et Température.....	11
II.4.3/ Corrections.....	12
III/ Profil Cosmic, traité avec Matlab.....	13
IV/ L'occultation troposphérique et le projet Nanosat.....	14
V/ Conclusion.....	15

I- Introduction:

L'objectif de ce stage offrant une première approche dans le domaine de la recherche est, dans le cadre du projet nanosatellite étudiant proposé par Mr Lognonné avec le Labex UnivEarthS, de découvrir la physique permettant l'occultation troposphérique au moyen de la communication d'un **Global Navigation Satellite System** (GNSS, principalement de type GPS) à un **Satellite Low Earth Orbiter** (LEO).

Ce stage à pour but secondaire de faire avancer autant que possible la phase 0/A du projet nanosat, c'est à dire la phase où l'on étudie au mieux ce que nous cherchons à faire, puis la faisabilité de la mission.

Pour le moment ce projet a pour mission le calcul de la **Totalité des Electrons Contenus** (TEC) dans la ionosphère (entre 100 et 500Km d'altitude) et le calcul de l'intensité des rayons gamma au niveau des pôles ainsi que dans l'anomalie de l'atlantique sud. Donc le Nanosatellite devrait contenir un récepteur GPS bi-fréquence et un scintillateur afin d'effectuer les mesures.

Je me suis proposé à étudier les possibilités d'occultation troposphérique, car en profitant du calcul du TEC, il suffit de continuer l'occultation sur les couches atmosphérique les plus proches de la Terre pour en déduire par différentes méthodes, des pressions, températures et vapeur d'eau permettant une météorologie efficace.

La troposphère est la couche atmosphérique qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à plus d'une dizaine de kilomètres, nous ne pouvons lui attribuer une hauteur exacte car elle n'est pas égale sur l'ensemble du globe, et elle ne possède pas de limite franche. Elle contient environ 80% de la masse atmosphérique totale, et c'est dans cette troposphère qu'a lieux tout événement météorologique.

L'ensemble du travail à suivre s'applique sur la troposphère de même manière que sur la stratosphère qui est la couche atmosphérique la succédant.

II- La Radio-Occultation:

La radio-occultation se développe de plus en plus pour plusieurs raisons. En première vu la précision, car les données satellitaires ont une meilleure résolution que les stations au sol. De plus les radio-occultations ne dépendent pas du nombre de stations au sol, elles couvrent l'ensemble du globe. Elles ont lieux constamment quelque soit le climat, de jour comme de nuit et permettent un profil depuis la stratopause jusqu'à la surface. Pour le moment le nombre de satellite LEO permettant ceci est faible, mais l'idée de pouvoir couvrir l'ensemble du globe en temps quasi-réel existe, il faudrait atteindre le nombre de 200 LEO en orbite.

II.1- Comment ça marche:

La méthode de radio-occultation en général est une technique d'occultation basée sur l'envoi et la réception d'une onde électromagnétique au travers un milieu. Le milieu en question apporte certaines modifications a l'onde la traversant, ce qui permet l'étude de celui-ci.

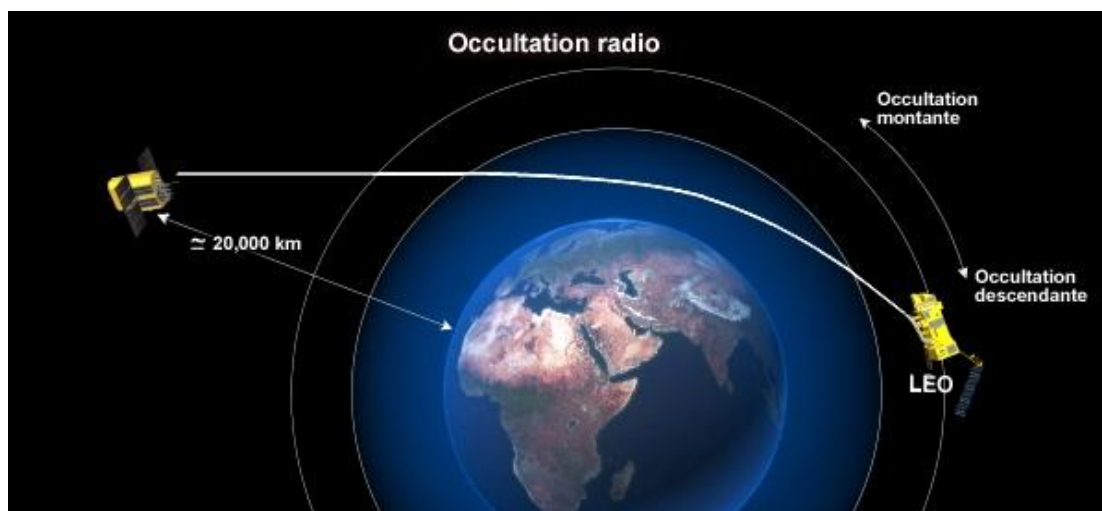


Figure 1: occultation radio.

Le GPS envoie constamment un signal électromagnétique orienté vers la Terre. Celui-ci sera reçu par le LEO qui pourra le décoder. Il existe 2 types d'occultations qui mènent au même résultat:

-Le "close-loop", type d'occultation la plus simple, le LEO reçoit le signal avant que celui-ci ne traverse de couche. Le LEO va continuer son orbite et ainsi effectuer l'occultation en gardant la lecture du signal en continue. Il s'agit sur le dessin de l'occultation descendante.

-L' "open-loop", vu sur le schéma comme occultation montante. La complication pour ce type d'occultation (approuvé en 2006 avec la mission ROSA¹) réside dans l'accroche du signal qui doit avoir lieu le plus tôt possible afin de pouvoir occulter correctement la troposphère. Pour ce faire, le LEO va reproduire le signal qu'il s'attend à recevoir pour engager la lecture du signal réel dès qu'il le verra apparaître, c'est à dire dès qu'il pourra superposer son signal modélisé avec le réel. Une fois le signal en lecture, les données seront les mêmes qu'en close-loop mais inversées.

II.2- A quoi ressemble le signal :

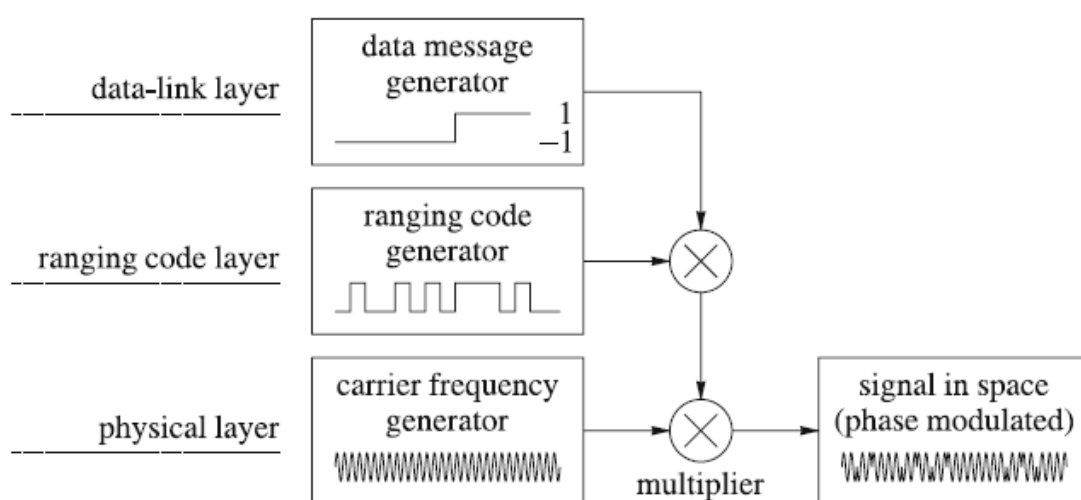


Figure 2: Composition du signal GNSS.

Chaque satellite possède un signal qui lui est propre, chacun transmet son signal à travers une fréquence porteuse.

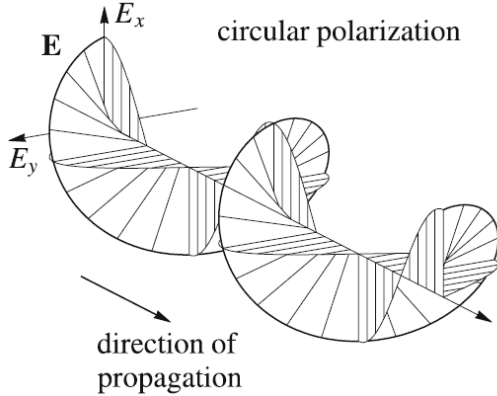
Comme on le voit sur la figure 2, le data message qui est modulé à 50 Hz s'insère dans deux code pseudo aléatoire:

- Code C/A pour Clear Acquisition, ou Coarse Acquisition (acquisition brute), il s'agit d'un code binaire défini par une fonction mathématique déterminée, de fréquence d'1ms, c'est à dire 1,023MHz.

- Code P pour Protected, ce code possède une fréquence de 10,23MHz. Il est bien plus précis et est donc protégé car réservé aux militaires. Il est possible de lire le P-code, mais en subissant l'Anti Spoofing (AS). l'AS est une dégradation volontaire du signal qui peut être enlevé par un algorithme connu uniquement des militaires. En somme, le code le plus précis sera pour nous (civil) le moins précis. L'incertitude du code P est de l'ordre de 0,3 microsecondes, ce qui correspond à une précision d'environ 100 mètres.

¹ Mission italienne inaugurant le procédé d'Open-loop.

Le code C/A sera ensuite associé avec la fréquence porteuse appelée L1, de fréquence 1,57542 GHz (longueur d'onde d'environ 19,05 cm) et le code P sera associé à la L1 et la L2 valant 1,22760 GHz (longueur d'onde d'environ 24,45 cm).



L'onde électromagnétique est polarisée circulaire afin d'éviter une rotation de Faraday dû au champ magnétique.

II.3- Conditions d'occultation:

La longueur du signal entre le GPS et le LEO lu par le LEO correspond à la distance géométrique entre ces deux à laquelle s'ajoutent plusieurs paramètres. La majorité de ces délais peuvent se corriger afin d'en arriver aux deux principaux délais qui sont les délais ionosphérique et troposphérique.

$$L_r^s = \rho_r^s + c \cdot \delta t_r + c \cdot \delta t_{r,sys} - c \cdot \delta t^s - c \cdot \delta t_{s,sys} + \delta \rho_{trp} + \delta \rho_{ion} + \delta \rho_{rel} + \delta \rho_{mul} + \lambda \cdot N_r^s + \dots + \epsilon$$

ρ_r^s	Geometrical distance between satellite and receiver
c	Speed of light in vacuum
δt_r	Station clock correction: <i>receiver clocks</i> (time and frequency transfer)
$\delta t_{r,sys}$	Delays in receiver and its antenna (cables, electronics, ...)
δt^s	Satellite clock correction: <i>satellite clocks</i>
$\delta t_{s,sys}$	Delays in satellite and its antenna (cables, electronics, ...)
$\delta \rho_{trp}$	Tropospheric delay: <i>troposphere parameters</i> (meteorology, climatology)
$\delta \rho_{ion}$	Ionospheric delay: <i>ionosphere parameters</i> (atmosphere physics)
$\delta \rho_{rel}$	Relativistic corrections (Special and General Relativity)
$\delta \rho_{mul}$	Multipath, scattering, bending effects
λ	Wavelength of the GPS signal (L_1 or L_2)
N_r^s	Phase ambiguity: <i>ambiguity parameters</i> (ambiguity resolution)
ϵ	Measurement error

Pour occulter la troposphère se situant sous l'ionosphère il faut connaître les retards ionosphériques. De part ce lien, j'ai traité le sujet avec *Victor Husson* qui s'occupait de la partie me complétant.

Pour une occultation troposphérique, il faut corriger autant que possible les modifications du signal provoqué par l'ionosphère:

- Le retard de groupe dû à l'ionosphère : la modulation du signal radio est retardée par les électrons libres.

- L'avancement de phase : au retard de groupe correspond un avancement de phase de même amplitude.

- La distorsion de la forme d'onde transmise : la nature dispersive de l'ionosphère modifie les signaux de façon proportionnelle à $1/f^2$ et la présence d'irrégularités.

à travers lesquelles le signal peut être diffusé contribuent à le dégrader

- Les scintillations d'amplitude et phase du signal: glissements de phase dû aux irrégularités ionosphériques.

Le but de ces corrections étant de pouvoir traiter le signal reçu en considérant uniquement les perturbations qui ont lieu dans la troposphère:

- Le retard de groupe troposphérique : retard de réception du signal comparé au déplacement du signal dans le vide, aussi nommé délais de phase.

- L'effet Doppler: Le mouvement de l'émetteur comme du récepteur induit un élargissement ou un rétrécissement de la longueur d'onde.

- La réfraction angulaire du chemin suivi par le signal: effet que nous appellerons par la suite "bending angle".

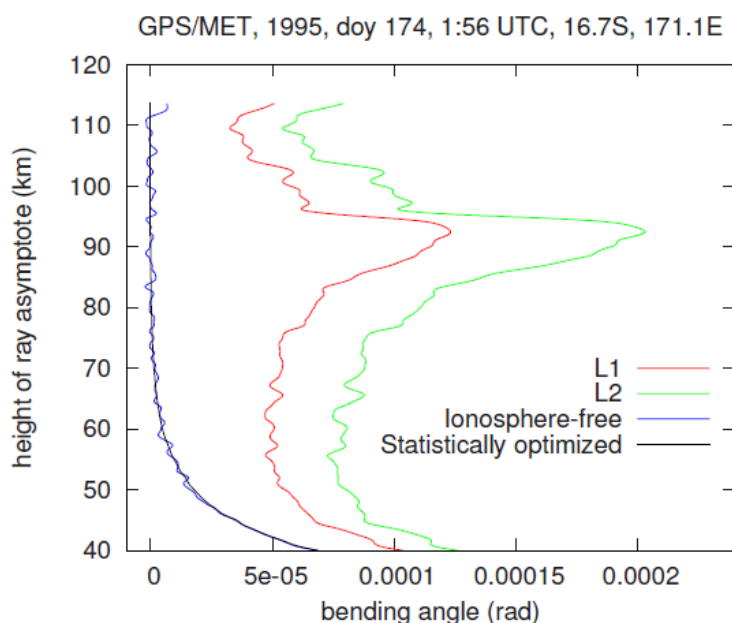


Figure 3: Valeurs du Bending angle avec correction (en bleu et noir) et sans corrections (en rouge et vert)

Hauteur spécifique [km]	Echantillonnage dz [km]	Erreurs à priori	
$60 \leq z \leq 100$	10.0	15.6K	Température
$40 \leq z \leq 60$	2.5	9.0K	
$30 \leq z \leq 40$	1.0	5.8K	
$20 \leq z \leq 30$	0.5	3.6K	
$00 \leq z \leq 20$	0.25	2.5K	
$00 \leq z \leq 20$	0.25	40%	Vapeur d'eau

Tableau 1: Pas d'échantillonnage et erreurs associés à priori pour chaque gamme de hauteur.

L'occultation troposphérique se réalise dans des temps proches de la minute. Il est donc nécessaire afin d'obtenir une résolution verticale correcte d'augmenter significativement le pas d'échantillonnage dans les quelques dizaines de secondes où le rayon passe en haut de la troposphère jusqu'à atteindre la surface (dans le cas d'un close-loop). Le tableau 1 met en évidence la relation entre le pas d'échantillonnage et la précision des mesures. L'erreur à priori de la vapeur d'eau reste importante car il est difficile d'estimer la quantité exacte de vapeur d'eau.

II.4- Méthode:

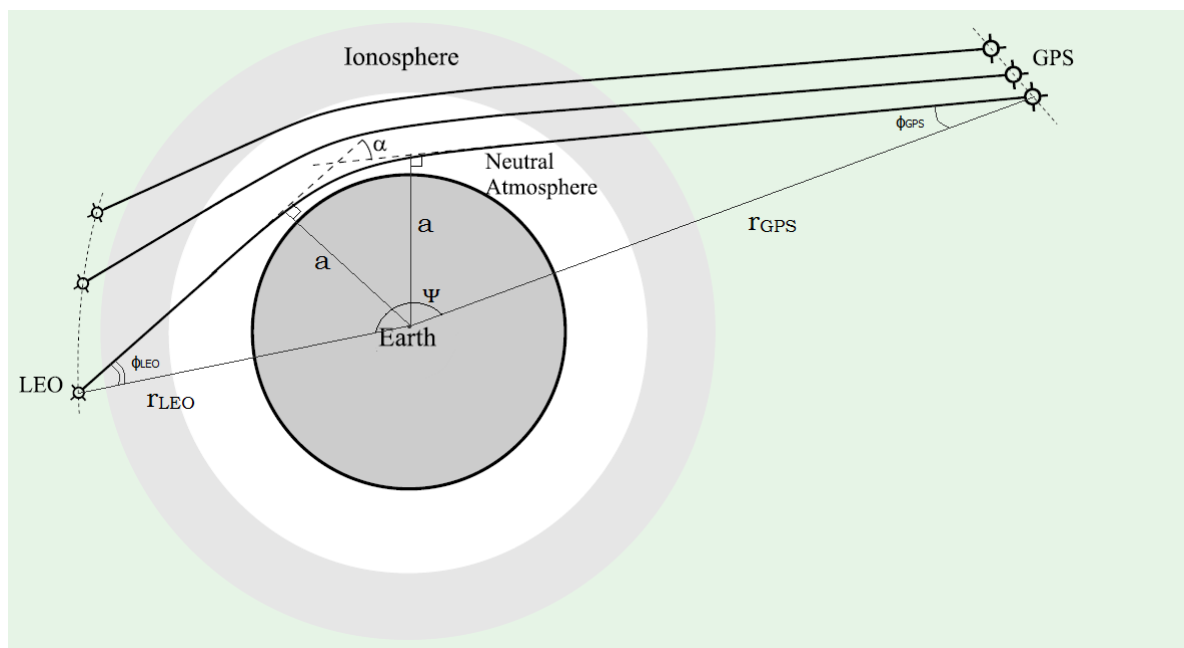


Figure 4: Géométrie de la radio-occultation.

II.4.1- Calcul de du Bending angle:

Les Fréquences porteuses L1=1,57542 GHz et L2=1,57542 GHz sont envoyées depuis le GPS et atteignent le LEO. Pour chacune d'entre elle, l'interaction avec la troposphère induit un délai de phase (illustré par la figure 5). Les délais seront appelés respectivement $S_1(t)$ et $S_2(t)$

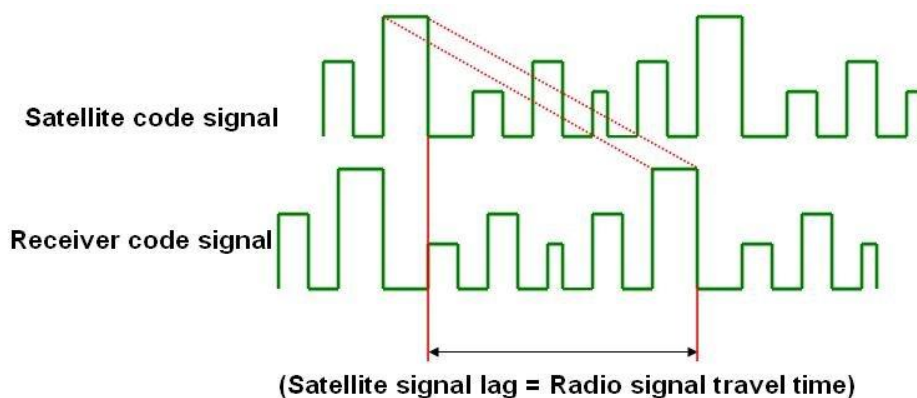


Figure 5: Délais de phase

En connaissant les fréquences des porteuses ainsi que leur délai associé, il est alors possible de calculer la fréquence Doppler:

$$f_D = -L_i \cdot c^{-1} \frac{dS_i}{dt} \quad (1)$$

Où c représente la vitesse de la lumière dans le vide.

La fréquence Doppler peut aussi être retrouvée à l'aide de la géométrie des satellites en prenant en compte vitesses et angles:

$$f_D = -L_i \left[\frac{c - n_{LEO}(v_{LEO}^r \cos \phi_{LEO} - v_{LEO}^t \sin \phi_{LEO})}{c - n_{GPS}(v_{GPS}^r \cos \phi_{GPS} - v_{GPS}^t \sin \phi_{GPS})} - 1 \right] \quad (2)$$

Où les indices LEO et GPS indiquent respectivement les satellites LEO et GPS, v représente la vitesse du satellite avec r pour radial et t pour tangentiel, n est l'indice de réfraction à la position du satellite et ϕ l'angle entre le vecteur d'onde et le rayon Terre-Satellite. Dans cette équation, c et L_i sont connus, v_{LEO}^r , v_{LEO}^t , v_{GPS}^r et v_{GPS}^t peuvent être mesurés par d'autres satellites, et f_D se retrouve avec l'équation (1).

En supposant que la Terre est sphérique, le paramètre d'impact a (cf figure 3) nous est donné par la formule de Bouguer:

$$a = r_{GPS} n_{GPS} \sin \phi_{GPS} = r_{LEO} n_{LEO} \sin \phi_{LEO} \quad (3)$$

On estime les satellites suffisamment éloignés de l'atmosphère pour ne pas être affectés par sa réfractivité, donc $n_{GPS} = n_{LEO} = 1$. Avec les équations (2) et (3), il est possible de retrouver ϕ_{GPS} , ϕ_{LEO} et a . En observant la figure 3, il est évident de dire que:

$$\alpha_i = \phi_{GPS} + \phi_{LEO} + \Psi - \pi \quad (4)$$

Par l'équation (4) nous arrivons finalement à obtenir une valeur du bending angle, mais cette valeur correspond à une fréquence (cf équation (1)). Donc afin d'obtenir une valeur d'angle plus exacte, si α_1 et α_2 sont les bending angles calculés respectivement par L_1 et L_2 , la formule correcte sera:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 L_1^2 - \alpha_2 L_2^2}{L_1^2 - L_2^2} \quad (6)$$

II.4.2- Réfractivité en lien avec Pression et Température :

Le bending angle est la conséquence de la réfractivité, or cette réfractivité, dans une symétrie sphérique, varie uniquement en fonction de l'altitude, donc du paramètre d'impact a . Il y a donc un lien entre bending angle, indice de réfraction n et paramètre d'impact:

$$\alpha(a) = -2a \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dx} dx \quad (7)$$

Où $x = rn(r)$.

Cherchant à obtenir la valeur de l'indice de réfraction n , on utilise l'inversion d'Abel appliquée à l'équation (7):

$$n(x) = \exp \left(\frac{1}{\pi} \int_x^\infty \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right) \quad (8)$$

De plus le coïncide de réfraction N de l'atmosphère donné par:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (9)$$

Il est corrélé directement avec la pression P , la température T et la pression partielle de vapeur d'eau e :

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2(0,622 + 0,378e)} \quad (10)$$

$$N_{\text{sec}} = 77,6 \frac{P}{T} \quad (11)$$

Pour résoudre le problème de l'équation (10) contenant trois inconnues, nous allons supposer dans un premier temps une atmosphère sèche, ce qui nous emmène à réduire le terme e , donc la seconde partie de l'équation. Dans un deuxième temps nous allons utiliser la loi des gaz parfaits combiné à l'équation de l'équilibre hydrostatique:

$$P = \rho RT \quad \& \quad \frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (12)\&(13)$$

A l'aide des équations (11), (12) et (13), il est alors possible d'obtenir une pression et une température variant en fonction de la hauteur, en considérant la condition d'atmosphère sèche.

II.4.3- Correction:

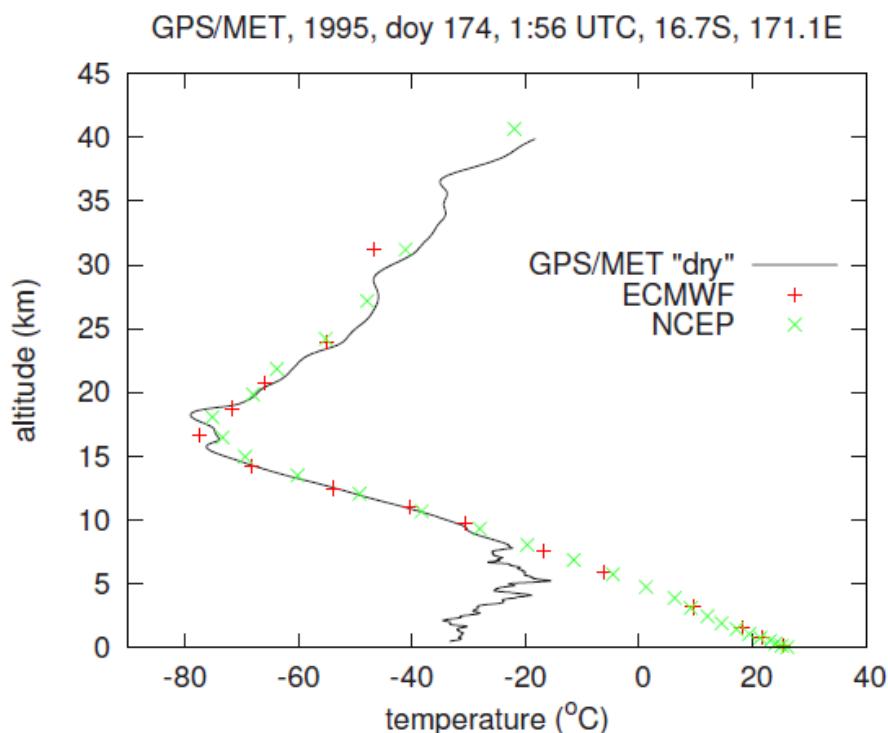


Figure 6: Comparaison de la température entre la méthode d'occultation atmosphère sèche (trait noir) et les modèles existant (modèle européen en vert et américain en rouge).

Lorsque l'on compare les valeurs qui découlent de la méthode décrite plus tôt et les modèles existant (cf figure 6), on s'aperçoit un important écart de température dans les altitudes inférieures à 10km. Une température calculée dans la troposphère inférieure humide sera sévèrement sous-estimé, cette erreur est directement reliée à la non-prise en compte de la pression partielle en vapeur d'eau dans l'équation (10). Pour remédier à ce problème il existe 2 méthodes.

Méthode 1:

Cette méthode propose d'inclure des températures a priori dans l'équation (10) (12), ce qui permettrait par itération de pouvoir retrouver une pression partielle d'eau en fonction de la hauteur.

Méthode 2:

Technique de variation en une dimension afin de combiner de façon optimale le profil de réfractivité avec des informations provenant d'un modèle de prévision météorologique numérique. Cette méthode inclue les erreurs dans les à priori

températures, pressions et vapeurs d'eau, mais aussi les erreurs sur la réfractivité observée:

$e_{apriori}(z)$, $P_{apriori}(z)$, $T_{apriori}(z)$ et $N(z)$ sont injectés dans la formule suivante

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (N_{obs} - N(x))^T R^{-1} (N_{obs} - N(x)) \quad (14)$$

Où x est le vecteur que l'on cherche à résoudre, x_b le vecteur à priori, $N(x)$ l'équation de réfractivité, B la matrice covariante des erreurs à priori et R la matrice covariante des observations et erreurs de représentativité.

III- Profil Cosmic, traité avec Matlab:

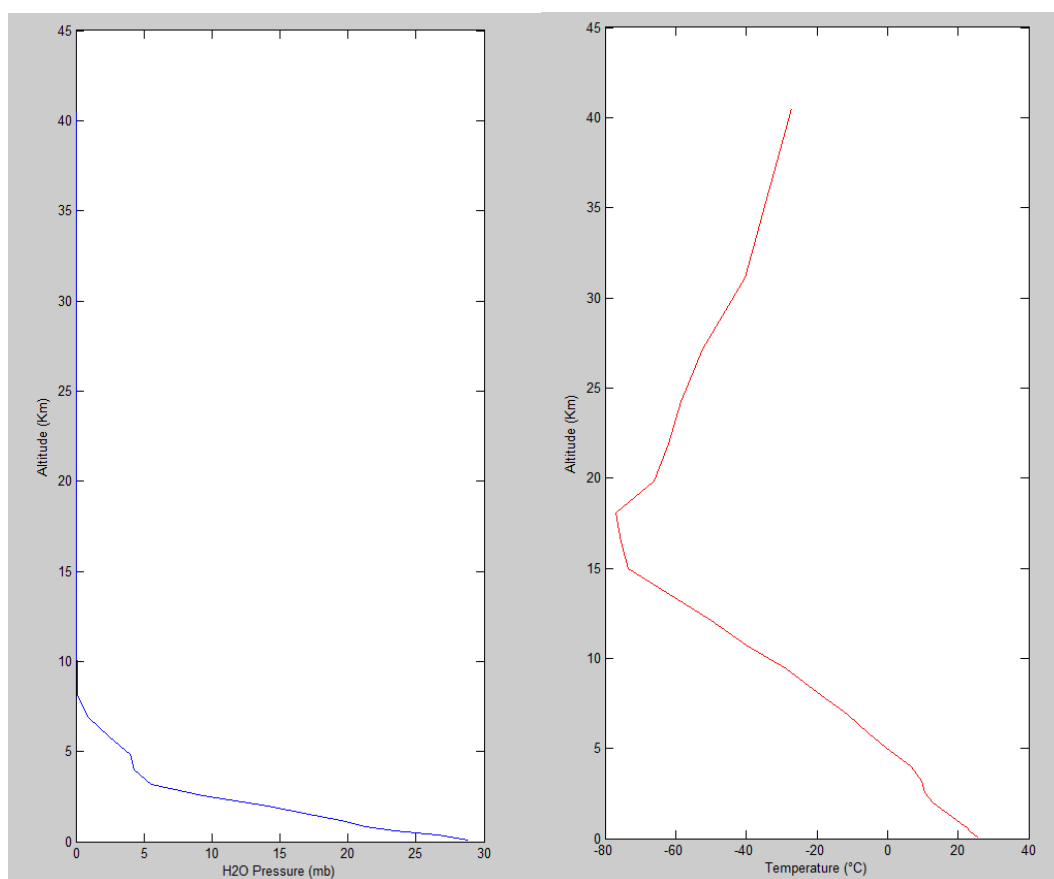


Figure 7: Exemple de profil vertical retrouvé à partir d'une occultation Cosmic²

La figure 7 montre un profil type résultant d'une radio occultation par la méthode du Bending angle entre un LEO et un GPS. Le résultat obtenu d'après les données Cosmic traitées à l'aide d'un code Matlab retravaillé provenant initialement de Pierdavid Coisson est très satisfaisant, il correspond aux prédictions numériques.

² Cosmic: réseau de 6 LEO occultant l'ensemble des couches atmosphériques depuis 2006.

IV- L'occultation troposphérique et le projet NanoSat:

Inclure l'occultation troposphérique au projet serait grandement bénéfique, cela pourrait nous permettre de réaliser des profils de pression température et vapeur d'eau qui nous seront propres. Par la suite il sera possible de les interpréter et idéalement, si on arrive à transmettre les données reçu à la station de réception au sol dans l'heure, il serait envisageable d'établir des prévisions météorologiques en temps quasi-réel. De plus il sera possible d'établir une carte météo mondiale car en une journée, soit 24h, le LEO peut réaliser environ 1000 occultations (si la technologie d'open-loop est réalisable) durant 14 orbites environ (orbites dépendantes de l'altitude du LEO). Ceci serait une avancée supplémentaire pour la mission étudiante visant principalement une approche formatrice plutôt que des résultats performants.

A savoir que rajouter l'occultation troposphérique au projet ne coûterait matériellement rien de plus car l'objectif principal étant l'occultation ionosphérique, il faudra que le Nanosat soit équipé d'un récepteur GPS bi-fréquence afin de réceptionner les fréquences porteuses L1 et L2 qui sont tout autant nécessaire pour la partie troposphérique que pour la partie ionosphérique (voir la rédaction de *Victor Husson* pour la partie ionosphérique).

Les principaux axes à étudier dans les prochains mois seront sur le plan énergétique, le volume de données à emmagasiner et transmettre, ainsi que le positionnement de l'antenne. En effet pour réaliser une occultation en close-loop, il est préférable que l'antenne soit à l'arrière du nanosat afin d'optimiser la qualité de l'occultation jusqu'à la perte du signal. Pour une occultation en open-loop, le raisonnement sera inversé, mais il faudra en plus créer une réplique du signal auquel il doit s'attendre. Cette technique décrite par Sokolovskiy et al. (2001) nécessite une réplique du signal GPS que le LEO s'apprête à recevoir afin de comparer le modèle avec le signal réel, une boucle (phase-locked loop-PLL) est mise en place pour ajuster au mieux le modèle dès la première réception car le bruit peut rapidement faire perdre le signal. A propos du volume de données à manipuler pour une occultation troposphérique, l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage du tableau 1 montre que bien que même si la couche à occulter est faible comparée à l'ionosphère, la quantité de données risque d'être conséquente. Et inexorablement relié, de l'énergie électrique à bord du LEO devra être disponible pour cette opération.

V- Conclusion:

La troposphère représente un enjeu principal pour la météorologie, acquérir des données de celle-ci permettrait des prévisions pertinentes. Comme le montre la figure 7, les profils retrouvés par le programme Matlab coïncidant parfaitement avec les modèles permettent de démontrer l'efficacité de l'occultation troposphérique. En suivant la méthodologie citée précédemment, il est tout à fait possible de mettre au point ce type d'occultation. L'hypothèse de rajouter cette mission sur le Nanosat UnivEarthS serait un point positif pour le projet dans le sens où obtenir des cartes météorologiques par nos soins serait fortement attrayant, mais reste à chiffrer les quantités de transferts et le bilan énergétique de l'appareil car le projet étant encore très jeune, peu de valeurs sont données. Il faudra donc quantifier au mieux les volumes à traiter dans les prochains mois.

La fin du stage ne marque pas la fin du projet, au contraire ma partie montre que celui-ci ouvre de nouveaux axes à étudier dans les prochains mois. Idéalement il faudrait pouvoir déposer un bilan de la phase 0 du projet d'ici la fin de l'année.

Ce stage m'a permis de mettre un premier pas dans le monde de la recherche, le travail en autonomie au sein d'un groupe ayant pour intérêt commun l'avancée du projet fut grandement bénéfique pour moi-même comme pour le projet qui en a acquis un grand pas dans sa phase 0. Se solvant par une formation au CNES à Toulouse, j'ai pu acquérir lors de ce stage de nombreuses connaissances sur un sujet qui m'était totalement inconnu (faute de découvrir la filière STEP cette année).

Je remercie l'ensemble des encadrants du projet Nanosat UnivEarthS de nous offrir la possibilité de travailler sur une mission d'une telle envergure, en particulier Mr Pierdavide Coisson de nous avoir suivis malgré son déménagement aux Etats-Unis, et le laboratoire de Planétologie et Science Spatiale de nous avoir agréablement accueilli.

Références:

Gorbunov ME (2002) Canonical transform methods for processing of Radio occultation data in the lower troposphere. *Radio Sci* 37(5) 1076, doi:10.1029/2000RS002592.

Gorbunov ME, Gurvich AS (1998) Algorithms of inversion of Microlab-1 satellite data including effects of multipath propagation. *Int J Remote Sens* 19:2283– 2300

Beyerle G, Gurbunov ME, Ao CO (2003) Simulation studies of GPS radio occultation measurements. *Radio Sci* 38:1084, doi:10.1029/2002RS002800

Sokolovskiy SV (2001) Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit. *Radio Sci* 36(3):483–498

Sokolovskiy SV (2004) Open loop tracking and inverting GPS radio occultations signals: simulation study. In: Kirchengast G, Foelsche U, Steiner AK (eds) *Occultations for probing atmosphere and climate*. Springer, Berlin, pp 39–52

Hocke, K., Inversion of GPS meteorology data, *Ann. Geophys.*, 15, 443-450, 1997.

Hajj GA, Lee LC, Pi X, Romans LJ, Schreiner WS, Straus PR, Wang C (2000) COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 11:235–272

Herman BM, Kursinski ER, Feng D, Flittner D, Ward D, Syndergaard S, Lane E (2003) Active tropospheric ozone and moisture sounder (ATOMS). Science Report, NASA contract no. NAS1-99055, Institute of Atmospheric Physics, The University of Arizona, Tucson, Arizona

Lee LC, Rocken C, Kursinski R (eds) (2001) *Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate*. Springer, Hong Kong

Syndergaard S, Kursinski ER, Herman BM, Lane EM, Flittner DE (2005) A refractive index mapping operator for assimilation of occultation data. *Mon Weather Rev* (in press)