



## Rapport de stage au laboratoire de géophysique de l'Université Paris Diderot

université  
**PARIS**  
PARIS 7  
**DIDEROT**

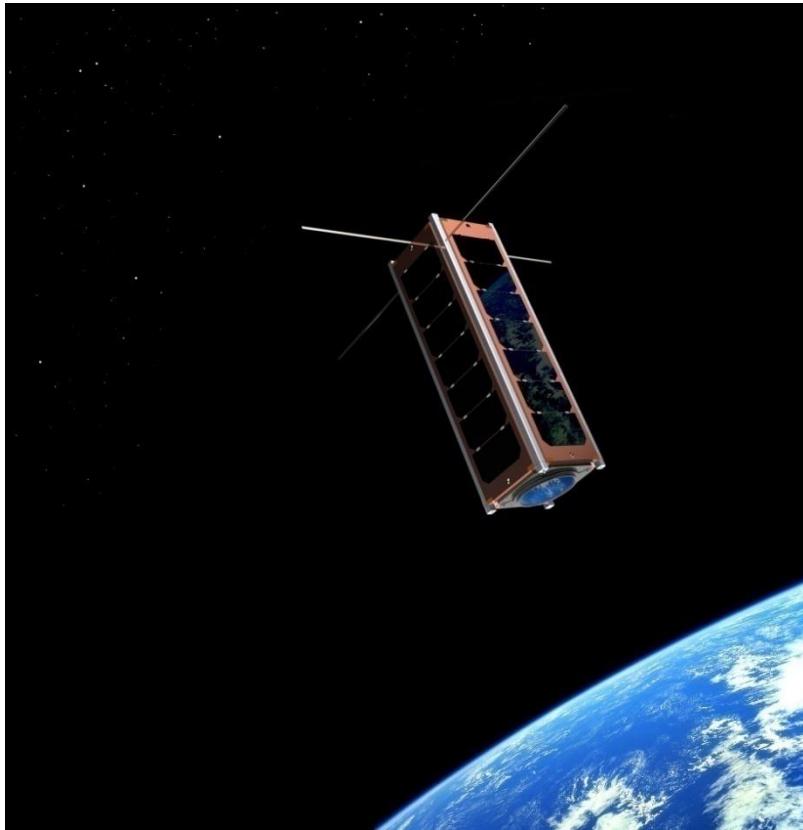
Victor Husson

maitre de stage:

Philippe Lognonne

directeur de stage:

Giovanni Occhipinti



Sujet du stage:

Analyse des données TEC de COSMIC et des profils de densité électronique inversé par la technique de l'onion peeling, ceci pour mettre en évidence l'erreur d'inversion qu'on obtient avec l'hypothèse de symétrie sphérique à la base de l'onion peeling.

Introduction:

Ce stage au laboratoire de géophysique spatiale et planétaire s'inscrit dans un projet étudiant visant à réaliser un satellite sous la tutelle de l'Université Denis Diderot, en partenariat avec l'IPGP (l'Institut Physique du Globe de Paris), l'APC (laboratoire d'AstroParticule et Cosmologie), l'AIM (Astrophysique, Interactions, Multi-échelles) et le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales).

Des étudiants de plusieurs universités participent à ce projet, notamment des étudiants d'OSAE (Outils et Système de l'Astronomie et de l'Espace), de l'EIDD (l'Ecole d'Ingénieur de Denis Diderot) et des étudiants en Master et Licence de physique et de STEP (Sciences et Techniques de l'Environnement et des Planètes) à Paris 7.

Les objectifs scientifiques de ce projet sont:

- La mesure du rayonnement gamma et du contenu électronique total (TEC) dans les cornets polaires et dans l'Anomalie Magnétique de l'Atlantique Sud (AMAS),
- Le test d'un nouveau type de détecteur gamma développé par l'APC,
- La mesure du TEC par un GPS bi-fréquence.

Les deux premiers objectifs sont étudiés par des étudiants travaillant pour l'APC, le troisième concerne l'IPGP.

Pour ce stage, j'ai travaillé en collaboration avec quatre autres étudiants en licence 3 de STEP (Sciences et Techniques de l'Environnement et des Planètes) sur la théorie présente derrière le troisième objectif scientifique. J'ai dû m'appuyer sur certains résultats de mes collègues bien que nos sujets aient été différents car nos études respectives s'inscrivent dans le même cadre.

Ainsi, mon rapport va vous présenter ce que j'ai compris sur la théorie de l'occultation ionosphérique par signal GPS en utilisant un satellite en orbite à basse altitude muni d'un récepteur GPS bi-fréquence. Il montrera également des figures d'EDP (Electron Density Profile) obtenus ainsi que des graphiques de TEC (Total Electron Content) horizontaux.

Dans un premier temps, je présenterais les connaissances que j'ai acquise sur l'ionosphère en générale et la propagation des signaux GPS à travers ce milieu.

Dans un second temps, j'expliquerais en quoi consiste la radio-occultation et je montrerais les travaux que j'ai effectué sur la base des données extraites des satellites de la mission COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) ainsi que les données que j'ai pu étudier.

Enfin je montrerais à quoi peut bien ressembler un EDP et comment on l'obtient en m'appuyant sur les données d'une simulation effectuée pendant ce stage.

## I. Généralités sur l'ionosphère, et propagation des signaux GPS

### I.1°) Introduction à l'ionosphère

L'ionosphère est une couche de la haute atmosphère dont la particularité est la présence d'ions complexes puis simples dû à l'absorption des rayons à haute énergie (rayons X et UV) des molécules présentes à cette altitude ce qui conduit à la création d'un plasma froid.

La conséquence de cette absorption est la photo-ionisation des molécules, c'est-à-dire qu'elle perdent leurs électrons en conséquence de leur gain d'énergie. L'équation générale pour ce mécanisme est présentée ci-dessous:



Avec X une molécule ou un atome quelconque,  $h\nu$  un photon ionisant,  $X^+$  le radical ionisée et  $e^-$  l'électron libéré par cette ionisation.

Dans les couches les plus basses de l'ionosphère, les ions sont dits complexes car ce sont des molécules lourdes qui sont ionisées tandis que dans les couches les plus hautes, il n'y a que des atomes très légers, en particulier des atomes d'hydrogène, qui forment des ions simples.

D'après les modèles et les observations, il est possible de découper l'ionosphère en plusieurs couches possédant chacune leur caractéristiques propres (composition, existence, méthode de transport, etc..). Ces couches sont définies comme suit :

Couche	Altitude (en km)
D	70 - 90
E	90 - 140
F1	140 - 200
F2	200 - 400
Partie supérieur	> 400

Tableau 1, présentation des différentes couches de l'ionosphère en fonction de leur altitude.

#### I.1°) a- Région D

Région la plus basse de l'ionosphère, c'est aussi la région la moins ionisée. Présente le jour, elle disparaît complètement la nuit puisqu'elle est très sensible à la quantité d'énergie reçue du Soleil.

Lorsqu'elle est présente, les ions la composant sont principalement des ions lourds, mais ils peuvent être positifs comme négatifs, la probabilité de collision étant encore assez élevée à cette altitude. En

effet, des électrons issus de molécules ionisées (qui deviennent donc des anions) peuvent se recombinaison avec des molécules non ionisées du fait de leur grande énergie, créant ainsi des cations.

#### I.1°)b- Région E

La région E a une densité électronique pouvant varier d'un facteur 1 à 100 selon l'ensoleillement (i.e. jour ou nuit), sachant qu'elle varie d'un facteur 10 en quelques minutes après le coucher du Soleil et son lever ([Coisson.2012 *Détection multi-instruments des perturbations ionosphériques générées par la propagation des tsunamis* ]).

#### I.1°)c- Région F

La région F est la plus importante de la Ionosphère. La faible densité de particules à cette altitude rend faible la probabilité de recombinaison, c'est pourquoi cette couche est présente toute la nuit. La partie basse de cette couche (F1) est dominée par la photochimie, tandis que la partie haute (F2) est dominée par la diffusion.

## I.2°) Propagation des signaux GPS dans l'ionosphère

Les signaux GPS sont des ondes électromagnétiques. Il existe actuellement deux fréquences utilisées par les satellites GPS pour le positionnement, la fréquence L1 (L1 = 1,217 GHz) et la fréquence L2 (L2= 1,565 GHz).

Or l'ionosphère, on l'a vu, est composée de particules ionisées. Par conséquent, les ondes électromagnétiques se propageant dans l'ionosphère, interagissent avec le milieu ce qui affecte leur propagation. Les différents effets qui résultent de cette interaction sont:

- le retard de groupe :  
l'information contenue dans le signal (la modulation) est perturbée par la présence d'électrons libre sur le passage de l'onde. Cette perturbation s'exprime sous la forme d'un retard que l'on peut lier au TEC avec la loi suivante :

$$I = \frac{40.3 \times N_T}{c \times f^2} \quad (2)$$

avec  $I$  le retard ionosphérique (en s)

$N_T$  le TEC sur le passage de l'onde (i.e. la quantité d'électron libre en el.m-2)

$c$  la vitesse de la lumière (en m.s-1)

$f$  la fréquence de l'onde (L1 ou L2) (en Hz)

- l'avancement de phase :  
au retard de groupe s'ajoute un avancement de phase de même amplitude :

$$\Delta\varphi = 1,343 \times 10^{-7} \times \frac{N_T}{f^2} \quad (3)$$

avec  $\varphi$  la phase du signal

- l'effet Doppler :  
du fait des mouvements respectifs du satellite GPS et du récepteur durant l'émission et la réception dans une zone où il y a des électrons libre, on a une augmentation de l'effet Doppler :

$$\Delta f = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1,343 \times 10^{-7}}{f} \times \frac{dN_T}{dt} \quad (4)$$

cet effet est négligeable en dehors des zones fortement ionisées.

- la rotation de Faraday :  
cet effet est contré en appliquant au signal une polarisation circulaire.
- la distorsion de la forme d'onde transmise :  
l'ionosphère a les mêmes propriétés dispersives que l'atmosphère basse, ce qui conduit à dégrader le signal. Cet effet est inversement proportionnel au carré de la fréquence de l'onde émise.
- les scintillations d'amplitude et phase du signal :  
ce phénomène est lié aux variations temporelles du TEC traversé. Il peut être la cause de la perte momentanée du signal ou de glissement de phase. Il est surtout présent aux basses et hautes latitudes.
- la réfraction angulaire du signal :  
l'atmosphère, du fait de sa densité, joue le rôle d'une lentille et peut amener à dévier les rayons de la même manière qu'un rayon lumineux traversant de façon oblique une couche d'eau est réfracté. Cependant, on peut négliger cette réfraction au premier ordre pour les signaux GPS ([Schreiner and al. 1999 *Analysis and Validation of GPS/MET Radio Occultation Data in the Ionosphere*]). La manière dont on peut négliger cette réfraction angulaire est montrée ci-dessous ([Coisson.2012 *Détection multi-instruments des perturbations ionosphériques générées par la propagation des tsunamis*]), et elle consiste à montrer que pour des très hautes fréquences, l'indice de réfraction de l'atmosphère haute (i.e. l'ionosphère) est égale à 1 car la réfraction est directement relié à l'indice du milieu selon la loi de Snell-Descartes détaillée plus en avant dans le rapport (équation 13) :

(4)

(5)

(6)

(7)

(8)

avec :

$N_e$  la densité électronique

Or on a vu précédemment que l'ionosphère pouvait être approximée par un plasma froid. On peut donc négliger la composante fréquence de collision dans l'équation (4), ainsi le terme  $Z$  disparaît :

(9)

De plus, on a également vu que les fréquences GPS étaient de l'ordre du GigaHertz ( $f > 1\text{GHz}$ ), donc  $Y \ll 1$  ce qui conduit à l'approximation suivante :

(10)

(11)

(12)

avec  $f_N$  la fréquence de plasma ( $\sim 10$  MHz)  
 $f$  la fréquence de l'onde

Puisque la fréquence de l'onde  $f \gg f_N$  la fréquence de plasma, on a  $n^2$  qui est sensiblement proche de 1. Or la réfraction angulaire est donnée par la loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (13)$$

## II. Radio-occultation, traitement et interprétation des données

### II.1°) Radio-occultation

La radio-occultation consiste en l'étude des couches de l'atmosphère par traitement d'un signal les ayant traversé. C'est le principe même du troisième objectif scientifique du satellite que nous allons développer.

#### *Figure 1* Principe de la radio-occultation

A bord de notre satellite qui orbitera à une altitude comprise entre 600 et 800km nous allons installer un récepteur GPS bi-fréquence (c'est-à-dire qui pourra traiter les deux fréquences utilisées par les GPS, L1 et L2). On l'a vu précédemment, les signaux qui traverseront l'ionosphère avant d'être intercepter par le LEO (Low Earth Orbiter) seront dégradés. Cette dégradation pourra, après un traitement que je détaillerais dans la partie II.2°, donner des informations valables sur le contenu électronique totale de la haute atmosphère mais aussi sur la température, la pression et la quantité de vapeur d'eau dans la basse atmosphère, cette partie étant étudiée par Ari Jeannin, je ne la développerai pas ici.

### II.2°) Acquisition et traitement des données, exemple de l'algorithme utilisé pour la mission COSMIC

La mission COSMIC est une constellation de 6 satellites à basse altitude exclusivement conçus pour étudier la composition de la haute et la basse atmosphère, autrement dit pour fournir des données météorologiques, ionosphériques, climatologiques et concernant l'évolution de l'environnement à proximité de la Terre. Cette mission est une collaboration entre les Etats-Unis et Taïwan. Elle fut lancée en 2006 et a grandement influencé nos connaissances de la haute atmosphère en particulier avec plusieurs centaines de milliers d'occultations faites en 7 ans dont plus de 80% exploitables. L'algorithme utilisé par la mission COSMIC pour traiter les données collectées par les LEO les classe par niveau allant de 0 à 3.

#### *Figure 2* Tableau récapitulatif des inputs et outputs fait par l'algorithme de COSMIC en fonction des niveaux

Il faut aussi savoir que l'algorithme peut travailler en deux modes différents, le PP (Post Processing) et le RT (Real Time processing). La différence entre ces deux méthodes tient au mode de fonctionnement des fonctions utilisées dans l'algorithme, et l'ordre dans lequel on y fait appel dans le traitement des données. L'intérêt de ce fonctionnement bi-phasique, réside dans le fait que les données extraites en RT ne sont pas comparées aux autres pendant leur



traitement. Ainsi, les discontinuités possibles que l'on peut extraire des données ne peuvent pas être caractérisées par un dysfonctionnement ou par une construction atypique de la haute ou basse atmosphère à l'endroit de l'occultation mais ne sont pas pour autant lisses ce qui permet d'avoir une bonne idée des variations parfois importantes et inattendues qui peuvent exister dans les différentes couches de l'atmosphère.

Le PP quant à lui permet de lisser les erreurs de fonctionnement car il s'appuie sur plusieurs observations pour donner une représentation valable desdites perturbations locales.

#### II.2°)a- Acquisition des données, lvl 0

Le niveau 0 des données contient deux fichiers, l'un provenant du satellite LEO et contenant les informations sur le signal GPS intercepté, c'est-à-dire l'heure d'émission du signal, avec l'heure de l'horloge interne du satellite GPS concerné, et sa position relative au repère ECI (Earth Centered Inertial), un référentiel dont le centre est le même que celui de la Terre mais dont les axes pointent vers des étoiles lointaines, il n'est pas influencé par la rotation de la Terre sur elle-même. L'autre provenant de station au sol et contenant les informations sur les trajectoires respectives du satellite COSMIC et du satellites GPS. Ces données sont les TLE (Two Lines Element) et sont mis à jour de manières régulières.

#### II.2°)b-Traitement primaire des données, lvl 1a et lvl 1b

Les niveaux 1a et 1b contiennent les données traitées issues du niveau 0. Les données appartenant au niveau 1a représentent les données de positions des satellites LEO et GPS ainsi que du profil d'occultation. Le détail de leur obtention passe par un module développé par les ingénieurs de la mission COSMIC qui n'est pas accessible au public, je n'ai donc pas eu accès au mode de fonctionnement précis. Je peux simplement dire que ce module fonctionne de la même manière en RT et PP, c'est-à-dire que les données qu'il extrait ne sont pas dépendantes des variations de densité électronique des couches. Ce module se nomme MakeMulCal.

Les données appartenant au niveau 1b, quant à elles, contiennent des informations sur les heures corrigées, sur les densités électroniques traversées, sur les biais électroniques des outils présents à bord du LEO, etc...

Elles sont obtenues par des séries d'itérations et par traitement là encore par des modules non accessibles au public. Cependant pour ce niveau, les données sont analysées en RT puis en PP. Les modules qui font ce traitement sont, respectivement pour le mode RT puis PP, MakeLeoDCB dans un premier temps, et le MakeLeoDcb en parallèle avec le UpdateTEC dans un second temps. Il existe une différence dans le mode de fonctionnement du MakeLeoDcb en RT et en PP, mais encore une fois je n'ai pas pu accéder à ces informations.

#### II.2°)c- Traitement secondaire des données, lvl 2

Le niveau 2 contient des données relatives aux inversions effectuées sur les données du niveau 1b. Ces inversions sont faites par le module le plus important de l'algorithme, le

module atec. C'est ce module qui crée les outputs utilisables ensuite pour interpréter les données obtenues. Ces données sont compressées en fichier netcdf après opération.

## II.2°)d-Traitement finale des données, lvl 3

Le niveau 3 ne contient qu'un seul fichier. Ce fichier est également compressé en netcdf, et il contient toutes les données d'occultations qui ont été faites sur un mois sous la forme d'une grille. L'obtention de ce fichier se fait par regroupement de toutes les données validées par l'algorithme et se remplit au fur et à mesure. Chaque mois il est créé un nouveau fichier. La date qui correspond aux données d'occultations qu'il contient se trouve dans son header.

L'algorithme utilise également deux autres modules pour donner des informations supplémentaires sur chaque fichier de données, et pour les recompresser en fichiers non plus netcdf mais ascii. Le premier module, catDCBs ajoute dans le header de chaque fichier les informations concernant la station au sol qui a recueilli et traité les données. Le second, muleCal2ascii s'occupe de la décompression/recompression des fichiers.

## II.3°) Interprétation des données

Grâce au Dr. Pierdavide Coisson qui m'a donné un code MatLab pour ouvrir les fichiers compressés en netcdf, j'ai pu analyser quelques données provenant des satellites COSMIC et correspondant à des occultations faites le vendredi 11 Mars 2011.

*Figure 3* Carte montrant le lieu d'une occultation. En rouge l'orbite du LEO (de bas en haut), en bleu l'orbite du GPS, et en rouge dégradé le périégée (point tangent à la surface de la Terre du lien LEO/GPS) en fonction de sa hauteur. L'endroit d'où part le trait rouge dégradé correspond également au début de l'occultation.

a) b)

*Figure 4* Graphique montrant le TEC en fonction a) du temps de l'occultation (l'occultation démarre au niveau du trait rouge) et b) de la hauteur du point d'impact (périégée).

Ce que l'on peut dire sur cette occultation, c'est qu'elle se trouve proche de l'équateur pendant la nuit. On s'attend donc à trouver une valeur de TEC horizontale

