



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

ABABSA KHADIDJA

HADJ AISSA MANAL

DOMAINE : SIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION :SCIENCES ET TECHNIQUES TOPOGRAPHIQUES

Thème

***Détermination de la variation temporelle de la quantité
ionosphérique au dessus d'une station GPS***

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
BENCHHIDA Abd elkader	MAB	Président
GUEROUDJ Abdelhalim	MAB	Examineur
KADRI Chadli	MAA	Encadreur
MAKHLOUFI Zoubir	MCA	Co-Encadreur

**Date 25 octobre 2015
Année universitaire 2015/2016**

Table des matières

<i>Table des matières</i>	<i>i</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Dédicace</i>	<i>v</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>viii</i>
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre 1</i>	<i>1</i>
<i>La Mesure GPS</i>	<i>1</i>
1.1 Introduction.....	2
1.2 Sources d'erreurs.....	2
1.2.1 Erreur d'orbite	2
1.2.2 Erreur troposphérique.....	3
1.2.3 Erreur ionosphérique	3
1.2.4 Multi-trajet	4
1.2.5 Bruit du récepteur	6
1.2.6 Les erreurs d'horloge.....	6
1.3 Bilan d'erreurs de la mesure GPS	7
1.4 Relation d'observation	8
1.5 Combinaisons linéaires de l'observation GPS	9
1.5.1 La combinaison Ionosphère-Free	10
1.5.2 La combinaison Geometry-Free	11
1.5.3 La combinaison Wide-Lane.....	11
1.5.4 Récapitulatif des combinaisons linéaires	12
2.1 Historique	13
2.2 Généralités sur l'Ionosphère	13
2.3 Structure de l'ionosphère.....	14
2.3.1 La région D.....	14

Table des Matières

2.3.2	La région E	15
2.3.3	La région F	15
2.4	Délai ionosphérique	16
2.5	Modélisation de la propagation des signaux GPS	17
2.5.1	Indice de réfraction ionosphérique	17
2.6	Modélisation de l'ionosphère.....	20
2.7	Les modèles ionosphériques :	21
2.7.1	Klobuchar.....	21
2.7.2	GISM (Global Ionospheric Scintillation Model)	21
	Présentation Générale	21
2.7.3	IRI(Ionosphère référence international).....	21
2.7.4	Modèle TIE-GCM	22
2.7.5	Ne Quick	22
	<i>Chapitre 3</i>	<i>13</i>
3.1	Introduction.....	23
3.2	Présentation de la zone d'étude	23
3.3	Matériel et méthodes.....	24
3.3.1	Collecte les données.....	24
3.3.2	Le processus d'extraction des données.....	24
3.4	Délai différentiel de détermination de TEC.....	24
3.5	Les paramètres de l'étude	25
3.5.1	Slant TEC.....	25
3.5.2	Vertical TEC.....	25
3.5.3	Fonctions de projection.....	26
3.5.4	La détection des irrégularités dans le Contenu Total Electron	26
	<i>3.6 Résultats et analyse</i>	<i>26</i>
	Conclusion générale	44
	References Bibliographiques	45

Remerciements

*Avant toute chose, on remercie dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail. Nous adressons notre profonde gratitude et reconnaissance envers Mr **CHADLI BEN JDIDE KADRI** maitre - assistant à l'université Amar Tlidi de Laghouat , pour ses précieux enseignements durant l'année, de nous avoir honoré en acceptant de nous encadrer et structurer ce travail ainsi que sa contribution inestimable à le mettre à terme, sa ponctualité et sa disponibilité même en dehors des heures de travail, en est l'apothéose.*

*Nous remercions les membres du jury Mr **Abdelhalim GUERROUDJ** et Mr **Benchhida abd alkaderet** Mr **makhloufi zoubir** pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'avoir acceptés d'évaluer notre travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*À mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de
L'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure*

Bonne santé et longue vie.

*À celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de
ce travail: mes frères Yacine et Ahmad et Azzedine, et À mes
sœurs widad et Fatima Zahra, et bien sur À mon fiancé
Mohamed tayeб*

À toute ma famille hadj Aissa

À mon binôme Kfadidja

*À tous mes chers amis et mes collègues de l'Université d'Amar
Tlidji*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
travailsoit possible, je vous dis merci.*

Hadj Aissa Manal

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères lamine, Hamza, Omar, Brahim, Aissa et ma sœur Fatima et son mari Bachir, et ma cousine Fatiha. Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

A toute ma famille Ababsa

A mon binôme Manal

*À tous mes chers amis et mes collègues de l'Université d'Amar
Thlidji*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Ababsa Khadidja

Liste des figures

Figure (1.1):Multi-Trajet	5
Figure (2.1): Distribution typique des électrons	14
Figure (2.2) : Vue simplifiée des couches de d'ionosphère sur une période de 24 heurs	16
Figure (2.3) :erreur ionosphérique	17
Figure (3.1) : Station Cagliari	23
Figure (3.2) : GPS Trimble	23
Figure (3.3) : Géométrie pour la conversion de slant TEC vers verticale TEC	25
Figure (3.4) : courbes représente variation de VTECU et gradient TECU /min de 01-31 mars 2013 en fonction de temps local dans station Cagliari	41
Figure (3.5):carte ionosphérique de TEC en station Cagliari 2013	42
Figure (3.6) : carte ionosphérique de TEC en station Brus 2009	43

Liste des tableaux

Tableau (1.1) : Correspondance Temps-Distance- TEC	4
Tableau (1.2) : Valeur absolue des différentes erreurs et biais influençant les mesures GPS.....	8
Tableau (1.3): Comparaison entre les combinaisons linéaires (Lc) et (L1) observées	12
Tableau (3.1) : Informations sur la localisation et type de récepteur, antenne et hauteur de l'antenne.....	23

Liste des abréviations

ARP	Antenne Référence Point
Code C/A	Coarse / Acquisition (code)
Code P	Précise (code)
DCB	Différentia Code Bias
EUV	Extrême Ultraviolet
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGS	International GPS Service
IPP	Ionospheric Pierce Point
L1etL2	Link 1 et Link 2
LAMBDA	Least-squares Ambiguity Decor relation Adjustment
MATLAB	Matrix Laboratory
NAVSTAR	Navigation System by Timing And Ranging
PD	Pseudo-Distance
PCV	Phase Center Variation
PRN	Pseudorandom Noise
RINEX	Receiver In dependant Exchange format
SA	Selective Availability
SLM	Single Layer Model
SP3	Standard Format # 3
STEC	Sent Total Electron Content
TECU	TEC Unit
TEC	Total Electron Content
UT1	Universel Time 1 (échelle basée sur la rotation de la Terre)
VTEC	Vertical Total Electron Content

Introduction générale

L'ionosphère est définie comme la région de l'atmosphère où les radiations solaires produisent suffisamment d'électrons pour perturber la propagation des ondes radioélectriques. Le phénomène d'ionisation se produit lorsqu'un atome ou une molécule acquiert ou perd un ou plusieurs électrons et devient ainsi porteur de charges électriques. Les radiations solaires (ultraviolet) sont la principale source d'énergie qui génère le phénomène d'ionisation. L'ionosphère se situe entre 50 et 1000 km d'altitude mais sa densité maximum (densité d'électrons) se retrouve généralement à une altitude de 350-400 km. Cette partie de l'atmosphère n'est malheureusement pas homogène. Elle varie dans le temps, l'espace et selon l'activité solaire. Cette dernière est fonction des taches solaires qui varient périodiquement selon un cycle de 11 ans. [\[Claude St-Pierre, \(1999\)\]](#)

Le contenu électronique total (TEC) est l'un des paramètres les plus importants qui décrivent l'état de l'ionosphère et de sa structure. Théoriquement, différentes périodes de processus physique ionosphérique peuvent être étudiées en détectant et en analysant les variations temporelles de TEC. TEC peut être utilisée pour corriger la propagation des ondes radio dans l'application de communication de radio basée à l'espace comme la position du satellite, la navigation et la détermination d'orbite, parce que TEC est étroitement associée à la temporisation de l'onde radio qui perce l'ionosphère. TEC a été mesuré pendant des décennies en utilisant l'effet de la rotation de Faraday sur un linéaire polarisé se propageant une onde plane. Mais les mesures aujourd'hui TEC sont faites principalement utilisant les données GPS en raison de la bonne couverture mondiale du réseau d'observation de GPS. [\[Rufus Sola Fayose, et al\(2011\)\]](#)

Cette recherche met l'accent sur la détermination de la variation temporelle de la quantité ionosphérique au-dessus de la station GPS.

Ce mémoire sera étudié suivant un plan de travail qui comprend trois chapitres. Le premier sera consacré aux erreurs du GPS qui sont réparties en trois catégories : erreurs liées au satellite, spatialement corrélées, erreurs indépendantes. Pour éliminer ces erreurs, on cite les combinaisons linéaires d'observation : Wide Line, Ionosphere-Free, Geometry-Free. Cette recherche met l'accent sur cette dernière. Dans le deuxième chapitre, on étudiera la couche ionosphérique et notamment l'indice de réfraction ionosphérique et les modèles ionosphériques.

Le dernier chapitre sera destiné à l'analyse et aux résultats concernant les mesures de station permanente Cagliari en Italie. Le but est de développer un algorithme par le logiciel de programmation MATLAB et estimer les valeurs du contenu électronique total (TEC), par la mesure du code du signal GPS. Le résultat final est une carte ionosphérique 2D d'observation du mois de Mars 2013.

Chapitre 1

La Mesure GPS

1.1 Introduction

Le système NAVSTAR GPS (Navigation Système by Timing And Ranging-Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites mis au point par le département de la défense des USA. Les coordonnées d'un point sont déterminées par trilatération. Les distances entre le point à déterminer et les satellites sont obtenus par la mesure du temps de parcours d'une onde électromagnétique. Afin d'avoir un minimum de 4 satellites à toute heure et en tout point de la terre, le système comporte 24 satellites répartis sur 6 plans orbitaux ayant une inclination d'environ 55° sur l'équateur. L'altitude des satellites est d'environ 20200 km et leur période de révolution est d'approximativement 12 heures [[Parkinson, 1994](#)].

Chaque satellite génère en permanence deux porteuses L_1 et L_2 de fréquences respectives 1575.42 MHz et 1227.60 MHz, modulées en amplitude par les codes pseudo aléatoires C/A, P et Y. Cette modulation permet aux satellites de transmettre les messages de navigation.

1.2 Sources d'erreurs

Les différentes sources d'erreurs affectant la mesure GPS. Ces erreurs peuvent être classées en trois catégories, selon leur corrélation spatiale et temporelle:

- Liées au satellite seulement: erreur de l'horloge du satellite, Sa (avant mai 2000).
- Spatialement corrélées: erreur d'orbite, erreurs atmosphériques (troposphère et ionosphère).
- Erreurs indépendantes: bruit du récepteur et multi-trajet.

Le premier type d'erreurs peut être totalement éliminé par la différence simple entre deux récepteurs. Le second peut être réduit par la différence double ; toutefois, les erreurs résiduelles augmentent lorsque la longueur de la ligne de base devient de plus en plus importante. Le troisième type d'erreurs ne peut être éliminé par aucune technique de différentiation ; ces erreurs sont indépendantes de la ligne de base.

1.2.1 Erreur d'orbite

L'erreur orbitale est due à l'incertitude des éphémérides transmises. Cette incertitude est le résultat des limitations associées à la technique de prédiction des éphémérides. L'erreur est généralement de quelques mètres, elle peut aller jusqu'aux dizaines de mètres.

En positionnement relatif, les techniques de différentiation entre récepteurs peuvent être considérées comme étant un moyen très efficace pour la réduction de l'effet de l'erreur orbitale.

Cette erreur se traduit sur le calcul de la ligne de base suivant la formule [\[Leick, 1990\]](#).

$$\frac{dp}{p} = \frac{db}{b} \quad (1.1)$$

Tel que: p est d représentent la distance antenne-satellite et la longueur de la ligne de base respectivement.

L'utilisation des orbites précises en post-traitement permet de pallier à ce problème. L'orbite précise est calculée à partir d'un réseau étendu de points de référence, sa précision peut atteindre les quelques centimètres [\[site1\]](#). Toutefois, l'utilisation des orbites précises n'est pas possible pour les applications en temps réel.

1.2.2 Erreur troposphérique

Le retard troposphérique causé par la réfraction du signal GPS dans la troposphère comprend deux parties la plus important du retard est due à la composant sèche de la troposphère, laquelle est stable et prévisible. Le retard résultant la vapeur d'eau est plus faible, mais vraie rapidement dans le temps.

Pour des distances courte entre la station de référence et le mobile et dès lors que la différence en altitude est plus ou moins faible, le retard troposphérique est fortement corrélé cependant, quand la séparation ou la différence de hauteur est important, les condition atmosphérique locales sont différentes et donc, la corrélation devient faible [\[leick , 1990\]](#).

pour obtenir des estimation plus précises, le contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau le long du trajet de propagation peut être mesuré avec un radiomètre à vapeur d'eau [\[Ning Lou, 2001\]](#), cependant, les instruments sont très sophistiqué et onéreux. Actuellement, les réseaux GPS sont aussi utilisés pour la prédiction du retard troposphérique relatif à la composant humide [\[Zhang, 1999\]](#).

1.2.3 Erreur ionosphérique

L'ionosphère est un milieu dispersif, constitué de particules chargées (ions) qui orbitent autour de la Terre au-delà de 60 Km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit donc traverser cette couche avant d'arriver à la station.

Le fait que cette couche ne soit pas neutre entraîne une perturbation de la vitesse de toute onde électromagnétique qui se propage en son sein. L'amplitude de cette perturbation est liée à la longueur d'onde et à la densité de particules chargées dans le milieu traversé. L'effet sur la distance peut varier de 150 mètres (à midi,

pendant les périodes de grande activité solaire, avec un satellite proche de l'horizon) jusqu'à moins de 5 mètres (la nuit, pendant une période d'activité solaire faible, avec un satellite au zénith) [\[Congyu, 1993\]](#).

Le délai de propagation ionosphérique est donné alors, par la relation:

$$d_{r,ion}^s = c\delta = \int_r^s (n_I - 1)ds \quad (1.2)$$

n_I Est l'indice de réfraction.

Ou, l'intégrale porte sur le trajet suivi par le signal. L'approximation précédente introduit une erreur inférieure 0.25%. L'approximation due à la courbure du signal est inférieure à 1% [\[Vesna Ducic, 2004\]](#).

Le caractère dispersif de l'ionosphère permet avec une combinaison adéquate des deux fréquences, d'éliminer une grande partie de ce milieu. Les coefficients de corrections transmis par les satellites ne peuvent éliminer que les 50% du retard ionosphérique aux latitudes moyennes [\[Ning Luo, 2001\]](#).

Le délai de propagation du aux fluctuations de l'indice de réfraction se traduit alors par un retard sur les mesures de pseudo-distances ou une avance sur les mesures de phase (par rapport à la distance géométrique). Pour les deux fréquences f_1 et f_2 , la correspondance entre les décalages temporels, le contenu électronique total et l'erreur sur l'estimation de la distance est donnée dans le tableau(1.1)

Fréquence (mhz)	Temps (S)	Distance (m)	TEC (e/m ²)
F ₁ = 1575.42	1*10 ⁻⁹	0.299 m	1.841*10 ¹⁶
	0.534*10 ⁻⁹	0.267 m	1*10 ¹⁶
F ₂ = 1227.60	1*10 ⁻⁹	0.300 m	1.119*10 ¹⁶
	0.894*10 ⁻⁹	0.162 m	1*10 ¹⁶

Tableau (1.1)Correspondance Temps-Distance- TEC[\[Vesna Ducic, 2004\]](#)

Les nouvelles recherches sur la prédiction du retard ionosphérique utilisant un réseau mondial ou régional de points GPS ont donné de bons résultats. L'utilisation des techniques d'interpolation ou la collocation par moindres carrés permet de corriger l'effet de cette erreur sur le positionnement [\[Raguet, 1998\]](#).

1.2.4 Multi-trajet

Le Multi-trajet se produit lorsque le signal transmis par le satellite atteint l'antenne GPS après réflexion sur la surface avoisinante. La valeur de l'erreur induit par ce phénomène dépend des propriétés du réflecteur (environnement), du type du récepteur et de l'antenne utilisés.

L'effet du Multi-trajet sur la mesure de pseudo-distance (code) est généralement beaucoup plus important que sur la phase de la porteuse. Il peut atteindre jusqu'à la moitié de la longueur du code pseudo-aléatoire (PRN). Si on suppose un environnement dans lequel contre, dans le cas de la phase ; l'erreur due au multi-trajet est toujours inférieure au quart de la longueur d'onde de la porteuse [\[Fotopoulos, 2000\]](#).

Généralement, dans le cas du positionnement statique, le Multi-trajet est de nature non-gaussienne et montre des oscillations sinusoïdales, avec une période de quelques minutes suite aux changements de la géométrie des satellites. Pour les applications cinématiques, il se comporte plus aléatoirement car le mouvement de l'antenne mobile (Rover) fait changer la géométrie d'une façon relativement.

Pour la plupart des applications de positionnement du précision : le Multi-trajet est l'une des sources d'erreur les plus importants car son effet est local et ne peut être réduit ni par différentiation ni par modélisation.

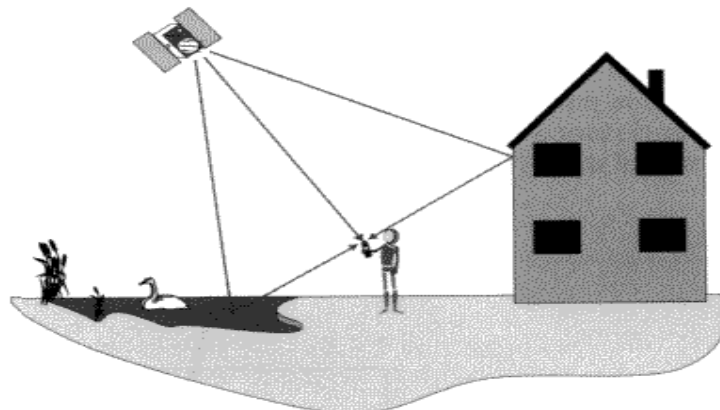


Figure (1.1):Multi-Trajet

Néanmoins, afin de réduire l'effet du Multi-trajet les précautions suivantes sont suggérées:

- Le choix d'un emplacement là où il y a un minimum d'objets réfléchissants.
- L'utilisation d'une antenne ayant une réponse faible dans la direction de l'objet réfléchissant.

le Multi-trajet peut aussi être réduit par l'utilisation des récepteurs dotés d'algorithmes puissants, tels que: Narrow-Correlator [\[Van Dierendonck et al, 1992\]](#) Multipath Estimation Technology (MET) [\[Townsend et al, 1995\]](#). Ou Multipath Mitigation Method (MMT) [\[Weil et al, 2000\]](#).

1.2.5 Bruit du récepteur

La mesure GPS est affectée par un bruit lié au récepteur lui-même, ce bruit résulte du fait qu'il est impossible d'enregistrer les différents signaux issus des différents satellites GPS avec la même précision.

Le code C/A peut être mesuré avec une précision moyenne de 1.5 m, cette précision peut varier entre 0.2 et 3 mètres, selon l'intensité du signal reçu [Varner, 2000]. Pour un récepteur standard, le bruit affectant le code You M est de 10 à 30 cm et est le même pour le code P, car les deux ont la même fréquence fondamentale.

La mesure de phase est moins bruitée que celle du code, l'erreur due au bruit est généralement de 1% de la longueur d'onde de la porteuse [Seeber, 2003]. Cette erreur peut varier entre 0.1% et 10%, selon le type du récepteur et l'intensité du signal [Varner, 2000].

Des tests ont été effectués par [Raquet, 1998] avec les récepteurs Ashtech Z-12, ils ont donné des résultats semblables : le bruit de la mesure du code (pseudo-distance) est de l'ordre du mètre, tandis que celui de la phase est millimétrique (<2mm).

1.2.6 Les erreurs d'horloge

Les horloges du récepteur et du satellite ne sont pas parfaitement synchronisées.

A. L'erreur d'horloge du satellite

L'erreur d'horloge satellite est la différence entre le temps absolu (temps GPS) et le temps du satellite dans le référentiel de l'horloge du satellite. Même si les horloges des satellites sont suffisamment stables, elles peuvent dériver avec le temps. Les paramètres de correction de ces décalages d'horloges sont fournis à différentes époques dans le message de navigation. La précision des corrections d'horloges diminuera ainsi avec le temps avant qu'un nouvel ensemble de paramètres ne soit produit. L'erreur d'horloge résiduelle après correction à partir des paramètres radiodiffusés est de l'ordre de 11 ns.

Si deux stations GPS i et K observent le même satellite j, il est possible d'éliminer l'erreur de décalage d'horloge satellite par simple différence des mesures entre les deux stations (ou double différence lorsqu'il y a deux satellites en visibilité).

B. L'erreur d'horloge du récepteur

L'erreur d'horloge du récepteur est la différence entre le temps absolu (temps GPS) et le temps du récepteur dans le référentiel de l'horloge du récepteur. La stabilité des horloges récepteur et il est nécessaire de l'estimer dans les calculs ou de l'éliminer par simple ou double différence.

1.3 Bilan d'erreurs de la mesure GPS

Source d'erreur	Valeurs absolues (m)	Remarques
Orbite	5- 10 5 cm (IGS)	Connaissance de la position du satellite
Horloge Satellite $c.dt^s$	10	Stabilité en fréquence du satellite par rapport au temps GPS, variations d'accélération
Horloge récepteur $c.dt_r$	10	Décalage d'horloge du récepteur par rapport au temps GPS
Ionosphère	02- 50	Dépend de l'angle d'élévation du satellite et de l'activité solaire
Troposphère	02- 30	Dépend surtout du contenu en vapeur d'eau de la basse atmosphère
Multi-trajet (codes) ξ Multi-trajet, p	0.2- 3	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité
Bruit récepteur (codes) (ξp)	0.1- 3	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement
Multi -trajet (phases) ξ multi-trajet, Φ	0.001- 0.03	Les signaux GPS peuvent être réfléchis par des objets situés à proximité du récepteur
Bruit récepteur (phases)($\xi\Phi$)	0.0002- 0.002	Dépend de l'électronique du récepteur et de son environnement

A.S (Sélective Availability)	5-80	Dégradation volontaire des éléments d'orbite et l'horloge dans les messages de navigation et des performances des oscillateurs S.A est supprimée depuis mai 2000.
---------------------------------	------	---

Tableau (1.2) Valeur absolue des différentes erreurs et biais influençant les mesures GPS[Ning Luo, 2001].

1.4 Relation d'observation

Pour le secteur utilisateur deux types de mesures sont généralement utilisées : les mesures de pseudo-distance (ou de code) et les mesures de phase.

L'équation d'observation de la mesure GPS de pseudo-distance s'écrit alors:

$$p_r^s = p_{r,g}^s + dp + c(dt_r + dt_s) + d_{r,ino}^s + d_{r,tro}^s + c(b_r + b_s) + \xi_p + \xi_{multi-trajet,p} \quad (1.3)$$

Avec $p_{r,g}^s$ la distance géométrique entre le satellite s et le récepteur r , d_p l'erreur de l'orbite, c la vitesse de la lumière, dt_s l'erreur d'horloge du satellite s , dt_r l'erreur d'horloge du récepteur r , $d_{r,ion}^s$ le délai ionosphérique, $d_{r,trop}^s$ le délai troposphérique b_s et b_r le biais électronique satellite et récepteur, ξ_p le bruit du récepteur et $\xi_{multi-trajet,p}$ est l'erreur due au multi-trajet.

Pour la mesure de phase, l'équation d'observation est de la forme suivante :

$$\Phi_r^s = p_{r,g}^s + dp + c(dt_r - dt_s) - d_{r,ino}^s + d_{r,tro}^s + \lambda B_r^s + \xi_\Phi + \xi_{multi-trajet,\Phi} \quad (1.4)$$

Avec λ , la longueur d'onde de la porteuse B_r^s regroupe les décalages due à l'ambiguïté entière et aux biais électronique, ξ_Φ le bruit récepteur et $\xi_{multi-trajet,\Phi}$ l'erreur dus aux trajets multiples Rigoureusement on a :

$$\lambda B_r^s = \lambda N_r^s + c(b_r + b_s) \quad (1.5)$$

N_r^s : est l'ambiguïté entière inconnue et constante pour chaque séquence continue, b_r et b_s sont les biais électroniques que l'on peut considérer comme constants sur la durée d'une séquence. Nous désignons par B_r^s l'ambiguïté réelle ; cette valeur varie donc à chaque passage du satellite au-dessus de chaque station, mais est constante sur une séquence continue de données.

Les relations (1.3) et (1.4), représentant les équations fondamentales d'observation GPS, indiquent le potentiel multidisciplinaire du GPS. Le terme

$p_{r,g}^s$ contient l'information géométrique et permet d'obtenir ainsi la position du récepteur, l'orbite du satellite l'excentrement d'antenne et ses variations. Les termes dt_r et dt_s contiennent l'information concernant les horloges du satellite et du récepteur permettant le transfert du temps sur des distances intercontinentales. Enfin, les termes $d_{r,ion}^s$ et $d_{r,tro}^s$ contiennent l'information concernant l'ionosphère et la troposphère.

1.5 Combinaisons linéaires de l'observation GPS

L'utilisation des combinaisons linéaires (simple et double) des observations de phase dans les traitements, permet d'éliminer certains systématismes (biais des horloges, ambiguïté... etc.).

Simple différence : Cette méthode est plus connue comme étant la différence des mesures de la phase (ou de code) entre une position satellite et deux stations observant simultanément le même satellite. Cette différence élimine l'effet de biais d'horloge du satellite et réduit les erreurs d'orbite et de propagation d'onde.

$$L_{Fkl}^i = L_{Fkl}^i - L_{Fl}^i \quad (1.6)$$

i : représente l'indice du satellite.

k, l : représentent les indices relatifs aux stations.

Double différence: C'est la différence de deux différences relatives à deux satellites différence à la même époque avec le même récepteur.

$$L_{Fkl}^{ij} = L_{Fkl}^i - L_{Fkl}^j \quad (1.7)$$

i, j : représentent les indices relatifs aux satellites.

K, l : représentent les indices relatifs aux stations.

Les équations qui suivent décrivent la relation de la double différence pour la mesure de phase et la mesure de code pour les deux fréquences f_1 et f_2

$$L_{1kl}^{ij} = p_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta p_{kl}^{ij} + \lambda_1 n_{1kl}^{ij} \quad (1.8)$$

$$L_{2kl}^{ij} = p_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta p_{kl}^{ij} + \lambda_2 n_{2kl}^{ij} \quad (1.9)$$

$$p_{1kl}^{ij} = p_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta p_{kl}^{ij} \quad (1.10)$$

$$p_{2kl}^{ij} = p_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta p_{kl}^{ij} \quad (1.11)$$

Des nouvelles observations GPS peuvent être produites par la combinaison des deux mesures de phase L_1 et L_2 (ou code P_1 et P_2). Celles-ci sont utilisées pour des besoins différents à savoir, le calcul du TEC (Total Electronique Content), la résolution de l'ambigüité, la détection et correction des sauts des cycles.

La combinaison linéaire des deux observations de phase L_1 et L_2 (ou code P_1 et P_2) peut être exprimée comme suit :

$$L = n_1 L_1 + n_2 L_2 \text{ (Phase)} \quad (1.12)$$

$$p = n_1 p_1 + n_2 p_2 \text{ (Code)} \quad (1.13)$$

Où n_1 et n_2 sont des nombres arbitraires.

1.5.1 La combinaison Ionosphère-Free

La combinaison linéaire est décrite comme suite :

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (1.14)$$

Cette combinaison est appelée souvent Ionosphère-Free car le délai ionosphérique est pratiquement éliminé [U. Hugentobler, et al. 2001]. De la même manière, la combinaison de la mesure du code permet d'éliminer la quasi-totalité de l'effet ionosphérique.

Prenons en considération la double différence de la mesure de phase et négligeons le retard troposphérique ΔP_{kl}^{ij} dans l'équation (1.8) et (1.9), la combinaison de Ionosphère-Free est écrite sous la forme suivante:

$$L_{3kl}^{ij} = p_{kl}^{ij} + B_{3kl}^{ij} \quad (1.15)$$

Où, le biais d'Ionosphère-Free B_{3kl}^{ij} s'écrit sous la forme suivant :

$$B_{3kl}^{ij} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 n_{1kl}^{ij} - f_2^2 \lambda_2 n_{2kl}^{ij}) \quad (1.16)$$

1.5.2 La combinaison Geometry-Free

L'équation d-observation de la combinaison linéaire Geometry-Free L_4 est écrite comme suit :

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (1.17)$$

L'équation suivante décrit la relation de la combinaison linéaire Geometry-Free L_4 :

$$L_{4kl}^{ij} = L_{1kl}^{ij} - L_{2kl}^{ij} = \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right) I_{kl}^{ij} + (\lambda_1 n_{1kl}^{ij} - \lambda_2 n_{2kl}^{ij}) \quad (1.18)$$

Dans cette combinaison ; les termes géométriques (la distance géométriques entre récepteur et satellite, l'erreur d'orbite) ainsi que l'erreur d'horloge, le délai troposphérique sont éliminés. Il reste seulement les termes relatifs aux délais et à l'ambigüité.

Cette combinaison est utilisée pour la détermination des modèles ionosphériques [\[U. Hugentobler, S. Sacher, P. Fridez .2001\]](#).

De la même manière, on peut déduire l'équation de la combinaison linéaire Geometry-Free par la mesure de code ; on utilise les équations (1.10) et (1.11).

1.5.3 La combinaison Wide-Lane

La combinaison linéaire Wide-Lane est décrite de la manière suivante :

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (1.19)$$

Cette combinaison est utilisée pour la détection des sauts cycle et la résolution de l'ambigüité [\[Yongin Moon. 2004\]](#). On utilise les équations (1. 8) et (1.9)

et en négligeant la réfraction ionosphérique I_{kl}^{ij} et la réfraction troposphérique Δp_{kl}^{ij} on obtiendra :

$$L_{5kl}^{ij} = p_{kl}^{ij} + \frac{c}{f_1 - f_2} (n_{1kl}^{ij} - n_{2kl}^{ij}) \quad (1.20)$$

$\lambda_5 = \frac{c}{f_{L1} - f_{L2}} = 0.862m$: Longueur d'onde de wide-Lane.

$n_{5kl}^{ij} = n_{1kl}^{ij} - n_{2kl}^{ij}$: est appelé ambigüité de wide-Lane.

L'inconvénient de la combinaison wide-Lane réside dans l'amplification du bruit de mesure par un facteur de six par rapport à l'utilisation de la phase originale L_1 et L_2 [\[Yongin Moon. 2004\]](#).

1.5.4 Récapitulatif des combinaisons linéaires

LC	Description	Longueur l'onde en (cm)	Bruit % L_1	Ionosphère % L_1
L_1	Phase de base	19	1.0	1.0
L_2	Phase de base	24	1.0	1.6
L_3	Ionosphere-Free Lc	0	3.0	0.0
L_4	Geometry-Free Lc	∞	1.4	0.6
L_5	Wide-Lane Lc	86	5.7	1.3

Tableau (1. 3) Comparaison entre les combinaisons linéaires (Lc) et (L_1) observées

[\[U. Hugentobler, S. Sacher, P. Fridez. 2001\]](#).

Chapitre 2

Ionosphère et les modèles ionosphériques

2.1 Historique

Depuis 1861 à 1931 les savants mettent leurs hypothèses et des théories afin de démontrer l'existence de couche ionosphérique.

1861: [Stewart, 1861] lié les observations de Magnétographes anormales à l'observatoire de Kew pour la période Août-Septembre 1859, les grandes taches solaires observées dans le même temps par Carrington. Ceci est la première étude sur l'impact de l'activité solaire sur la magnétosphère de la terre. Cet événement, appelé l'événement Carrington, est à l'origine de la recherche de la météo spatiale.

1889: [Schuster, 1889] avancé l'hypothèse qu'une région conductrice doit exister dans la haute atmosphère pour expliquer les variations diurnes du champ géomagnétique.

1902: Heaviside et Kennelly expliqué la propagation des ondes radio sur de longues distances par la présence d'une enveloppe réfléchissante dans la haute atmosphère.

1925: L'existence de régions ionisées dans la haute atmosphère a été prouvée par Appelton. Il a utilisé le temps de Voyage d'un signal radio de la BBC pour estimer l'altitude inférieure ($\sim 100\text{km}$) de la coque Appelton.

1926: [Breit et Tuve 1926] ont utilisé une impulsion électromagnétique de prouver l'existence d'échos de la région de la haute atmosphère. La hauteur effective de la couche est comprise entre 80 et 210km.

1929: Watson-Watt a introduit l'ionosphère terme pour définir l'enveloppe ionisé autour de la Terre pour remplacer terme couche Appelton.

1931: Chapman élabore sa théorie sur l'ionisation des couches par action solaire UV. [\[Site2\]](#)

2.2 Généralités sur 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'elles 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, un photon ionisant, le radical ionisée et 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..).[\[Victor. H\(2007\)\]](#)

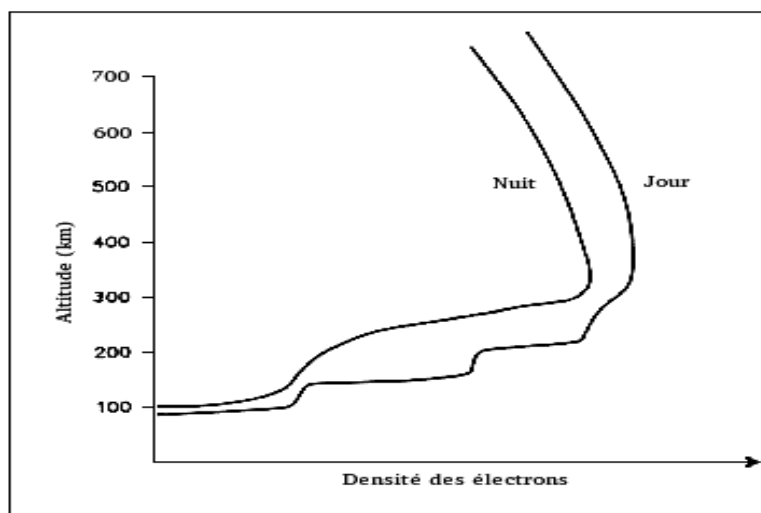


Figure (2.1): Distribution typique des électrons

2.3 Structure de l'ionosphère

2.3.1 La région D

La couche D est la partie la plus basse de l'ionosphère et il est fait référence à la région entre approximativement 75 et 95 km au-dessus du Monde. Cette couche est affectée à l'origine par radiation solaire et la densité de l'électron libre est plus grande peu après midi et est extrêmement petit le soir ou même disparaît le soir . a Comparé aux autres couches, la couche D est la couche la plus complexe d'un point de vue chimique à cause de son haut pression relatif et plusieurs sources différentes qui contribuent à ionisation, y compris Lyman - une radiation, radiation EUV, Radiographie, rayon cosmique galactique et particules 24 énergiques . La couche D est la place majeure où l'absorption de la radio a lieu et l'absorption dans les mois hivernaux dépasserait l'été un par un facteur de deux ou trois, connu comme anomalie hivernale d'absorption de la radio de l'ionosphérique.[\[Zhizhao Liu 2004\]](#)

2.3.2 La région E

Cette couche se situe au-dessus de la région D, entre 90 km et 120 km d'altitude, avec une densité électronique d'environ $10^{11} e^{-} m^{-3}$. Les principaux composants en sont N_2O_2 et O . Les ions les plus présents sont NO^+ (formés par échange de charge entre N et O^+) et O_2^+ . Cette région constitue une zone d'équilibre entre la production d'électrons par ionisation et leur perte par recombinaison dissociative, mécanisme de pertes prépondérant dans cette région (Biondi, 1964). La région E s'affaiblit et disparaît presque la nuit à cause de l'efficacité de cette recombinaison, à part dans les régions de haute latitude, lieux de précipitations de particules ionisantes.

L'une des caractéristiques majeures de la couche E est due au comportement différent des ions non magnétisés et des électrons, magnétisés à partir de 90 km d'altitude, contraints à dériver le long des lignes de force du champ magnétique terrestre dans un mouvement hélicoïdal. Ce comportement différentiel des électrons et des ions se traduit par la circulation de courants électriques. L'électrodynamique de cette région est intense et dépend fortement de la latitude à cause de la topologie du champ magnétique terrestre, quasiment horizontal à l'équateur et vertical à haute latitude, et dans une moindre mesure, de l'inclinaison du rayonnement solaire qui influe sur la conductivité ionosphérique. A haute latitude notamment, la circulation de courants horizontaux permet la fermeture de systèmes de courants magnétosphériques, ce qui facilite les échanges avec des régions plus éloignées de la Terre. [\[Xavier, V\(2002\)\]](#)

2.3.3 La région F

La couche F est la partie supérieure de l'ionosphère et son altitude varie de 150 km à 500 km (Kelley, 1989). La F-Région est formée principalement par radiation solaire d'approximativement 20-90 nm longueur d'onde (Kasha, 1969). La couche F est divisée habituellement plus loin en F1 et sous couche F2. Comparé à F1 sous couche et D et E pose en couches, F2 obtiennent une avance la couche est le de la plupart de la recherche intéressez pour propagation de la radio à cause de sa plus grande concentration d'électrons (Hargreaves, 1992). la couche F2 est aussi la partie dans ionosphère qui est le plus variable, anormal et difficile prédire (Hargreaves, 1992). Parce que la région F2 a le plus grande concentration de l'électron dans l'ionosphère, le modèle de l'ionosphérique de la couche seul basé habituellement sur les données GPS sélectionne une altitude qui varie de 250 à 400 km au-dessus du Monde comme la hauteur de la coquille seule à qui l'ionosphérique oblique que les dimensions TEC sont dressées une carte à la direction du zénith. [\[Zhizhao Liu 2004\]](#)

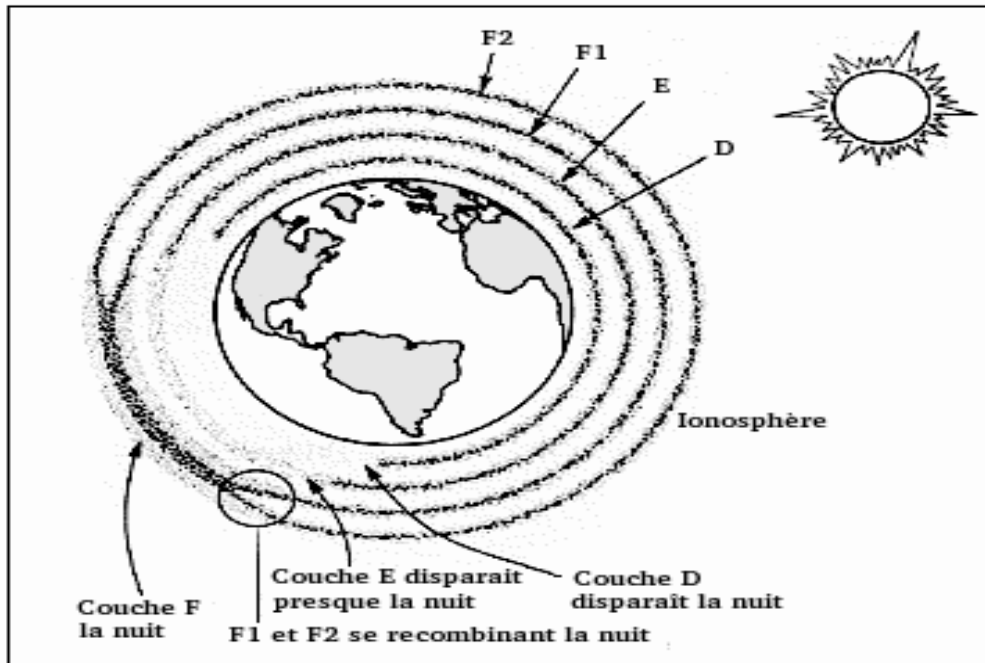


Figure (2.2) : Vue simplifiée des couches de d'ionosphère sur une période de 24 heures

2.4 Délai ionosphérique

Dans cette paragraphe nous expliquons le but de notre étude est comme suite :

La traversée de l'ionosphère modifie légèrement le temps de propagation et est donc une source d'erreur. L'ionisation des molécules étant essentiellement due au soleil, il en résulte une variation diurne des propriétés de ce milieu. Ainsi, pour un satellite au zénith, la variation de distance apparente est de l'ordre de 1 m la nuit et de 10 à 15 m l'après midi. Pour palier cette difficulté, on corrige par le calcul, le temps mesuré, de différentes façons : Pour les récepteurs qui n'utilisent que la bande L1, (GPS de base, non différentiel) on modélise le retard apporté par l'ionosphère. Cependant, on ne sait corriger à l'aide du modèle que des valeurs moyennes et compte tenu des fluctuations des caractéristiques de l'ionosphère, l'erreur résiduelle après correction peut atteindre 25% de l'erreur totale. Pour les GPS différentiel qui utilise 2 fréquences, on tient compte du fait que l'erreur de mesure du temps de parcourt de l'onde est de la forme a/f^2 (f est la fréquence du signal) Si l'on utilise deux fréquences simultanément, on connaît la différence des temps de parcourt que l'on attribue à la traversée de l'ionosphère, et on sait donc retrouver la constante « a » et par conséquent corriger les temps de parcourt du signal en provenance du satellite. [\[Gérard. \(2007\)\]](#)

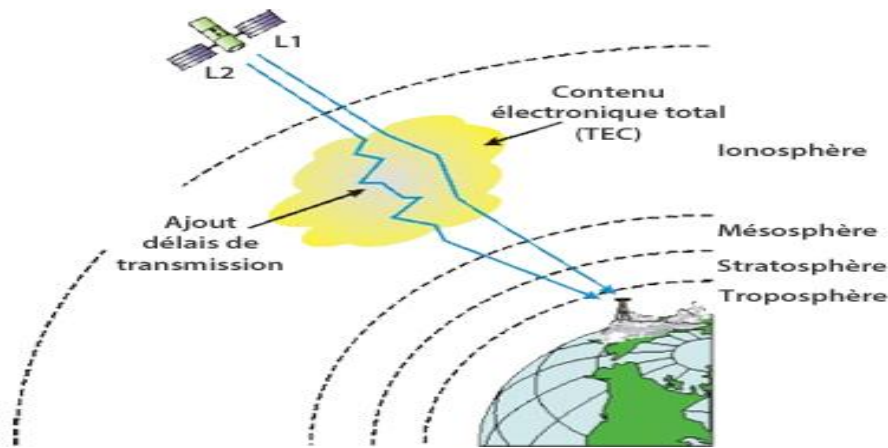


Figure (2.3) erreur ionosphérique

« **TEC** » (**T**otal **E**lectron **C**ontent) : Le TEC dépend de l'heure, du jour de l'année, de l'activité solaire ainsi que de la latitude. En moyenne ce délai correspond à une erreur de 5 à 15 m sur le pseudo range, cependant en cas de forte activité solaire et pour des satellites peut élevé sur l'horizon l'erreur peut atteindre jusqu'à 150m. [\[site3\]](#)

2.5 Modélisation de la propagation des signaux GPS

2.5.1 Indice de réfraction ionosphérique

L'influence de l'ionosphère sur signaux de la radio avec les fréquences >100 MHz a été étudié en détail par plusieurs auteurs, nous résumons les résultats pertinents l'indice de réfraction que n décrit à la propagation d'une onde de l'électromagnétique dans un milieu spécifique comme qu'il est défini

Avec
$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

c : vitesse de la lumière (dans la vide)

v : vitesse de l'onde électromagnétique dans le milieu

Pour observation GPS un fait supplémentaire doit être pris en considération les porteurs du signal sont propagation avec la vitesse de phase V_p alors que le code propage avec la vitesse de groupe V_G nous devons distinguer par conséquent aussi entre un indice de réfraction de la phase n_p et un indice de réfraction du group n_G

Deux régions atmosphériques différentes doivent être distingué l'atmosphère le bas (troposphère) avec un indice de réfraction et l'atmosphère partie supérieure

(magnétosphère de l'ionosphère) avec un indice de réfraction dans l'ionosphère l'indice de réfraction n est dépendante de la fréquence de la propagation est aussi appelé milieu dispersif.

L'indice de réfraction de l'ionosphère n_p peut être écrit comme (Braunner et Gu , 1991)

$$n_p^2 = \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y^2 \sin^2 v \pm \sqrt{Y^4 \sin^4 v + 4Y^2 \cos^2 v (1-X)^2}} \quad (2.5)$$

$$X = f_p / f \quad ; \quad Y = f_H / f$$

$$f_p \text{ Fréquence de plasma ; } f_p = \sqrt{\frac{eN_e}{4\pi^2 \varepsilon_0 m_e}}$$

$$f_H \text{ Gyrofréquence ; } f_H = \frac{\mu_0 e H_0}{2\pi m_0}$$

f Fréquence d'onde électromagnétique

e La charge électronique

N_e Densité électronique

ε_0 Permittivité dans le vide

m_e Masse d'électron

H_0 Amplitude de champ électromagnétique

μ_0 Perméabilité dans le vide

v Angle entre champ géomagnétique vecteur H et la direction de propagation d'onde électronique.

L'indice de réfraction ionosphérique n_p dépend principalement de la densité d'électrons libres à la direction de propagation des ondes par rapport au champ géomantique et la force du champ géomantique.

En supposant que la transmission fréquences l'approximation suivante peut être faite :

$$n_p^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2 \pm f \cdot f_H |\cos v|} \quad (2.6)$$

Avec

f_p Fréquence de plasma

f_H Gyrofréquence

f Fréquence d'onde électromagnétique

ν Angle entre champ géomagnétique vecteur H et la direction de propagation d'onde électronique

le signe différent ($\pm$) dans l'équation (2.6) sont dus au fait que la ionosphère est un milieu biréfringent l'onde électromagnétique est découpé en deux propagation différents modes un mode main-gauche en mode polarisé circulairement (+ signe) et un mode de main-droite (- signe).

Pour $f > 100$ MHz il est permis de négliger le terme ($f_H |\cos \nu|$) car il a toujours $f_H < 1,4$ MHz (Hartmann et Leitingner, 1984) et parce que la plupart des applications pratiques à l'emplacement du récepteur d'aucune information sur la polarisation des ondes électromagnétiques est disponible en tout cas par conséquent eq () peut être écrit négliger des termes d'ordre $\frac{f_p^4}{f^4}$ comme

$$n_p = 1 - \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f^2} \quad (2.7)$$

Et évaluer l'expression pour le plasma une fréquence nous obtenons

$$n_p = 1 - \frac{40,3}{f^2} N_e \quad (2.8)$$

Prendre en considération les différents indices réfraction pour phase et code observation GPS nous pouvons résumer

$$n_p = 1 - \frac{40,3}{f^2} N_e \quad (2.9)$$

$$n_G = 1 + \frac{40,3}{f^2} N_e \quad (2.10)$$

Avec

n_p : Indice de réfraction pour observation de phase

n_G : Indice de réfraction pour observation de code

N_e : Densité d'électron

f : Signal de fréquence

La gamme réelle S entre récepteur R et satellite que s'est donné par l'intégrale sur chemin de R à S

$$s = \int_R^S n_p ds \quad (2.11)$$

Avec ds:(l'infinitésimale ligne élément) nous obtenons par conséquent les ionosphériques distance la correction pour observation GPS (spilker ,1978)

$$\Delta d_i^{ino} = \frac{\pm a TEC}{f_i^2} \quad i = 1, 2 \quad (2.12)$$

Avec

Δd_i^{ino} : Correction de distance ionosphérique pour fréquence i

f_i : Fréquence phases de GPS $i = 1, 2$

TEC : Total Electron Content (contenu électronique total) $1TEC = 10^{16} e^- / m^2$

+

 : signe pour observation de code

-

 : signe pour observation de phase

a : Constante ($a = 40.3 S^{-2} m^3$) [[Achtundvierzigster. B\(1994\)](#)]

2.6 Modélisation de l'ionosphère

Il est possible de modéliser le retard ionosphérique par des modèles expérimentaux ou théoriques. Les modèles théoriques sont basées sur des principes physiques, mais comme les variations de l'ionosphère peuvent être assez imprévisibles, ils ne sont pas assez précis. Les modèles empiriques sont basés sur les observations GPS. Ils sont plus précis mais il faut que les observations soient accessibles et la prédiction est moins précise. Les modèles de l'ionosphère fournissent les valeurs de TEC dans le temps et l'espace. Dans ce qui suit nous allons présenter quelques-uns de ces modèles. [[Jamal. A\(2005\)](#)]

2.7 Les modèles ionosphériques :

2.7.1 Klobuchar

Modèle ionosphérique Klobuchar est adopté par simple fréquence pour corriger le retard ionosphérique de la porteuse L1, développé vers le milieu des années 70 par J.A. Klobuchar. Il est défini comme une seule couche modèle ionosphérique (SLM - Couche modèle unique), parce que l'ionosphère (i.e son TEC) est censé concentré dans une couche infinitésimale placée à une moyenne altitude de 350 km fixé par la surface de la Terre. [\[A. Angrisano et al\]](#)

2.7.2 GISM (Global Ionospheric Scintillation Model)

Présentation Générale

Le Modèle Global de Scintillations Ionosphériques (GISM) permet d'obtenir à la fois les biais et les scintillations dues à la propagation à travers l'ionosphère. Ce modèle a été accepté par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT).

Les fluctuations d'intensité et de phase des signaux transmis à travers l'ionosphère résultant de la propagation à travers les inhomogénéités du milieu. Ceci apparaît plus généralement pendant les équinoxes, après le coucher du soleil et pendant une durée pouvant atteindre quelques heures. Ces fluctuations sont plus intenses en période de forte activité solaire. Il en résulte des dégradations du signal pour des fréquences allant de la VHF à la bande Ces fluctuations peuvent affecter les systèmes de navigation, les communications et les systèmes d'observation de la terre. Deux régions du globe terrestre sont plus particulièrement concernées : les régions équatoriales (entre -20° et $+20^\circ$ de latitude magnétique) et les régions polaires (au-delà de 60° de latitude magnétique). Toutefois les scintillations sont beaucoup plus intenses aux régions équatoriales et les caractéristiques entre ces deux régions sont notablement différentes. [\[site4\]](#)

2.7.3 IRI (Ionosphère référence internationale)

Description

L'ionosphère internationale de référence (IRI) est un projet international parrainé par le Comité de la recherche spatiale (COSPAR) et l'Union internationale des sciences de la radio (URSI). Ces organisations ont formé un groupe de travail (liste des membres) dans les années soixante pour produire un modèle standard empirique de l'ionosphère, sur la base de toutes les sources de données disponibles (charter). Plusieurs éditions constante amélioration du modèle ont été libérées. Pour étant donné l'emplacement, l'heure et la date, IRI fournit des moyennes mensuelles de la densité électronique, la température électronique, température ionique, et la composition ionique dans la gamme

d'altitude de 50 km à 2000 km. En outre les paramètres donnés par l'IRI comprennent la teneur totale Electron (TEC; un utilisateur peut sélectionner le départ et la hauteur de fin de l'intégrale), la probabilité d'occurrence de propagation-F et aussi le F1-région, et la dérive d'ions verticale équatoriale.

[\[nasa.gov\(2012\)\]](#)

2.7.4 Modèle TIE-GCM

Le TIE-GCM (Thermosphère-Ionosphère-Electrodynamique General Circulation Model) est un modèle tridimensionnel de circulation générale, qui prend en compte l'ensemble des processus énergétiques, chimiques, dynamiques et électrodynamiques de l'ionosphère entre 97km et 500km environ. Il résout les équations qui régissent ces processus (Dickinson et al. 1984; Roble et al. 1988 et Richmond et al. 1992). Ce modèle permet alors de déterminer, entre autres paramètres, les compositions, densités, températures et vitesses des ions et particules neutres Il est surtout capable de calculer à l'échelle globale les champs électriques et courants ionosphériques. [\[Thi Thu Hong PHAM\(2012\)\]](#)

2.7.5 Ne Quick

Le modèle ionosphérique Ne Quick développé par le Laboratoire d'Aéronomie et Radio propagation (ARPL) du Centre international Abdus Salam pour la physique théorique de Trieste (Italie) et l'Institut de géophysique, astrophysique et Météorologie de l'Université de Graz (Autriche) permet de calculer la TEC et électrons profil de densité pour tout chemin arbitraire (Nava 2006). Le modèle est Ne Quick basé sur le modèle très-dite DGR introduit par Di Giovanni et Radicella (1990). Le modèle DGR origine utilise une somme de couches Epstein pour construire analytiquement la distribution de densité d'électrons au sein de l'ionosphère. [\[Mahdi. M.et al\(2013\)\]](#)

Chapitre 3

Méthode et Analyse des Résultats

3.1 Introduction

La réfraction ionosphérique reste une source d'erreur majeure dans le positionnement du GPS, en particulier pour des applications en temps réel.

Cet effet est généralement réduite par formant une seule différence entre des observations de phase ou code collectés par un au moins 2 récepteurs GPS. Le résidu de l'erreur ionosphérique restant dans une seule différence dépend par deux paramètres: Contenu Total Electron (TEC) et ses gradients. Le contenu total d'électron est très variable dans l'espace et le temps: il est en fonction de latitude géomagnétique, heure locale, saison, ... En particulier, plusieurs études ont démontré que le TEC dépend fortement de l'activité solaire Le maximum du cycle de l'activité solaire de 11 ans sera atteint en 2000 ou 2001. Pendant cette période de forte activité solaire, l'ionosphère aura une forte influence sur le positionnement GPS. Le GPS a déjà prouvé être un outil très utile pour étudier l'ionosphère. En effet, le code de GPS et des mesures des phases peuvent être traitées afin de déterminer le Contenu Totale Electron. [\[René Warnant and Eric Pottiaux.\(1999\)\]](#)

3.2 Présentation de la zone d'étude

Il y a plusieurs stations IGS (International GPS Service), dans ce projet de fin d'étude on a choisi la station Cagliari qui est installée le 07avril 1995.

Station	Location	Plaque tectonique	Type de récepteur Type de l'antenne	Hauteur de l'antenne
Cagliari	Cagliari Italie	plaque eurasienne	TRIMBLE 4000SSI TRM29659.00	0.045

Tableau (3.1) : Informations sur la localisation et type de récepteur, antenne et hauteur de l'antenne[\[site5\]](#)



Figure (3.1) : Station Cagliari



Figure (3.2) : GPS Trimble

3.3 Matériel et méthodes

3.3.1 Collecte les données

Dans ce travail nous la détermination le TEC à partir des mesures GPS nous avons utilisé les données sont été enregistrées au cours du période 01-31 Mars 2013, à la station de Cagliari (lat. 39°.1359' N ; long 8°.9728' E) il est équipé avec récepteur GPS Bi-fréquences, les données GPS a été enregistré avec une cadence de 30s d'échantillonnage. Les deux bi-fréquences phase et code ont été utilisées pour calculer le TEC ionosphérique.

Les fichiers journaliers nécessaires à la détermination du TEC sont: (1) les fichiers **d'Observation**, (2) les fichiers de **Navigation**. Sont des fichiers de mesures stockées au format RINEX, sont disponible en <http://www.epncb.oma.be/newseventslinks/anonymou ftp.php,ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/product/>

Les fichiers d'observation sont donnés sous la forme suivante CAGL0600.13D.Z ce fichier est compressé cependant on doit le décompresser pour la première fois à l'aide du logiciel winrar puis on utilise l'application CRX2RNX.exe sous DOS pour obtenir les fichiers sous la forme CAGL0600.13o. Egalement on a décompressé les fichiers (exemple IGS17300.SP3.Z) des semaines de GPS (éphémérides précise) a partir de semaine numéro 1729 jusqu'à 1734 par l'intermédiaire de winrar.

(3) **DCB** (Différentiel Code Bias) représentes biais des satellites, Ce sont des biais contenus dans les éphémérides et on les définis comme étant le défaut de synchronisation entre la première et la deuxième fréquence.

3.3.2 Le processus d'extraction des données

Nous avons extrait les donnée a partir des fichiers RINEX; On utilisée la langage de programmation MATLAB, Le programme va analyser et d'extraire les informations nécessaires dans le calcul du TEC à partir du fichier RINEX observation et la navigation. Les résultats seront représentées dans des graphes de TEC(TECU) et gradient TECU /min.

3.4 Délai différentiel de détermination de TEC

Les signaux GPS qui traversent l'ionosphère arriveront un peu plus tard que ceux qui se déplacent dans le vide. En mesurant le retard du trajet du groupe (code) à savoir $L_1 = f_1 = 1.57542$ GHz et $L_2 = f_2 = 1.2276$ GHz, le TEC au long du trajet entre le satellite et le récepteur Slant TEC (STEC), peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$STEC = \int_0^s N dr = \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \frac{2 f_1^2}{K} \Delta P_{1,2} \quad (3.1)$$

$$= 9.509E16. \Delta P_{1,2} = 2.852E25. \delta \Delta t \quad (3.2)$$

Où $\delta\Delta t$ délai différentiel de temps en second, $\Delta P = P_1 - P_2$ est le déference de code en mètres.

Par conséquent, une différence du délai d'une nanoseconde nous annonce qu'il ya $2.852 \times 10^{16} e/m^2 = 2.852 \text{ TECU}$ au long de la trajectoire du signal. [\[E.Yizengaw et E. A. Essex.\(1999\)\]](#)

3.5 Les paramètres de l'étude

3.5.1 Slant TEC

Le Slant TEC (TECs) est une mesure du contenu électron totale de l'ionosphère au long du trajet des rayons entre le satellite et le récepteur, il peut être calculé avec usée de mesures de code comme l'équation dans (3.1) Slant TEC est une quantité dépend sur de trajectoire qui traverse l'ionosphère au récepteur GPS, l'utilisateur peut facilement obtenir à la fois le TEC absolue et variation de TEC.

3.5.2 Vertical TEC

VTEC verticale (VTEC) est le principal intérêt dans la recherche de l'ionosphère est obtenu par la projection du STEC avec l'utilisation de la fonction de projection; comme il montrera l'équation (3.3) qui base sur l'angle zénithal à l'ionosphérique Pierce Point (IPP)¹.

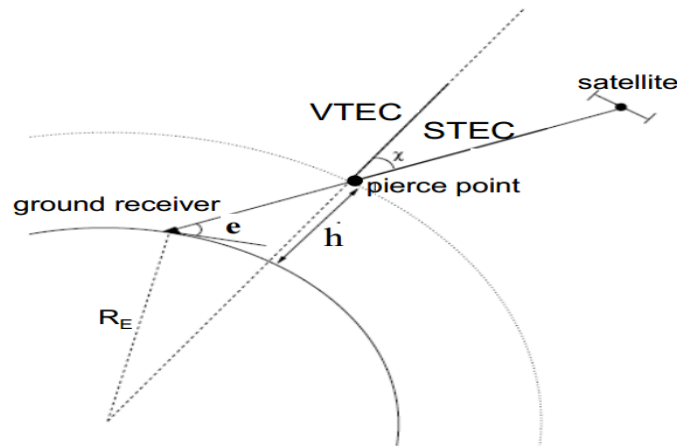


Figure (3.3) : Géométrie pour la conversion de Slant TEC vers verticale TEC

¹ Pierce point : est le point d'intersection entre le satellite- récepteur line-of-sight, et la couche mince ionosphère

3.5.3 Fonctions de projection

Mesure de TEC est basée sur l'hypothèse que l'ionosphère est une couche mince sphérique à hauteur fixé donnée par le centre de masse du profil de l'ionosphère à 400 km au-dessus de la surface de la terre, le VTEC est obtenu par converti le STEC comme suit:

$$TEC = SLANT\ TEC \times COS\chi_m \quad (3.3)$$

Où χ_m est l'angle d'incidence à 400 km d'altitude d'un rayon de GPS du satellite au récepteur du sol, $COS\chi_m$ facteur de l'obliquité, est défini :

$$\cos \chi_m = \sqrt{1 - \frac{h_{sp} \cos \varepsilon}{h_{sp} + R_E}} \quad (3.4)$$

Où R_E est le rayon de la Terre, ε est l'angle d'élévation, h_{sp} est la hauteur de point de l'ionosphère, ce qui est généralement supposé être de 400 km. [\[E. Yizengaw et E. A. Essex.\(1999\)\]](#)

3.5.4 La détection des irrégularités dans le Contenu Total Electron

La combinaison du geometry-Free permet également l'observation de la variation temporelle de TEC :

$$\Delta TEC_A^i(t_k) = 1.812 \frac{(\varphi_{A,GF}^i(t_k) - \varphi_{A,GF}^i(t_{k-1}))}{(t_k - t_{k-1})} \quad (3.5)$$

Où

t_{k-1}, t_k sont 2 Mesures consécutives des époques

$\Delta TEC_A^i(t_k)$ Mesurée en TECU / min, est défini comme :

$$\Delta TEC_A^i(t_k) = \frac{(TEC_{A,GF}^i(t_k) - TEC_{A,GF}^i(t_{k-1}))}{(t_k - t_{k-1})} \quad (3.6)$$

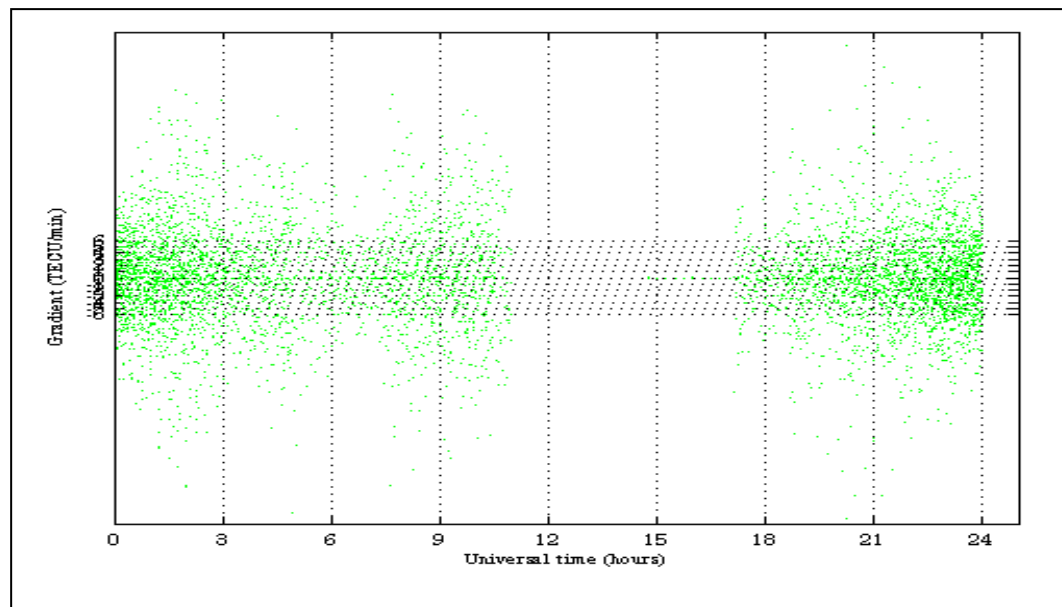
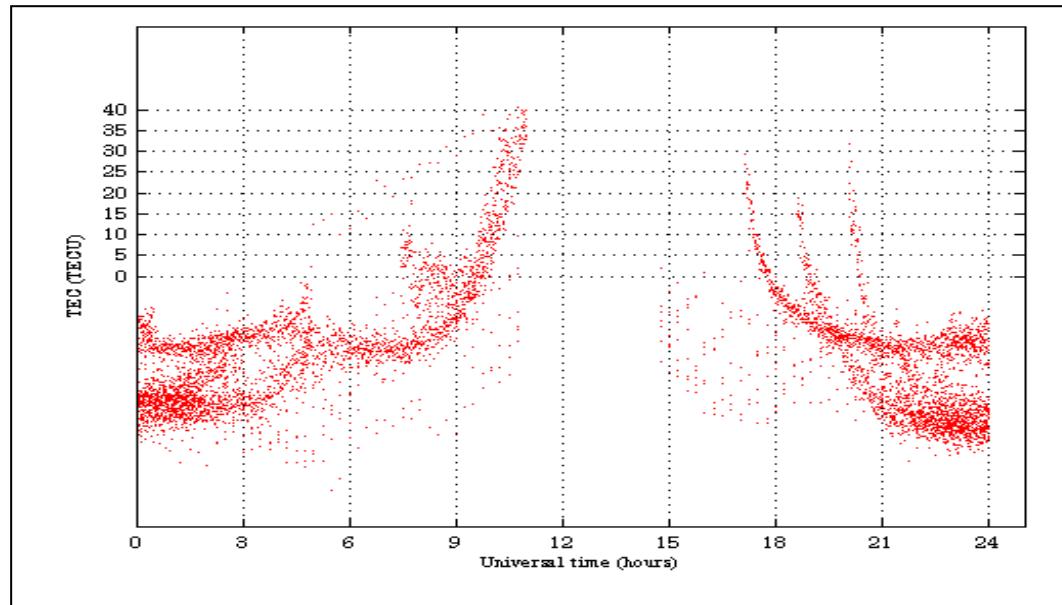
Il est important de souligner que le calcul de $\Delta TEC_A^i(t_k)$ ne nécessite pas la

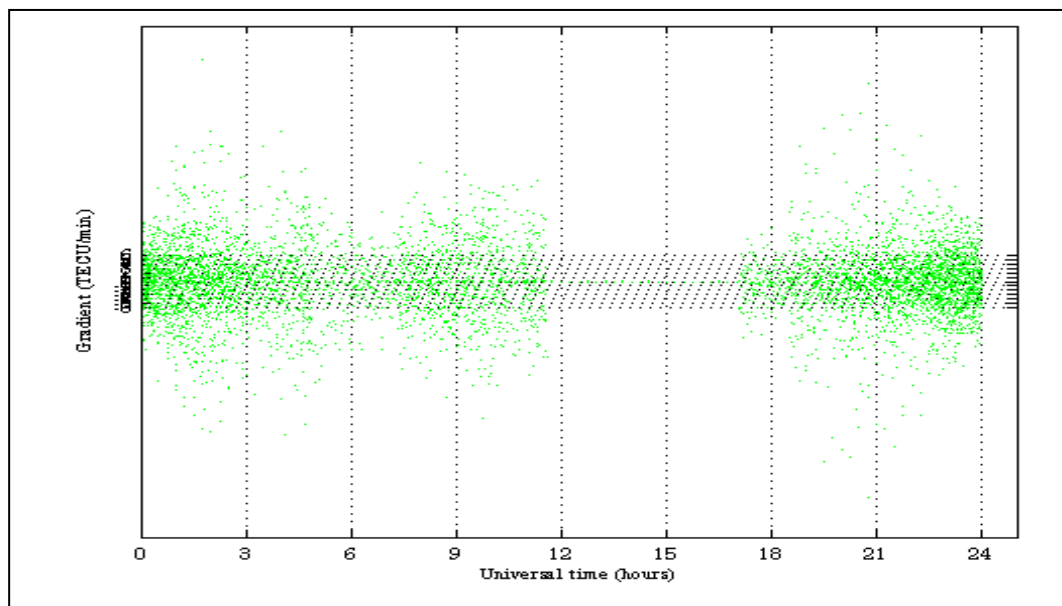
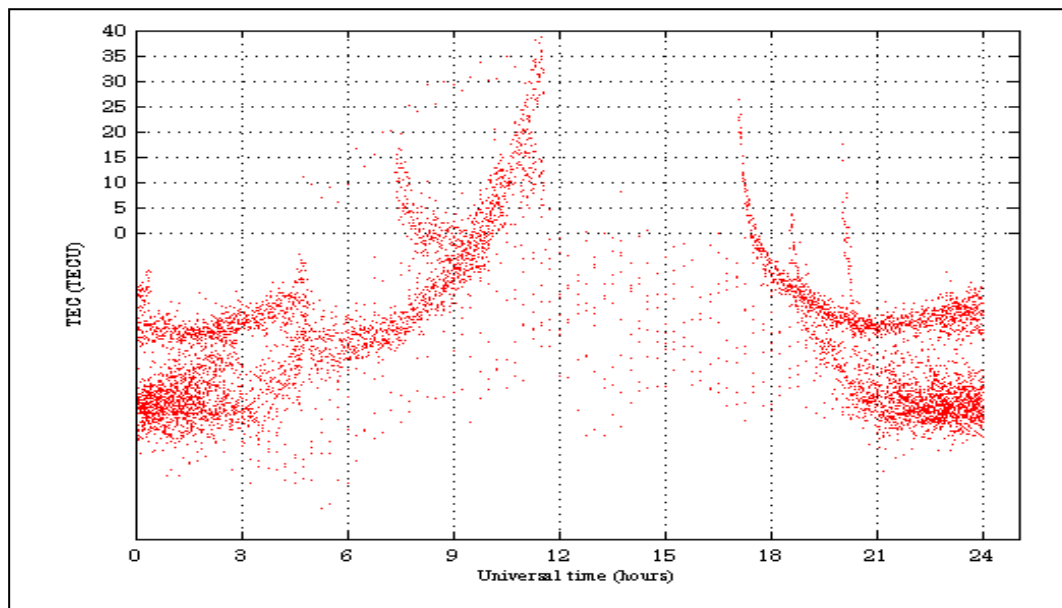
Estimation de l'ambiguïté réelle $N_{A,GF}^i$. [\[R. Warnant, G. Wautelet, ets, \(2008\)\]](#)

3.6 Résultats et analyse

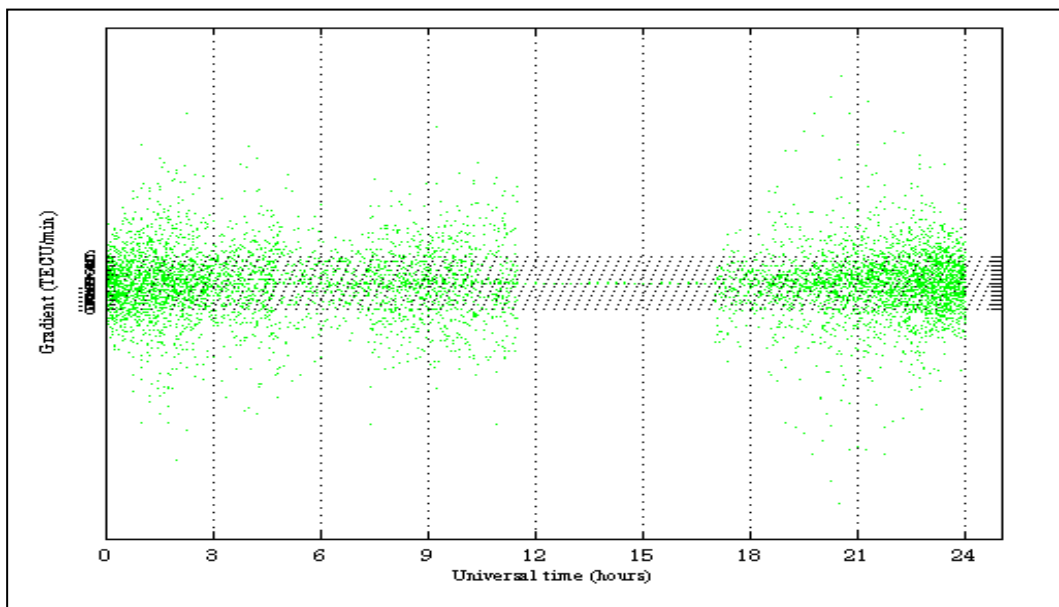
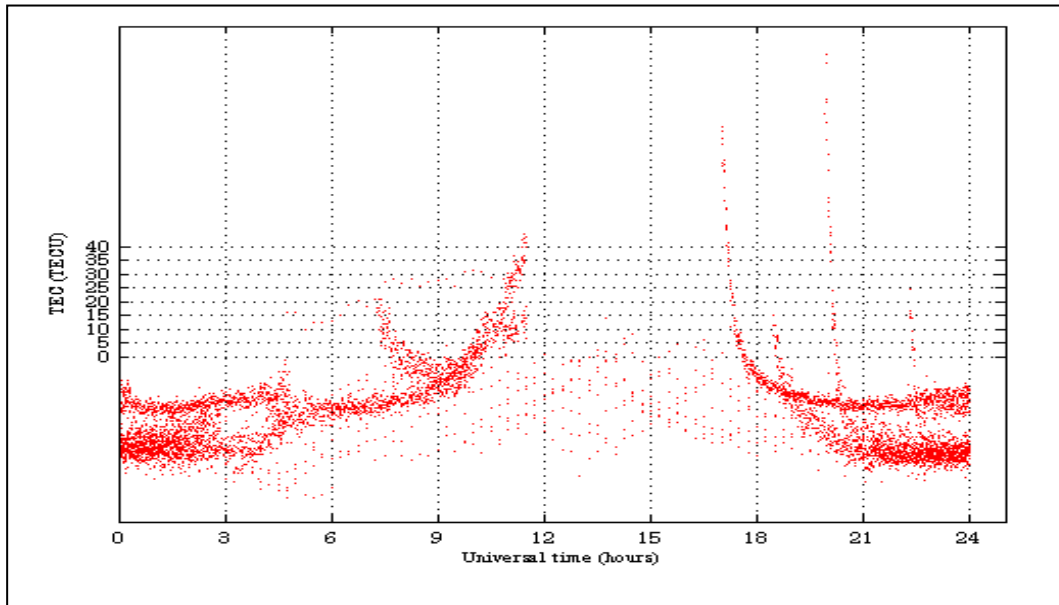
Les figures suivantes montrent le résultat de calcule des valeurs de TEC de 31 jour qui est déterminée avec l'intégration de la fonction de projection, à partir du le 1^{er}jour 01- Mars2013.

01/03/2013



02/03/2013

03/03/2013



04/03/2013

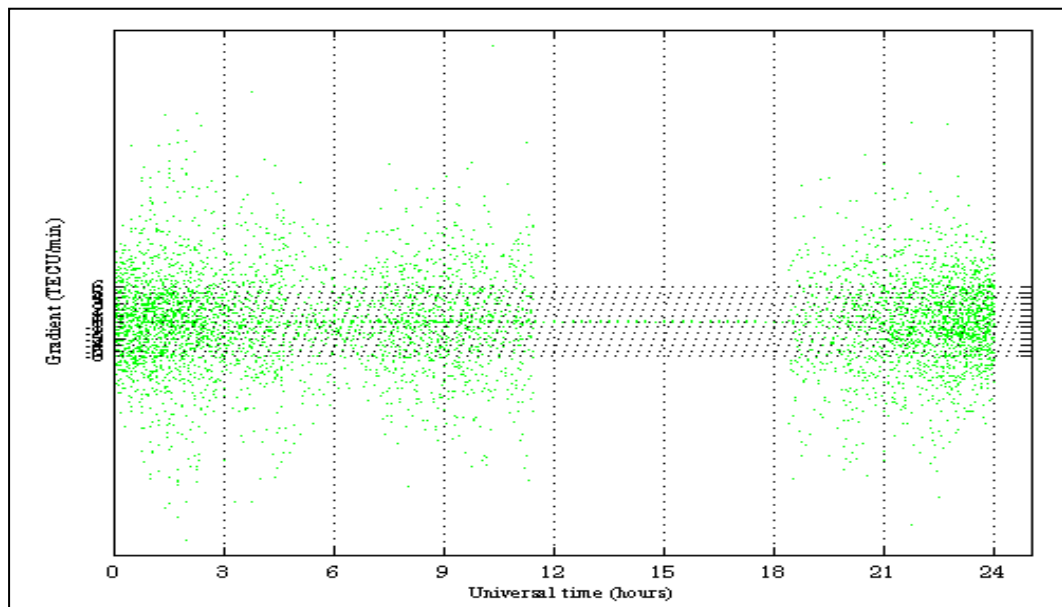
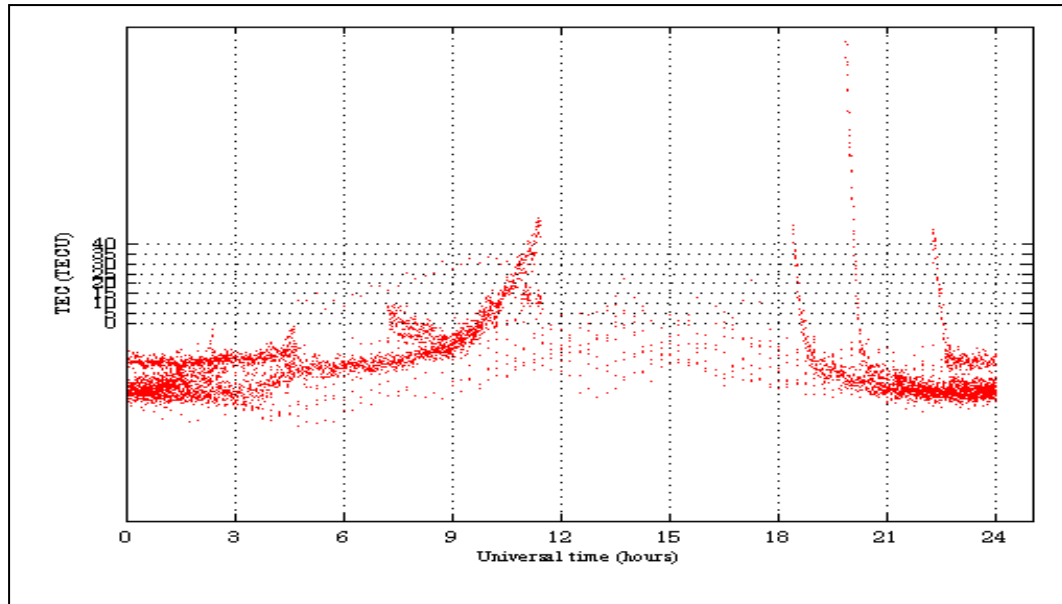
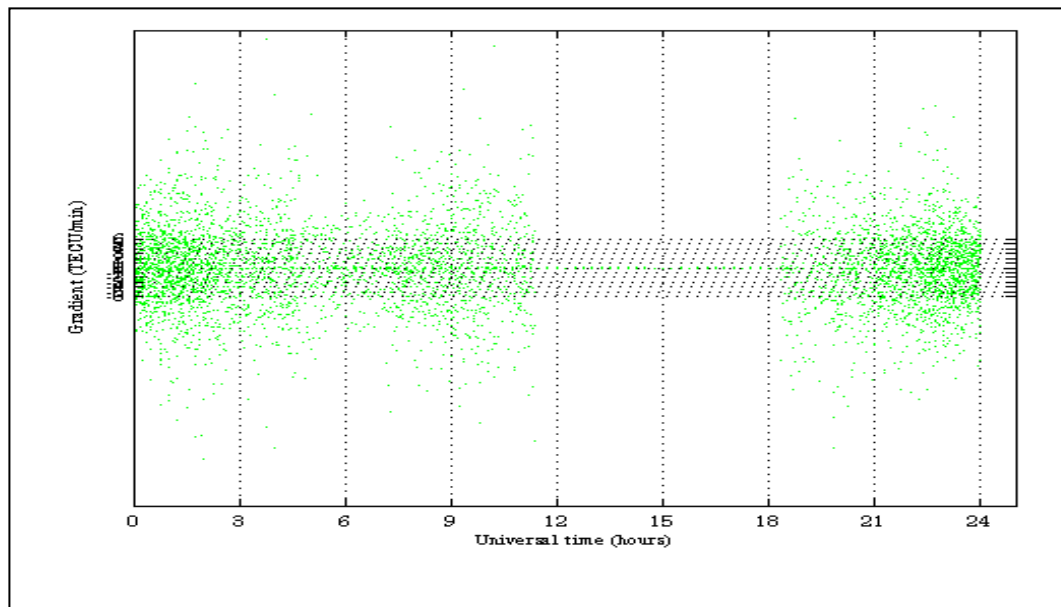
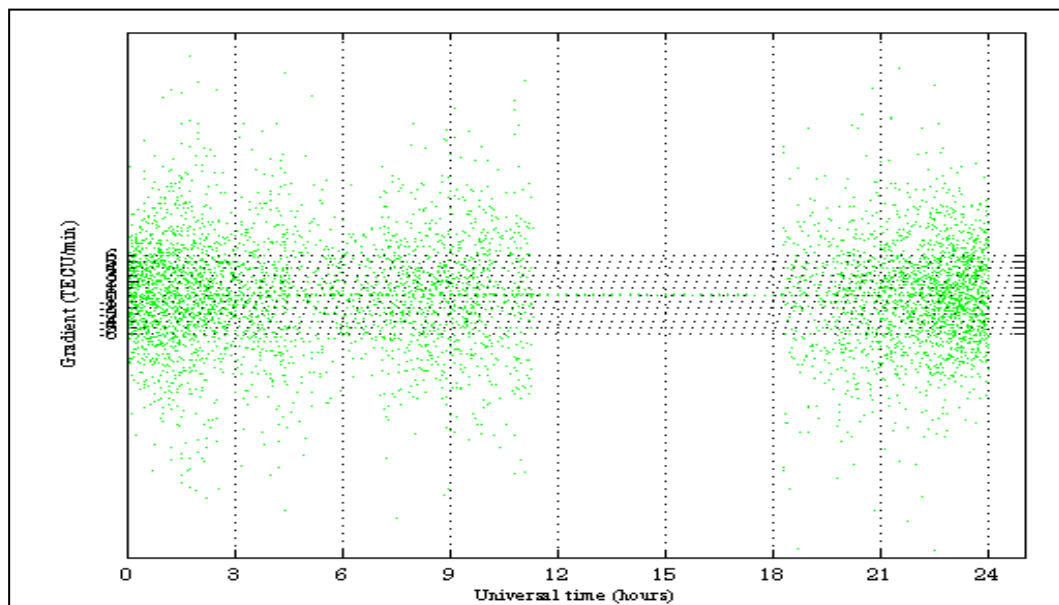
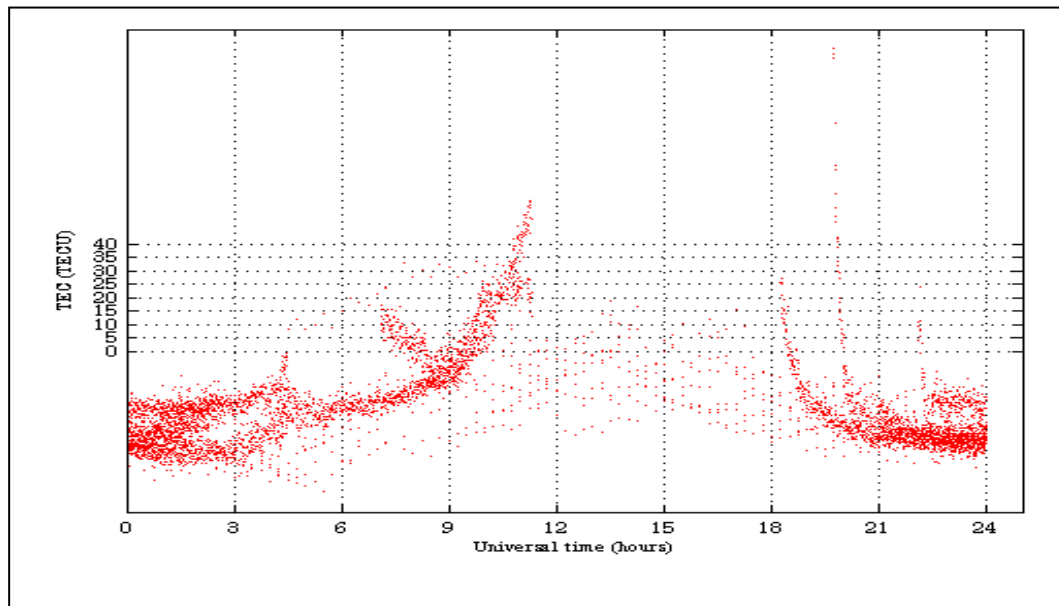
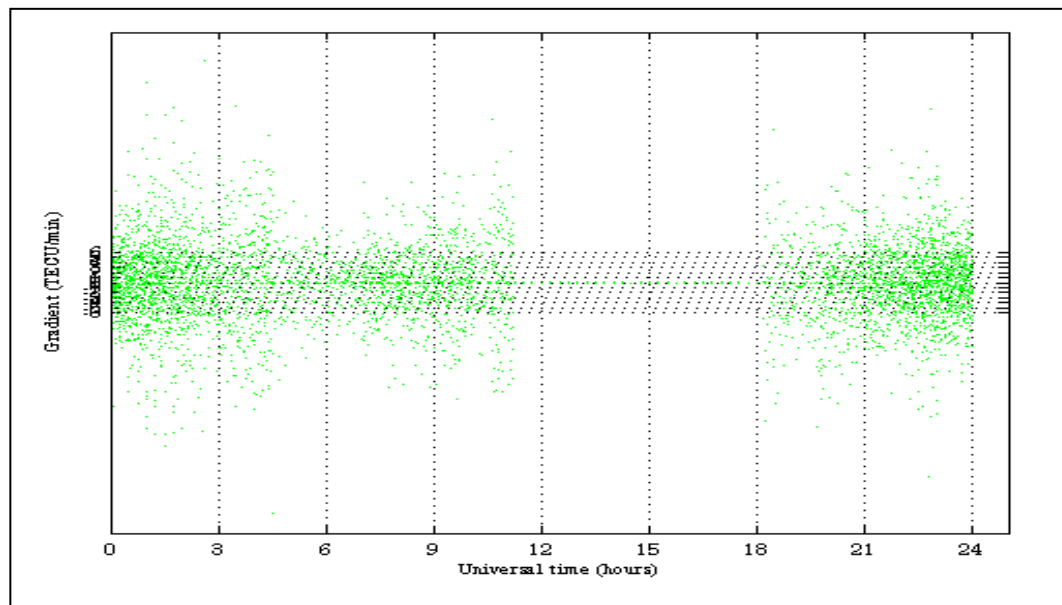
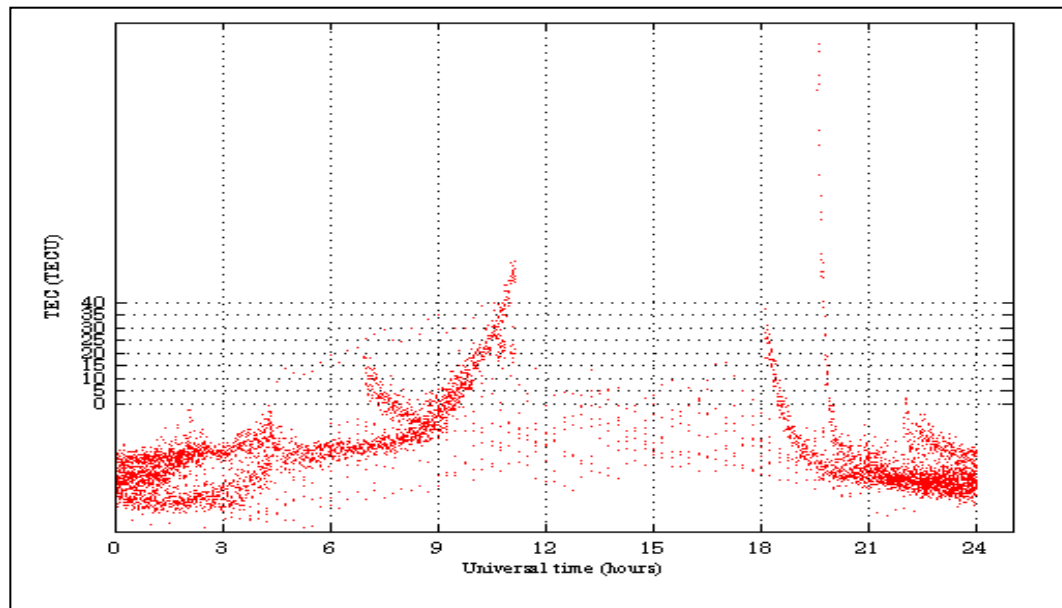


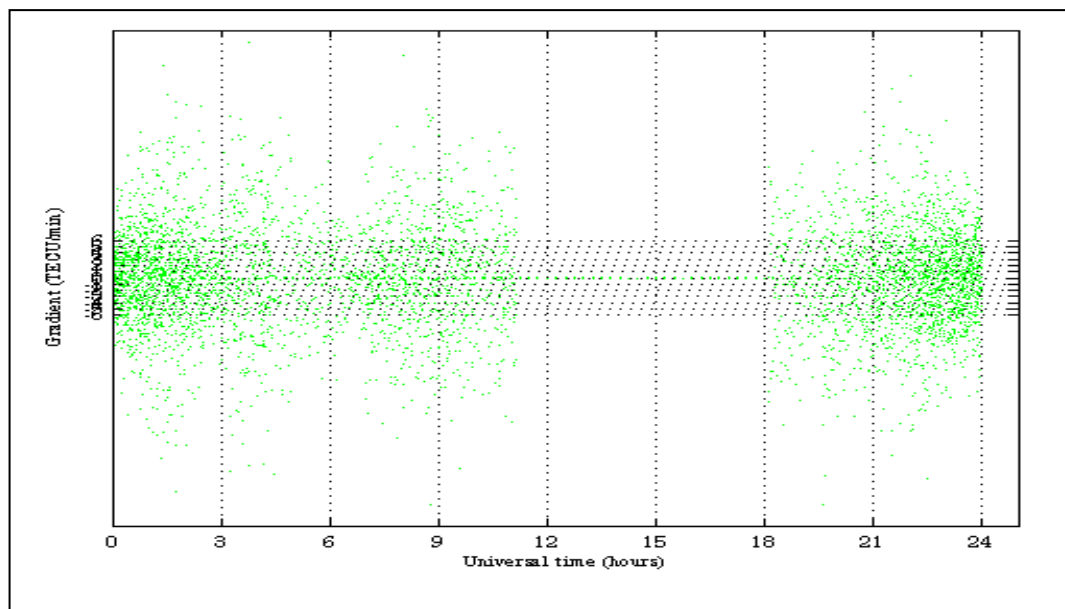
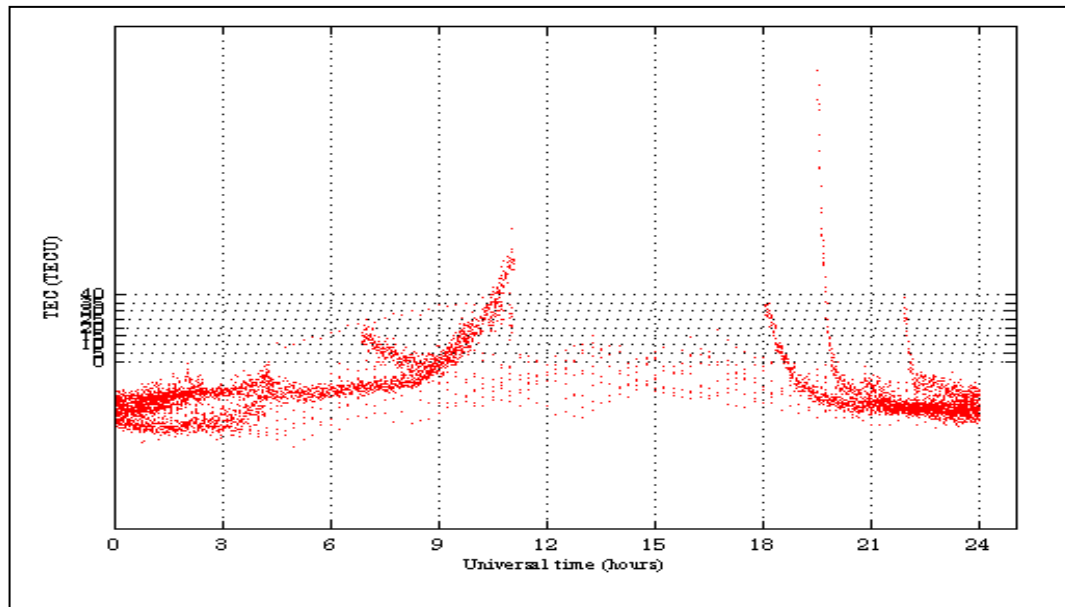
Figure 1 is a scatter plot showing the variation of Total Electron Content (TEC) in TECU over a 24-hour period of Universal Time (UT). The y-axis ranges from 0 to 14 TECU, and the x-axis ranges from 0 to 24 hours. The plot shows a clear diurnal cycle with a minimum around 06:00 UT and a maximum around 18:00 UT. A sharp spike in TEC is visible around 19:00 UT.

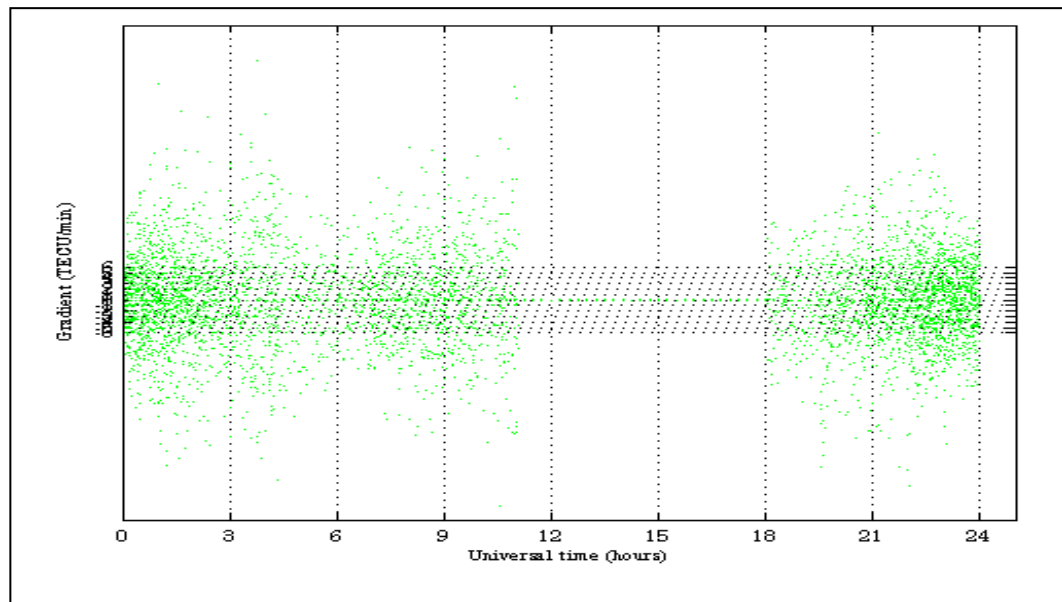
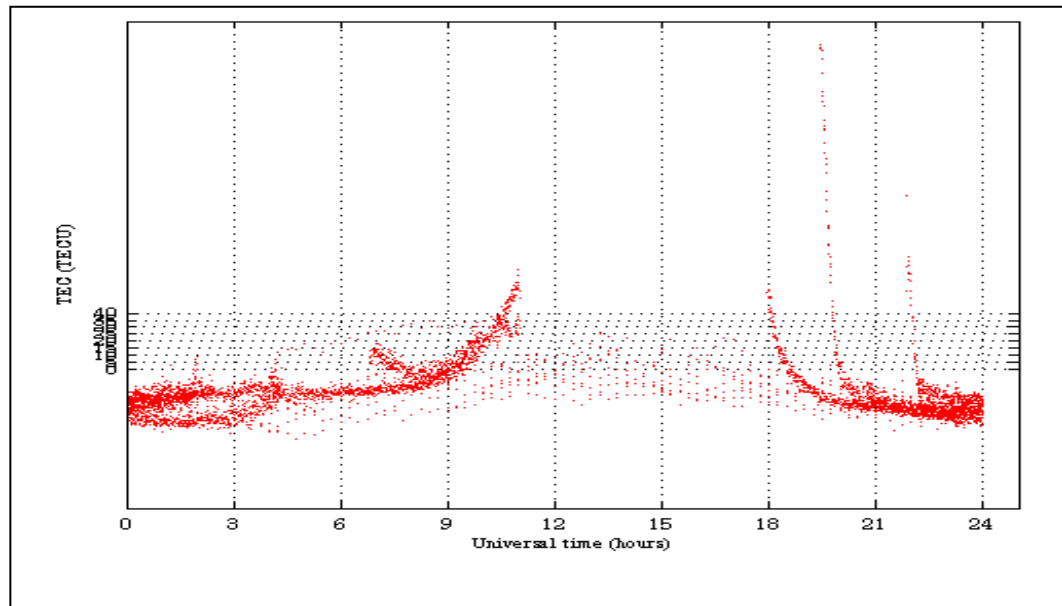


06/03/2013

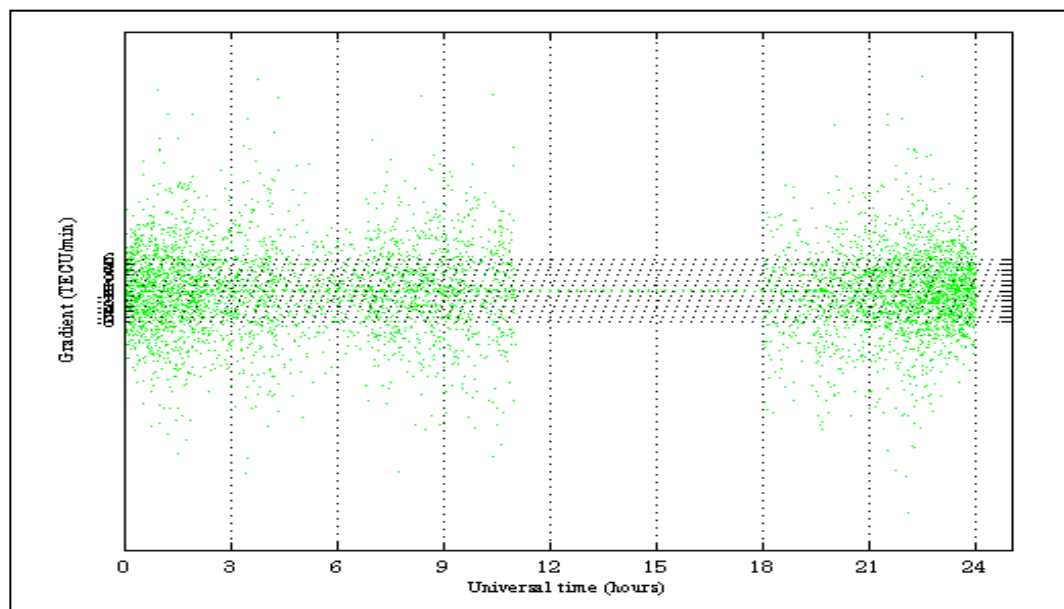
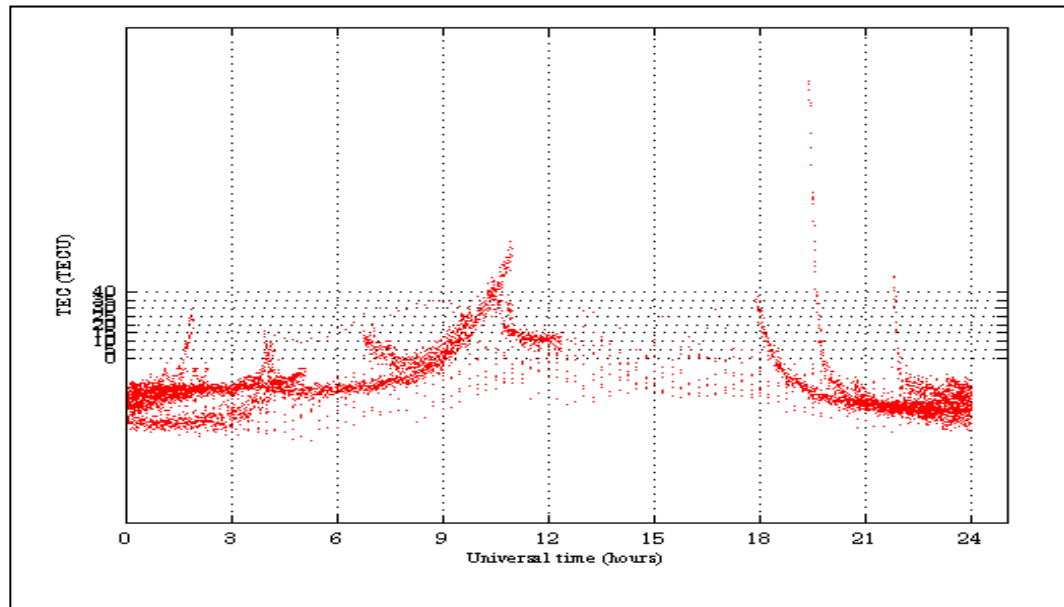
07/03/2013



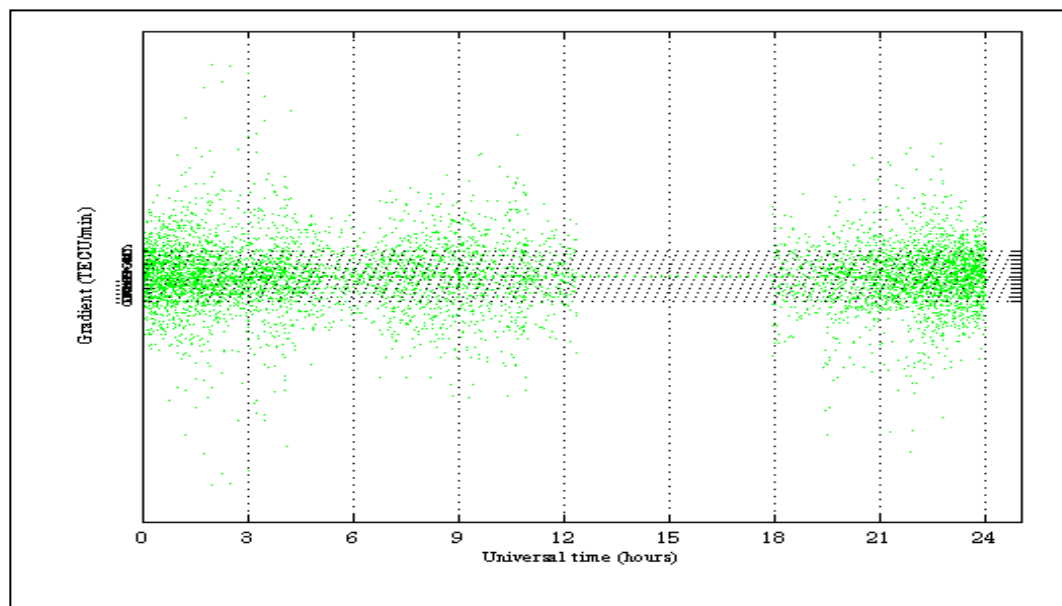
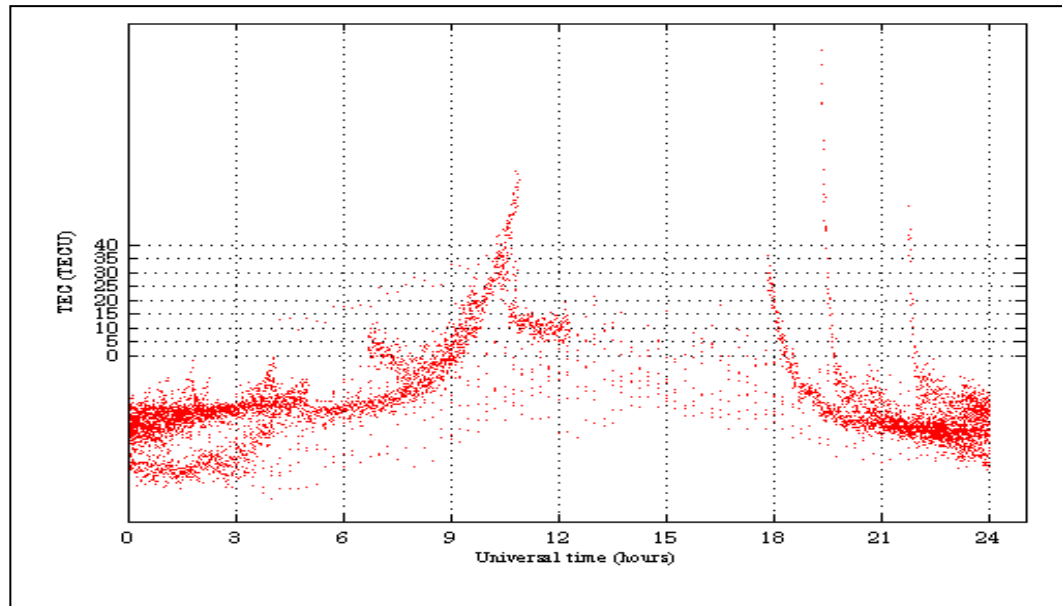
08/03/2013

09/03/2013

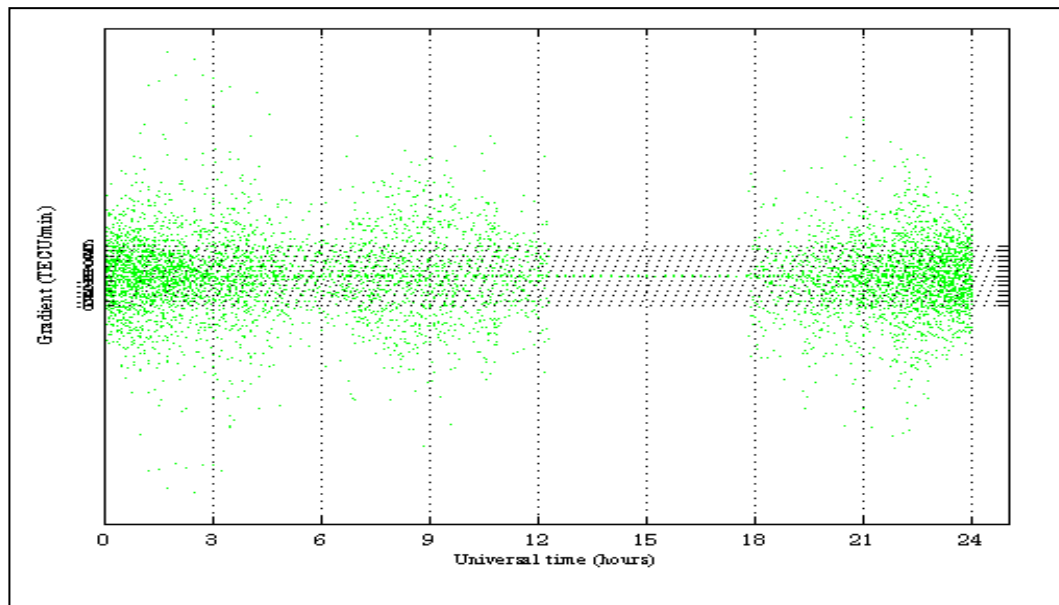
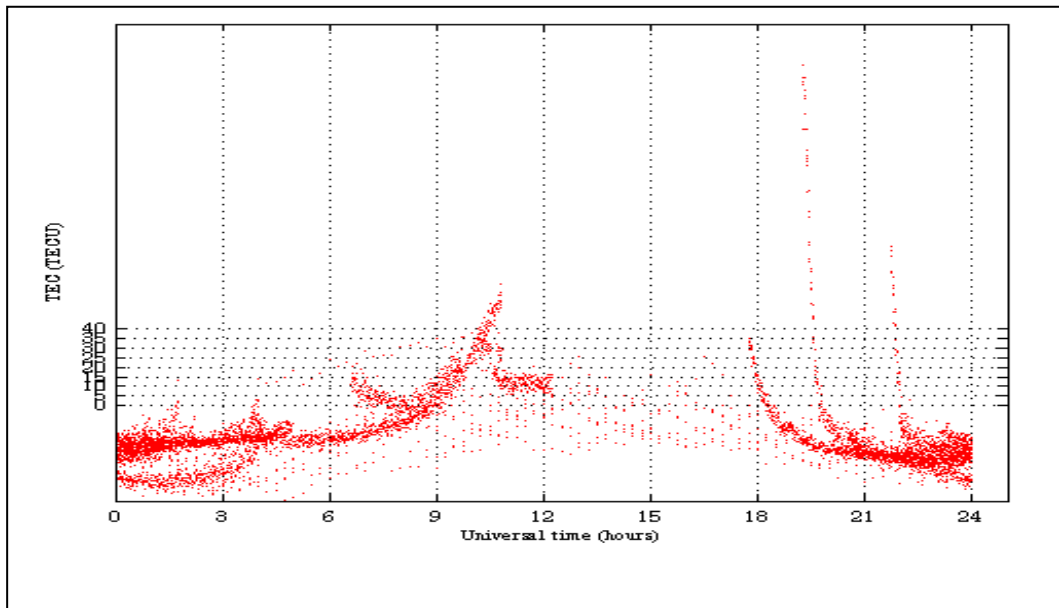
10/03/2013



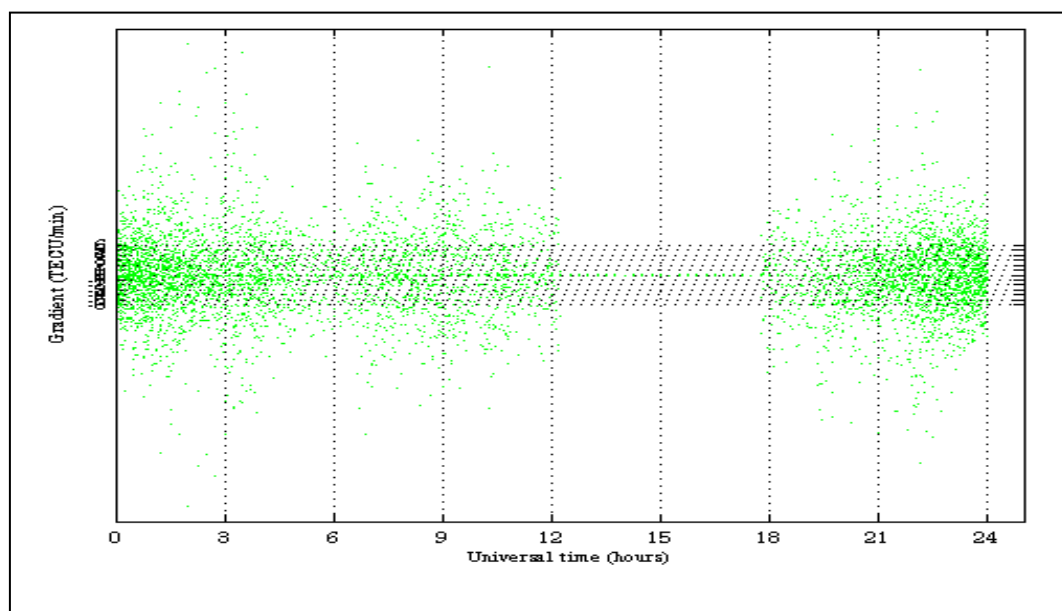
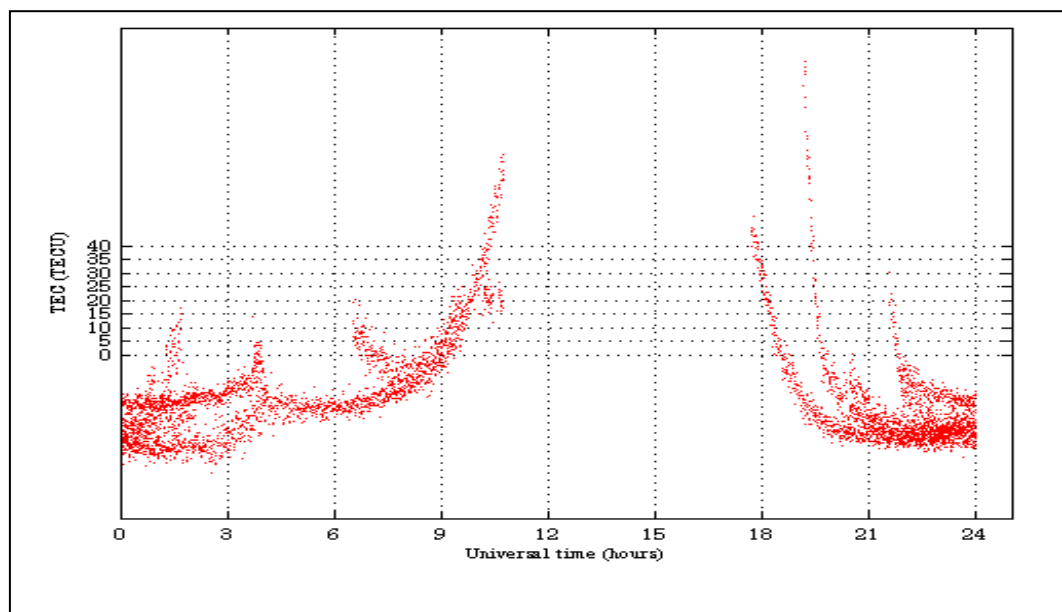
11/03/1013



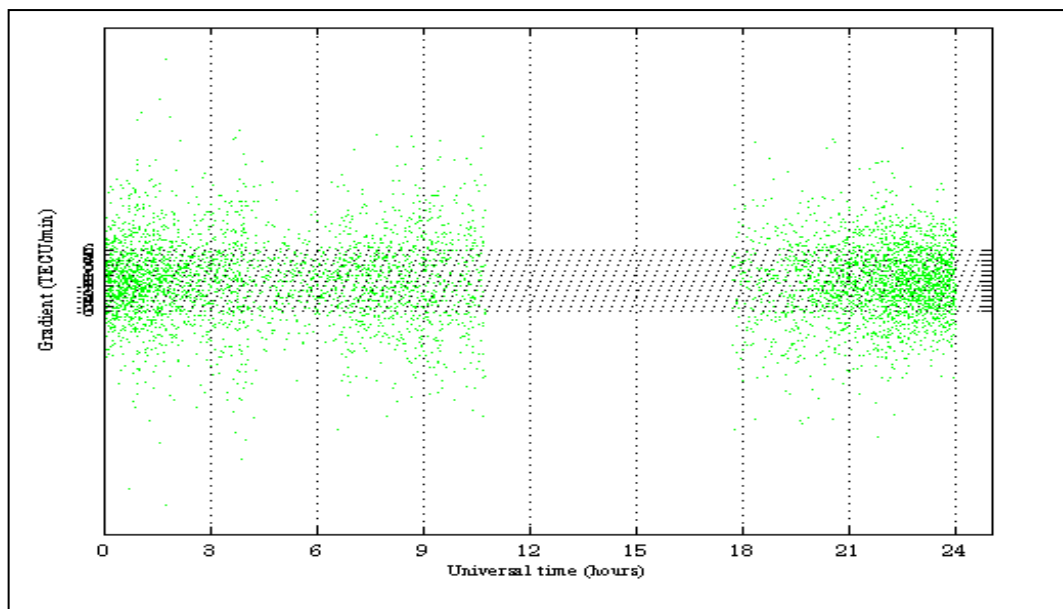
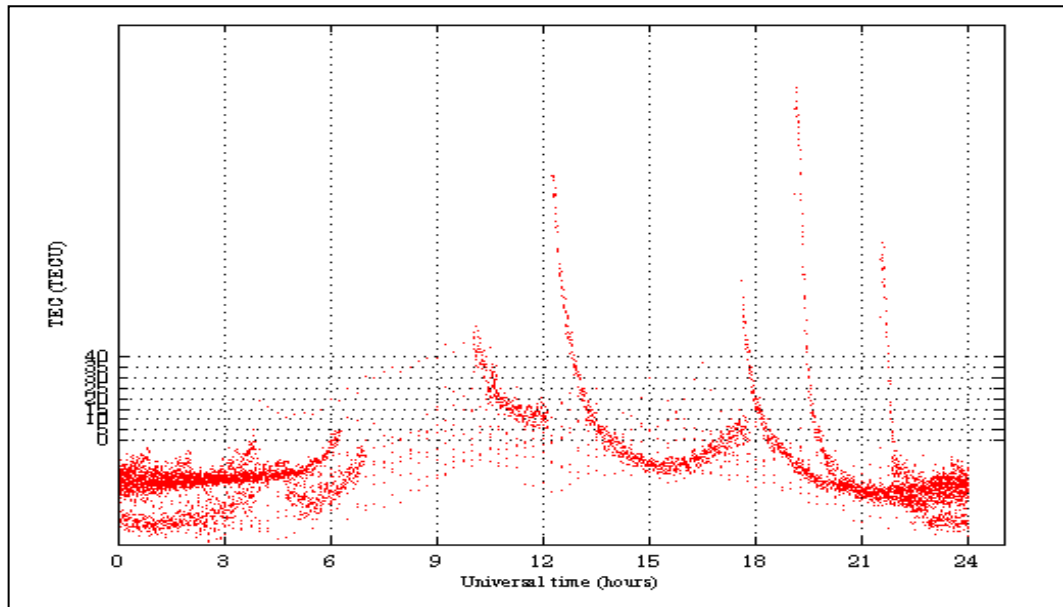
12/03/2013



13/03/2013



14/03/2013



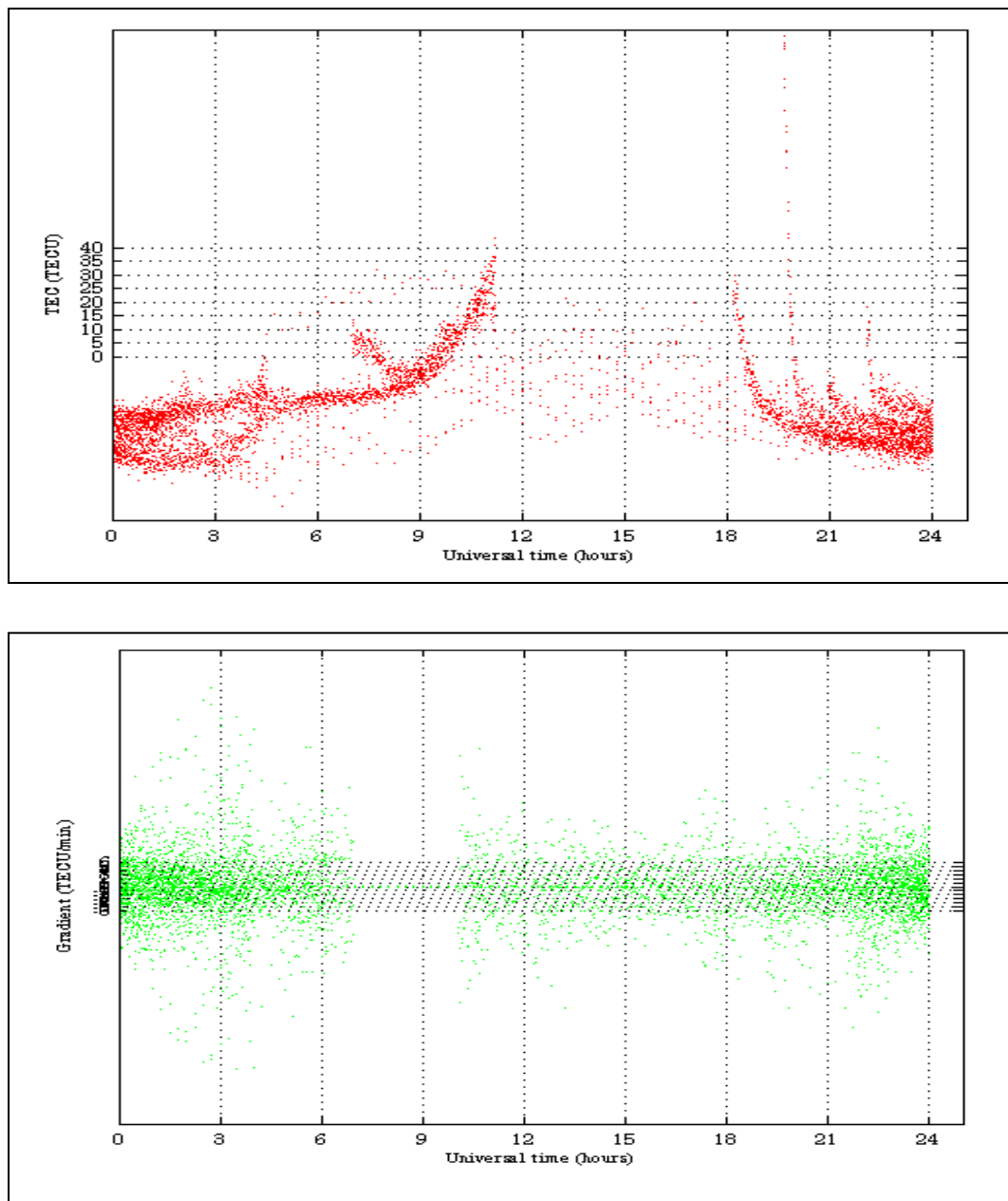
15/03/2013

Figure (3.4) : courbes représente variation de VTECU et gradient TECU /min de 01-31 mars 2013 en fonction de temps local dans station Cagliari

Analyse

Les figures illustrées auparavant (figure (3.4)) montreront la variation du VTEC pendant un mois avec un intervalle égale 30 seconde; Il est remarquable qu'il ya une augmentation de quantité ionosphérique entre 0h et 11h et 15h et 19h et sa ne reflète pas la réalité car normalement le maximum de quantité ionosphérique doit être trouvé entre 11h et 16h.

Ces résultats peuvent être bien confirmés dans la figure (3.5) qui regroupe tous les observations dans une même carte. Si on prend en considération la figure (3.6) étudiée auparavant dans un autre projet; on remarque que notre site ou observation GPS pour la station Cagliari subit des erreurs instrumentales qui erronées les observations.

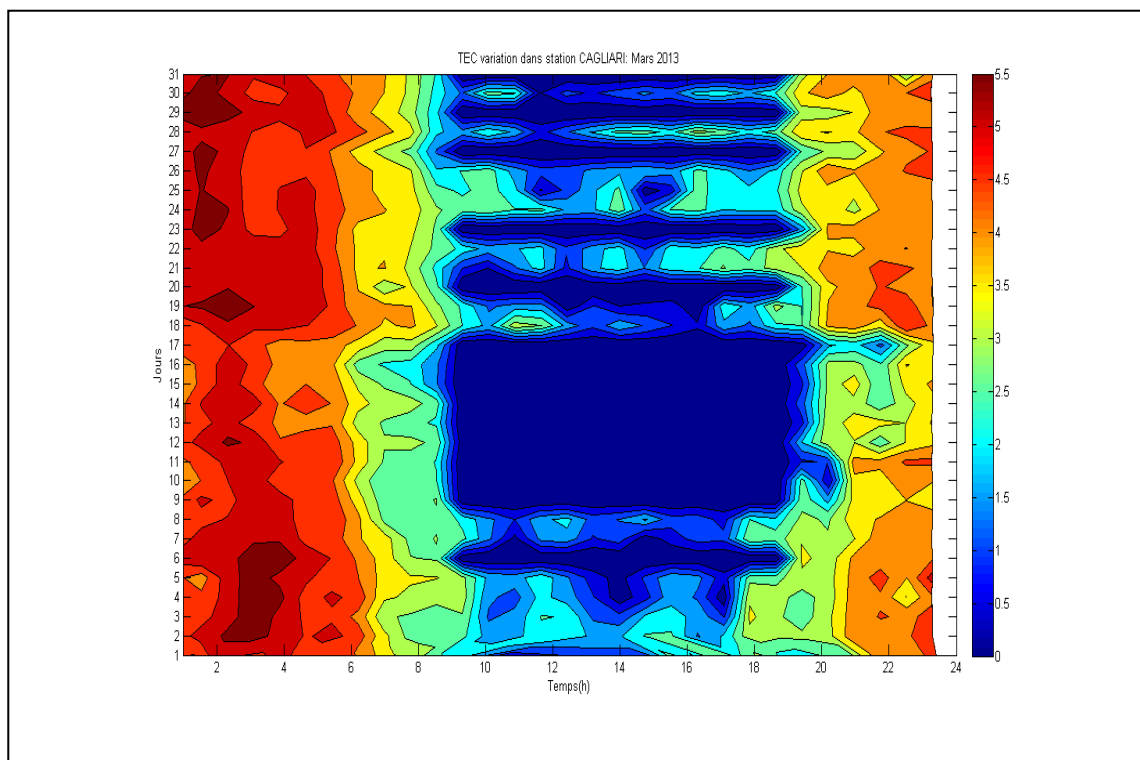


Figure (3.5):carte ionosphérique du TEC en station Cagliari 2013

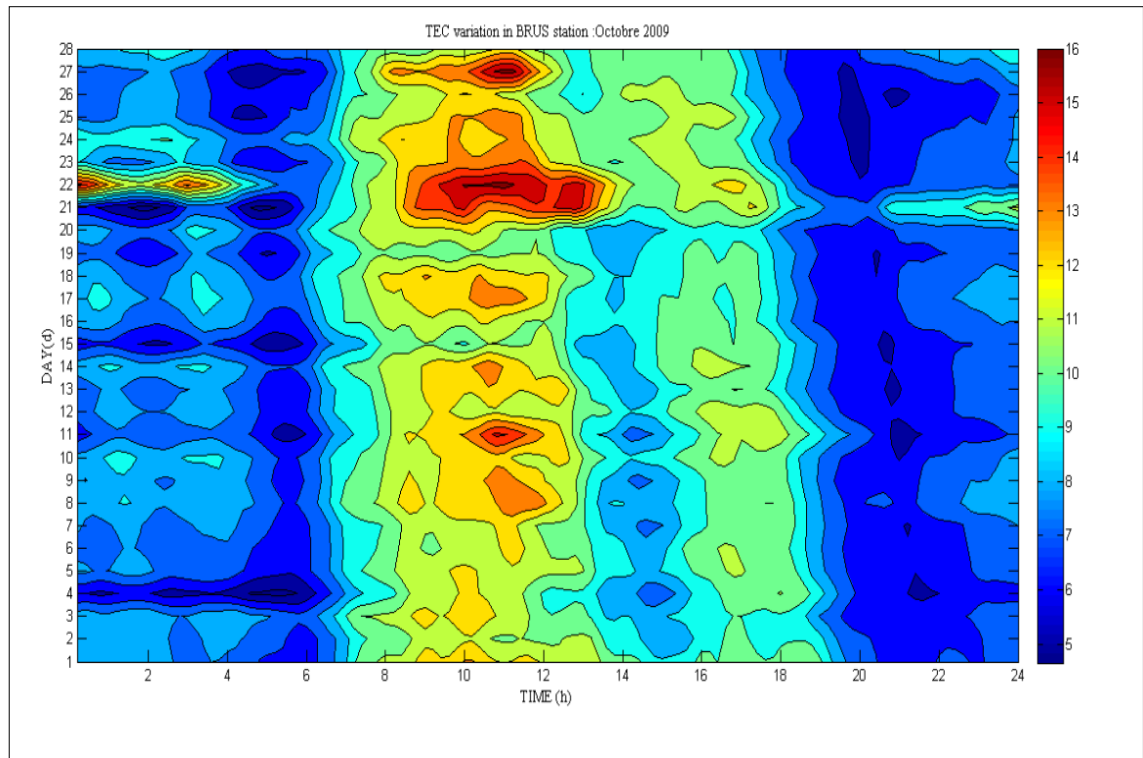


Figure (3.6) : carte ionosphérique du TEC en station Brus 2009

Conclusion générale

Le mémoire décrit un algorithme permettant de calculer le TEC (Total Electron Content) pour une station GPS permanente(Cagliari) avec l'utilisation la méthode de la couche mince a altitude de 400km.

L'objectif de cette étude de construire des cartes ionosphérique au dessus d'une station ou ville qui peut être un moyen de contrôler ou d'étudier le champ électromagnétique ou même la détection ou la prospection des ondes sismiques.

Les résultats trouver ne reproduit pas la réalité car les données étudier sont subies des erreurs instrumentales au niveau de la station de Cagliari.

Cette étude a ouvrir la porte à la recherche de l'impacte de la couche ionosphérique sur la signale radio à savoir le GPS.

L'utilisation de la combinaison linéaire Geometry-Free des observations de code reste insuffisante pour le bien contrôle du champ électromagnétique ou onde sismique.

Afin de surmonter le problème l'utilisation de la combinaison linéaire Geometry-Free des observations de phase peut résoudre le problème mais ça augmenter le nombre des inconnus à rechercher car on trouvera un nombre énorme d'ambigüité.

IL existe plusieurs domaines qui exploitent la quantité ionosphérique; l'une de ces applications est l'observation cinématique par GPS qui exige des corrections ionosphérique en temps réel bien précise pour déterminer les coordonnées des points. A cet effet on suggère des stations de diffusion des corrections ionosphérique permettant de réduire de l'effet de l'ionosphère sur les mesures radio en particulier la mesure GPS.

References Bibliographiques

Achtundvierzigster.Band (1994).Ionosphere and geodetic satellite system: permanent GPS Tracking data for Modelling and Monitoring.

A. Angrisano ,S. Gaglione, C. Gioia M. Massaro U. Robustelli, R. Santamaria,Ionospheric models comparison for single-frequency GNSS positioning,Department of Applied Sciences – PArthenope Navigation Group (PANG) "Parthenope" University of Naples, Italy.

Congyu Liu.(1993). Precise GPS positioning in the marine environment.Master thesis. UCGE Reports Number 2055, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.

Claude st-Pierre (avril 1999) Modélisation du delai inosphérique relative en vue de la dérmination des ambiguities de phase GPS.

E.Yizengaw and E. A. Essex (September1999).Use of GPS Signals to Study Total ElectronContent of the Ionosphere during theGeomagnetic Storm,Cooperative Research Center for Satellite Systems ,Department of Physics, La Trobe University, Victoria 3086, Australia.

Fotopoulos.(2000). Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations.Master thesis. UCGE Reports Number 20142, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.

Hugentobler. U, Schaer. S, Fridez. P.(February 2001). *Bernese GPS SoftwareVersion4.2.*

Jamal Asgari (novembre 2005). Etude de Modèles Prédicatifs dans Un Réseau de Station GPS Permanentes,Ecole Doctorale Astronomie et Astrophysique d' I l e de France.

Leik.Alfred (1990).GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990, pp.218-220.

Mahdi M. Alizadeh, Dudy D. Wijaya, Thomas Hobiger,Robert Weber and Harald Schuh(2013).Ionospheric Effects on Microwave Signals,Department for Geodesy and Geoinformation Science, Technical University of Berlin,Strasse des 17. Juni, 135, 10623 Berlin, Germany.

Ning Luo. (January 2001). Precise Relative Positioning of Multiple Moving Platforms Using GPS Carrier Phase Observables. Ph.D. Thesis, Geomatics Engineering, The University of Calgary.

Parkinson. B.W. (October 1994.), History and Operation of NAVSTAR, the Global Positioning System, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, No. 4.

Pham Thi Thu Hong (octobre 2012).Analyse et Interprétation de la Variation Régulière du Champ Magnétique Terrestre au Vietnam et Modalisation de L'ionosphère,Thèse de Doctorat de L'université Pierre et Marie Curie.

Raquet, J.F. (1998). Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers. Ph.D. Thesis, UCGE Report 20116, Geomatics Engineering, The University of Calgary.

René Warnant and Eric Pottiaux (1999).The increase of the ionospheric activity as measured by GPS,Royal Observatory of Belgium, Avenue Circulaire, 3, B-1180 Brussels, Belgium.

Rufus Sola Fayose, et al(2011)Variation of Total Electron Content [TEC] and Their Effect on GNSS over Akure, Nigeria

R. Warnant, G. Wautelet, J. Spits, S. Lejeune(2008),Development of a Galileo Local Component for the nowcasting and forecasting of atmospheric disturbances affecting the integrity of high precision Galileo applications,Documentreference:IRM/GALOCAD/OUT220-1, Contract ref:

JU/06/2423/CTR/GALOCAD,Royal Meteorological Institute of Belgium, 3 Avenue Circulaire, B-1180 Brussels, Belgium.

Seeber.G. (2003).Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications, de Gruyter, Berlin.

Site 1.<http://igsb.jpl.nasa.gov/>

Site 2.<http://igsb.jpl.nasa.gov/>

Site 3.<http://igsb.jpl.nasa.gov/>

Site 4.<http://igsb.jpl.nasa.gov/>

Site 5.<https://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2001/msg00267.html>

Townsend. B.P, Fenton. P, Van Dierendonck. K and Van Nee.R. (1995). Performance evaluation of the multipath eliminating delay lock loop, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 42, no 3, pp 503-514.

Vesna Ducic. (Mars 2004). Tomographie de l'ionosphère et de la troposphère à partir des données GPS denses. Applications aux risques naturels et amélioration de l'interférométrie SAR,Thèse de doctorat de l'université de Paris 7 - DENIS DIDEROT

Van Dierendonck, A. J., P. Fenton and T. Ford (1992). Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver, *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 39, no 3, pp 265-283.

Varner Christopher C. (February 2000). DGPS carrier phase networks and partial derivative algorithms. Ph.D. Thesis, UCGE Reports Number 20129. Geomatics Engineering, the University of Calgary.

Victor Husson(2007).Rapport de stage au laboratoire de géophysique de l'Université Paris Diderot.

Weil, L and Fisher. B. (Feb 29, 2000). Method of mitigation of multipath effects in radio ranging systems, U.S Patent No. 6,031,88,.

Xavier Vallieres (Décembre 2002).Les échelles de la turbulence dans l'ionosphère des Hautes latitudes et leurs signatures sur les échos des radars HF du réseau SuperDARN, Thèse présentée à l'université D'Orléans pour obtenir le Grade de docteur de L'université D'Orléans.

Yongjin Moon. (April 2004). *Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National And Regional GPS Networks in Canada*. Master thesis. UCGE Reports Number 20192, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.

Zhang, J. (1999). Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network. Master Thesis, UCGE Report 20132, Geomatics Engineering, The University of Calgary.

Zhizhao Liu(June, 2004) Ionosphere Tomographic Modeling and Applications Using Global Positioning System (GPS) Measurements, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.

Annexe A

RINEX

A.1 Historique

La première proposition pour le récepteur Independent Exchange Format RINEX a été développée par l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne pour l'échange facile des données GPS pour être recueillies au cours de la première grande européen EUREF de campagne de GPS 89, qui a impliqué plus de 60 récepteurs GPS de 4 différents fabricants. La plupart des logiciels de traitement géodésique pour les données GPS utilisent un ensemble bien défini d'observables qui est :

- La mesure de la phase porteuse à une ou deux supports étant (en fait une mesure sur la fréquence de battement entre la porteuse reçue du signal de satellite et une fréquence de référence générée par le récepteur).
- la mesure de La pseudo-distance (code) qui est l'équivalence entre la différence de l'instant de réception (exprimée dans la trame de temps du récepteur) et le temps de transmission (exprimée dans le délai du satellite) d'un signal de satellite distinct.
- Le temps d'observation étant la lecture de l'horloge du récepteur à l'instant de validité de la phase porteuse et / ou les mesures de code.

Habituellement, le logiciel suppose que le temps d'observation est valable pour les deux phases et les mesures de code, et pour tous les satellites observés.

Par conséquent, tous ces programmes nécessitent pas tous les informations qui sont généralement stockés par les récepteurs mais seulement ont besoin de la phase, du code, le temps et les informations sont ci-dessus mentionné, comme relatives-station nom de la station et la hauteur de l'antenne, etc.

A.2 Format description générale

Le format Rinex prend en charge quatre types de fichiers:

- Fichier d'Observation.
- Fichier de Navigation message.

➤ Fichier d'Observation

2	OBSERVATION DATA					RINEX VERSION / TYPE
HEADER CHANGED BY EPN CB ON 2014-01-03						COMMENT
TO BE CONFORM WITH THE INFORMATION IN						COMMENT
ftp://epncb.oma.be/pub/station/log/cagl.log						COMMENT
						COMMENT
DAT2RIN 2.51 TRS	ASI - TELESPAZIO		05MAR13	0:04:00	GMTPGM / RUN BY / DATE	
Automatic	ASI - TELESPAZIO				OBSERVER / AGENCY	
04579	TRIMBLE 4700		Nav 1.20	Sig 0.00	REC # / TYPE / VERS	
39881	TRM29659.00		NONE		ANT # / TYPE	
-----						COMMENT
Offset from BOTTOM OF ANTENNA to PHASE CENTER is 110.0 mm						COMMENT
-----						COMMENT
CAGL						MARKER NAME
12725M003						MARKER NUMBER
4893377.9900	772650.2595	4004182.8302				APPROX POSITION XYZ
0.0450	0.0000	0.0000				ANTENNA: DELTA H/E/N
*** Above antenna height is from mark to BOTTOM OF ANTENNA.						COMMENT
1	1	0				WAVELENGTH FACT L1/2
5	L1	C1	L2	P2	D1	# / TYPES OF OBSERV
30						INTERVAL
2013	3	4	0	0	0.000000	TIME OF FIRST OBS
2013	3	4	23	59	30.000000	TIME OF LAST OBS
31						# OF SATELLITES
1	807	807	807	807	807	PRN / # OF OBS
2 1045	1045	1032	1032	1045		PRN / # OF OBS
3	752	752	752	752	752	PRN / # OF OBS
4	972	972	960	960	972	PRN / # OF OBS
5	935	935	932	932	935	PRN / # OF OBS
6	808	808	807	807	808	PRN / # OF OBS
7	829	829	820	820	829	PRN / # OF OBS
8	766	766	765	765	766	PRN / # OF OBS
9	845	845	843	843	845	PRN / # OF OBS
10	757	757	757	757	757	PRN / # OF OBS
11	789	789	788	788	789	PRN / # OF OBS
12	881	881	879	879	881	PRN / # OF OBS
13	804	804	802	802	804	PRN / # OF OBS
14 1024	1024	1014	1014	1024		PRN / # OF OBS
15	718	718	715	715	718	PRN / # OF OBS
16	913	913	903	903	913	PRN / # OF OBS
17 1018	1018	1014	1014	1018		PRN / # OF OBS
18	963	963	951	951	963	PRN / # OF OBS
19	764	764	763	763	764	PRN / # OF OBS
20	858	858	858	858	858	PRN / # OF OBS
21	782	782	772	772	782	PRN / # OF OBS
22	878	878	870	870	878	PRN / # OF OBS
23	789	789	788	788	789	PRN / # OF OBS
24	812	812	812	812	812	PRN / # OF OBS
25	874	874	873	873	874	PRN / # OF OBS
26	780	780	779	779	780	PRN / # OF OBS
28	932	932	911	911	932	PRN / # OF OBS
29	834	834	834	834	834	PRN / # OF OBS
30	823	823	770	770	823	PRN / # OF OBS
31 1013	1013	1004	1004	1013		PRN / # OF OBS
32	843	843	842	842	843	PRN / # OF OBS
						END OF HEADER
13 3 4 0 0	0.0000000	0 8	5 12 16 21 25 29	30 31		
-631953.91005	24384832.07505		-490249.78446	24384827.94646		-658.54000
23289816.67204	24623109.46004		18159366.11446	24623105.45846		-3982.67100

Fichier de Navigation message

```

#cP2013 3 3 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGB08 HLM IGS
## 1730 0.00000000 900.00000000 56354 0.00000000000000
+ 32 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 2 2 2 4 2 2 2 3 3 2 2 2 2 2 2 2 3
++ 2 2 2 2 2 2 2 2 2 0 2 2 2 2 2 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%f 0.00000000 0.000000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfs grg jpl mit ngs sio
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS08_1730 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
* 2013 3 3 0 0 0.00000000
PG01 -13324.544106 -13558.954135 -18598.987893 4.424731 12 10 12 151
PG02 -10948.616703 14153.227591 19654.019422 420.720911 11 8 8 138
PG03 7559.354245 -25004.406149 -4570.637248 175.444017 9 9 9 114
PG04 -23138.162192 7159.999760 10944.232009 150.111693 11 11 13 125
PG05 -790.087565 21730.331935 15122.601294 -386.165778 4 7 7 113
PG06 13407.227528 -22681.269381 1137.497505 330.154708 8 5 9 92
PG07 -24879.543338 -6446.378616 7314.049462 186.746090 12 9 7 130
PG08 -26564.023184 -1577.260258 -3703.727528 4.906166 14 11 12 133
PG09 -9353.595173 13777.923508 -21240.294780 224.288615 12 10 10 73
PG10 -13804.930963 6919.738897 21319.002785 -71.801984 10 10 8 132
PG11 -6820.920347 -15669.075029 -20785.502791 -358.661378 9 8 9 123
PG12 11420.877424 24101.820369 -427.749998 120.746933 8 8 10 124
PG13 -12148.166384 -8276.600676 21981.356202 140.653186 9 10 4 129
PG14 19662.852769 -10838.948261 -13885.875382 220.782587 8 6 10 100

```

A.3 Définition des observations

Les observations GPS comprennent trois quantités fondamentales qui doivent être définis: Temps, Phase, et code.

A.3.1 Temps

C'est la durée de mesure de temps de réception des signaux reçus, il est identique pour les mesures de phase et code et ainsi pour tous les satellites observés à cette époque. Elle est exprimée en temps de GPS (nonUniversal Time).

A.3.2 Pseudo-Distance

La pseudo-distance (PD) est la distance entre l'antenne du récepteur et l'antenne satellite, y compris les compensations récepteur et satellite horloge (et d'autres biais, comme les retards atmosphériques).

$PD = \text{distance} + C * (\text{récepteur décalage d'horloge} - \text{horloge du satellite décalage} + \text{d'autres biais})$

A.3.3 Phase

C'est la phase porteuse mesurée en cycles entiers. Les demi-cycles mesurée par les récepteurs de type quadrature doivent être convertis à des cycles entiers et signalé par le facteur de longueur d'onde dans la section d'en-tête (GPS seulement).

La phase change dans le même sens que le code (doppler négatif). Les observations de phase entre les époques doivent être connectées en incluant le nombre entier de cycles. Les observations de phase ne contiendront aucunes dérives systématiques de compensations intentionnelles des oscillateurs de référence.

Les observations ne sont pas corrigées pour les effets externes comme réfraction atmosphérique, décalages d'horloge des satellites, etc.

A.3.4 Doppler

Le signe du décalage Doppler observable supplémentaire est défini comme d'habitude: Positif pour approcher les satellites.

A.3.5 Numéros des satellites

En commençant par Rinex version 2 les ensembles de numéros de satellites à deux chiffres sont précédés par un seul caractère identifiant.

```

snn
|
|
|+--- nn:  PRN          (GPS, Galileo)
|          slot number (GLONASS)
|          PRN-100     (SBAS Geostationary)
|
|+--- s:   satellite system identifier
|          G : GPS
|          R : GLONASS
|          S : SBAS payload
|          E : Galileo

```

Figure (A.1) : Numéro de satellite

A.4 L'échange de fichiers Rinex

Pour le fichier Rinex nous recommandons d'utiliser la convention de nommage suivante pour les fichiers RINEX :

```

ssssdddf.yyt
| | | | |
| | | | | +- t: file type:
| | | | | O: Observation file
| | | | | N: GPS navigation message file
| | | | | M: Meteorological data file
| | | | | G: GLONASS navigation message file
| | | | | L: Galileo navigation message file
| | | | | P: Mixed GNSS navigation message file
| | | | | H: SBAS Payload navigation message file
| | | | | B: SBAS broadcast data file
| | | | | (separate documentation)
| | | | | C: Clock file (separate documentation)
| | | | | S: Summary file (used e.g., by IGS, not a standard!
| | | | | two-digit year
| | | | | +- yy:
| | | | | +----- f: file sequence number/character within day.
| | | | | daily file: f = 0 (zero)
| | | | | hourly files:
| | | | | a = 1st hour: 00h-01h; b = 2nd hour: 01h-02h;
| | | | | . . . x = 24th hour: 23h-24h
| | | | | +----- ddd: day of the year of first record
| | | | | +----- ssss: 4-character station name designator

```

Figure(A.2) : Les noms de fichiers conseillés: générales, quotidiens, fichiers horaires

Pour 15 minutes à haut-débit de données de suivi nous vous recommandons les noms de fichiers étendus suivants :

```

ssssdddhmm.yyO
| | | | |
| | | | | +- O: observation file
| | | | | +- yy: two-digit year
| | | | | | +----- mm: starting minute within the hour (00, 15, 30, 45)
| | | | | | +----- h: character for the n-th hour in the day
| | | | | | a = 1st hour: 00h-01h; b = 2nd hour: 01h-02h;
| | | | | | . . . x = 24th hour: 23h-24h.
| | | | | +----- ddd: day of the year
| | | | | +----- ssss: 4-char station ID or ID for the LEO
| | | | | receiver/antenna

```

Figure(A.3) : Les noms de fichiers conseillés: haut-débit aux fichiers de donnée

Quand les temps de transmission de données ou des volumes de stockage sont critiquent, nous recommandons de compresser les fichiers avant le stockage ou la transmission, actuellement UNIX utilise "compresser" et programmes de «décompresser». Routines compatibles sont disponibles sur Systèmes VAX / VMS et PC / DOS, ainsi propose l'extension de fichier pour les fichiers compressés.

File Types	All platforms uncompressed	UNIX compressed	VMS compressed	DOS
Obs Files	.yyO	.yyO.Z	.yyO_Z	.yyY
Obs Files (Hatanaka compressed)	.yyD	.yyD.Z	.yyD_Z	.yyE
GPS Nav Message Files	.yyN	.yyN.Z	.yyN_Z	.yyX
GLONASS Nav Message File	.yyG	.yyG.Z	.yyG_Z	.yyV
Galileo Nav Message File	.yyL	.yyL.Z	.yyL_Z	.yyT
Mixed GNSS Nav Message File	.yyP	.yyP.Z	.yyP_Z	.yyQ
GEO SBAS Nav Message Files	.yyH	.yyH.Z	.yyH_Z	.yyU
GEO SBAS Broadcast Files (sep. doc.)	.yyB	.yyB.Z	.yyB_Z	.yyA
Met Data Files	.yyM	.yyM.Z	.yyM_Z	.yyW
Clock Files (see sep.doc.)	.yyC	.yyC.Z	.yyC_Z	.yyK

Figure(A.4) : Les extensions de fichier recommandées pour les fichiers compressés

A.5 Technique supplémentaires

A.5.1 Versions

Les programmes développés pour lire des fichiers RINEX doivent vérifier le nombre de la version.

Les fichiers de nouvelles versions peuvent apparaître différents même si ils n'utilisent aucun des plus nouvelles caractéristiques.

A.5.2 principaux espaces dans les champs du caractère

Nous proposons que les routines lire des fichiers automatiquement effacent des principaux espaces dans tout champ de saisie du caractère.

Routines qui créent des dossiers RINEX devrait justifier toutes les variables dans les champs du caractère.

A.5.3 enregistrements de longueur variable

Les fichiers ASCII habituellement ont des durées d'enregistrement variables, donc nous recommandons en premier de lire chaque dossier de l'observation dans une chaîne vide assez longue pour adapter le plus grand record³ de l'observation possible et décoder les données après. L'Enregistrement de la longueur variable, les rubriques de données vides à la fin d'un dossier peuvent manquer, surtout dans le cas de la compensation de l'horloge du récepteur facultative.

A.5.4 Les champs vierges

Dans la perspective d'avenir nous recommandons pour sauter avec soin tous champs définis actuellement pour être vierge (le format présente nX), parce qu'ils peuvent être assignés à nouveau contenu dans les futures versions.

A.5.5 Ordre des enregistrements d'en-tête, ordre de registres des données

Comme les descripteurs record dans les colonnes 61-80 est obligatoire, la lecture des programmes une Version RINEX 3 en-tête est capable de décoder les enregistrements d'en-tête avec les formats d'après le descripteur record, à condition les registres a été lu en premier dans un tampon interne.

Nous proposons par conséquent d'autoriser classement libre des enregistrements d'en-tête, avec les exceptions suivantes:

- La VERSION RINEX / le fichier du TYPE doit être le premier fichier dans un fichier
- Le SYS / #/ OBS TYPES record(s) devrait précéder tout SYS / DCBS APPLIED et SYS / registres du FACTEUR D'ÉCHELLE.

- Le #DE dossier des SATELLITES (si présent) devrait être suivi immédiatement par le nombre correspondant de PRN / #DE registres OBS.
- La FIN D'EN-TÊTE est bien sûr le dernier en-tête dans le fichier

A.5.6 Articles manquants et la durée de la validité de valeurs

Les articles manquants au temps de la création de fichier peuvent être mis à zéro ou effacer ou le dossier respectif peut être complètement oublié. Par conséquent les articles d'enregistrements d'en-tête manquants seront mis à zéro ou effacer par la lecture du programme dossiers RINEX.

Chaque valeur reste valide jusqu'à être changée par un enregistrement d'en-tête supplémentaire.

A.5.7 types de l'observation Indéterminés et enregistrements d'en-tête

un bon entraînement d'observation pour une lecture du programme RINEX afin de s'assurer qu'il traite correctement tout types d'observation inconnu , enregistrements d'en-tête ou l'événement signale en les sautant et/ou les rapporter à l'utilisateur. Le programme devrait vérifier aussi le RINEX version nombre dans l'enregistrement d'en-tête et enregistrement action adéquate s'il ne peut pas faire face.

A.5.8 Registres du drapeau de l'événement

Le "nombre de satellites" correspond aussi au nombre de registres de la même époque qui suit le fichier de l'ÉPOQUE. Par conséquent il peut être utilisé pour sauter le nombre approprié de registres des données si certains drapeaux de l'événement n'étaient pas évalués en détail.

A.5.9 Compensation de l'horloge du receveur

Unecompensation de l'horloge receveur-dérivée peut être rapportée facultativement dans les RINEX observation dossiers. Pour enlever des incertitudes si les données (époque, pseudo range, phase) a été corrigé par précédemment ou pas par l'horloge rapportée a compensé, RINEX Versions 2.10 en avant demandes un clarifiant enregistrement d'en-tête: RCV CLOCK OFFS APPL. Ce serait alors possible de reconstruire les observations originales, si nécessaire.

A.5.10 Années à deux chiffres

RINEXVersion 2 stock les années de registres des données avec deux chiffres seulement. L'en-tête de dossiers de l'observation contient un TEMPS DE PREMIER OBS enregistrez avec l'année de quatre chiffres pleine, les GPS navigation messages contiennent le GPS nombres de la semaine. A partir de ces

deux éléments de données l'année non équivoque peut être reconstruite facilement.

A.5.11 temps de transmission de message (GPS fichier de navigation message)

Le temps de transmission de message peut être peu avant minuit samedi/dimanche, TOE et Toc du message déjà dans la semaine prochaine .

Comme la semaine rapportée dans le RINEX navigation message (ORBITE de l'ÉMISSION - 5 fichier) va avec TOE (ce ci est différent du GPS semaine dans le message du satellite original!), le temps de transmission de message doit être réduit par 604800 (c.-à-d., deviendra négatif) faire référence aussi à la même semaine.

A.5.12 Antenne de référence et centres de la phase

Nous distinguons entre :

- Le marqueur, c.-à-d. le monument de la référence géodésique sur lequel une antenne est montée directement centré ou sur un trépied.
- Le point de la référence de l'antenne (ARP), c.-à-d., un point précis sur l'antenne, par exemple, le centre de la phase inférieure du préamplificateur. La hauteur de l'antenne est mesurée du marqueur à l'ARP et rapporté dans l'ANTENNE: DELTA enregistrement d'en-tête H/E/N.

Petites excentricités horizontales du Les w/r ARP au marqueur peuvent être rapportés dans le même fichier. Sur les véhicules la place de l'ARP est rapporté dans le système coordonné corps-arrangé dans une ANTENNE: DELTA enregistrement d'en-tête X/Y/Z.

- Le centre de la phase moyen: Une fréquence –la position d'élévation moyenne dépendent du centre moyenne de la phase au-dessus du point de référence de l'antenne. La position est importante de savoir les réseaux d'antennes mixtes. Il peut être donné dans un sens absolu ou relatif à une antenne de la référence. Enregistrement d'en-tête facultatif: ANTENNE: PHASECENTER. Pour les postes fixes les composants sont dans direction du Nord/East/Sud, sur les véhicules, la place est rapportée dans le système corps-arrangé X, Y, Z.

Pour les applications plus précises une élévation - ou élévation et dépendent azimuth phase variation central (PCV) modèle pour l'antenne (se reporter au convenu sur ARP) devrait être utilisé. Pour les applications spéciales ce peut être utile à produire déjà des dossiers RINEX avec ces variations déjà été appliqué.

Cela peut être rapporté par les enregistrements d'en-tête spéciaux SYS / PCVS APPLIED qui pointe au dossier qui contient les modèles de la correction du PCV.

- L'orientation de l'antenne: Le "zéro direction" est orienté habituellement vers nord sur les postes fixes. Les déviations de la direction nord peuvent être rapportées avec l'azimut de zéro-direction dans UNE ANTENNE: ZERODIR enregistrement d'en-tête AZI. Sur les véhicules zéro-direction est rapportée comme une unité vecteur dans le système coordonné corps-arrangé dans une ANTENNE: ZERODIR enregistrement d'en-tête XYZ. Le mettre à zéro direction d'une antenne inclinée sur un poste fixe peut être rapporté comme vecteur unitaire dans le gaucher nord/East/Sud système coordonné local dans une ANTENNE: ZERODIR enregistrement d'en-tête XYZ.

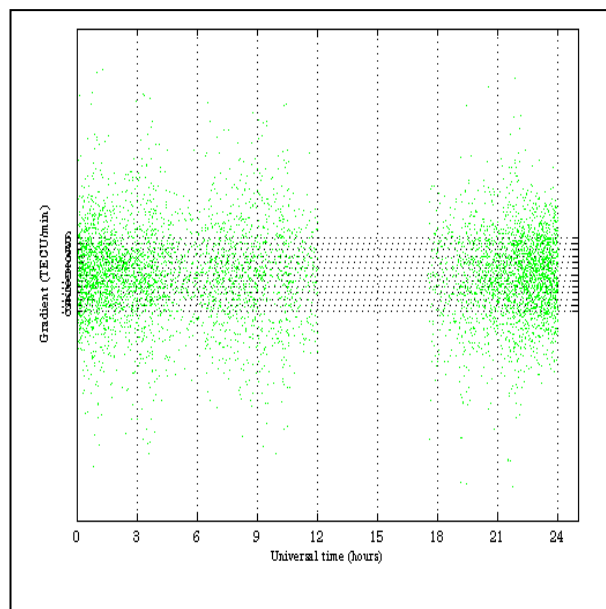
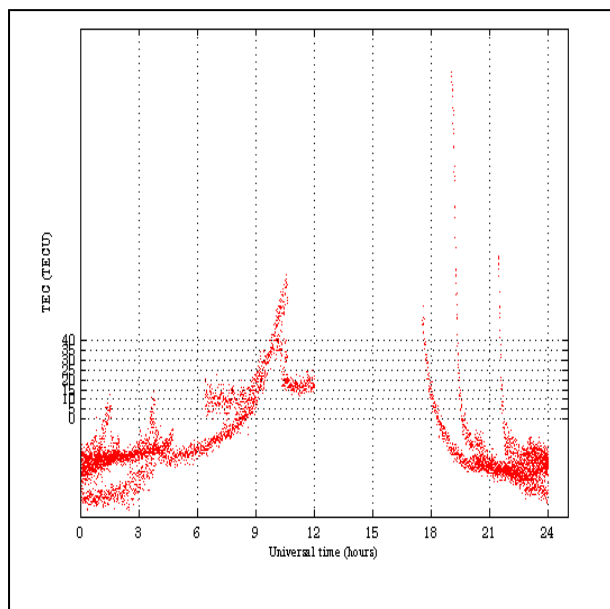
- La direction de la calibre-vue d'une antenne sur un véhicule: Le "vertical" axe de la symétrie de l'antenne pointé vers les satellites GNSS. Il peut être rapporté comme vecteur unitaire dans le corps-arrangé a coordonné le système dans l'ANTENNE: B.SIGHT fichier XYZ. Une antenne inclinée sur un poste fixe pourrait être rapportée comme vecteur unitaire dans le Nord/East/Sud gaucher système coordonné local dans le même enregistrement d'en-tête.

Être capable d'interpréter les plusieurs places correctement c'est important que le dossier du TYPE du MARQUEUR est inclus dans l'en-tête RINEX.

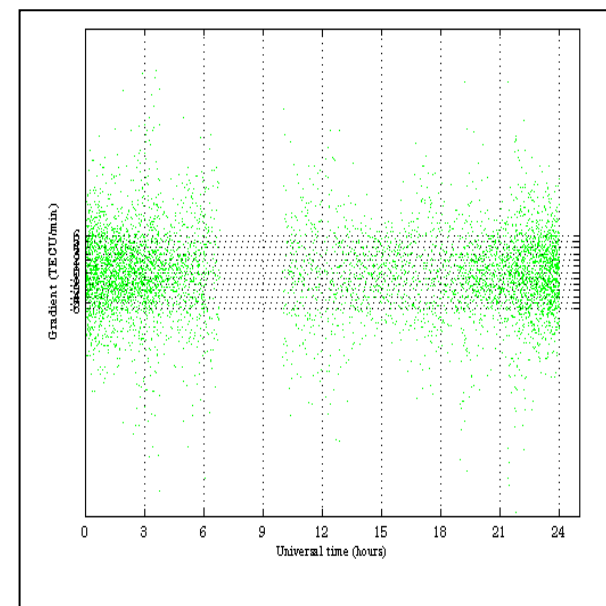
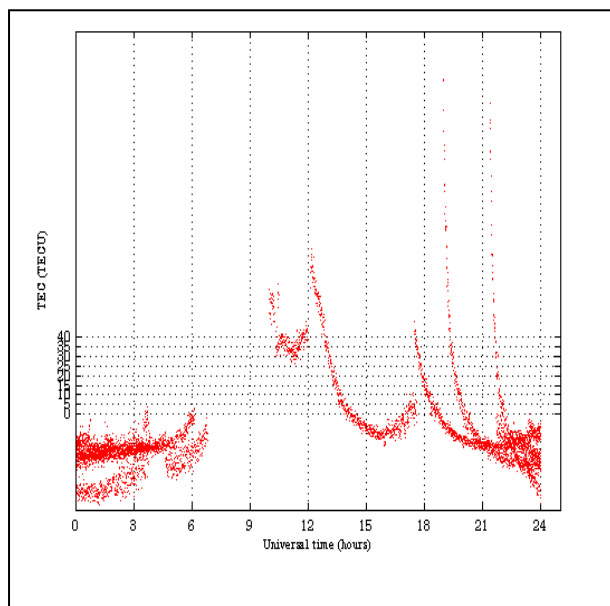
Annexe B

Graphes variations de TEC et ses gradients

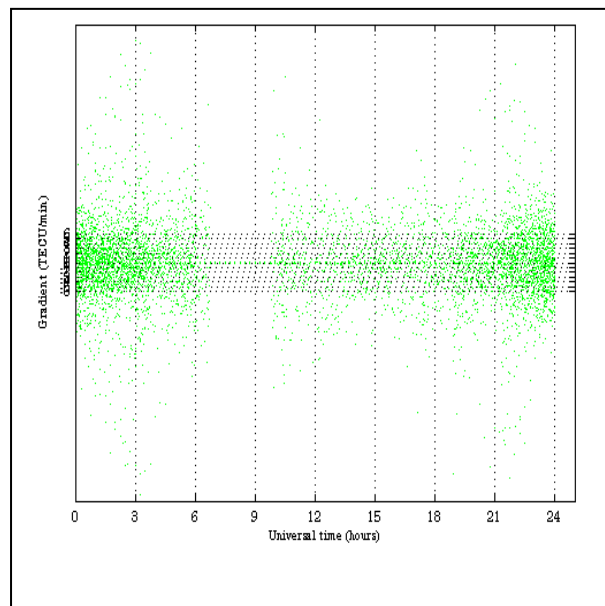
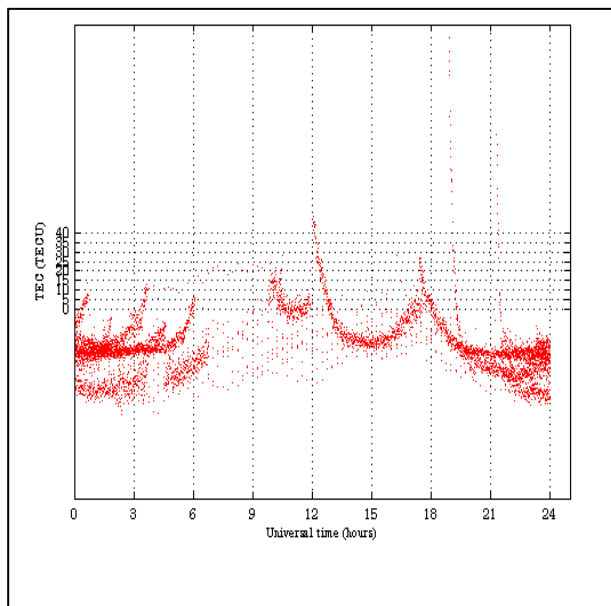
16/03/2013



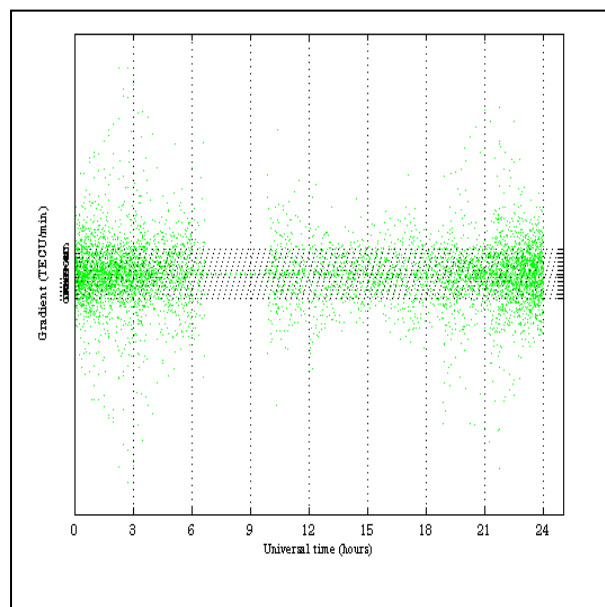
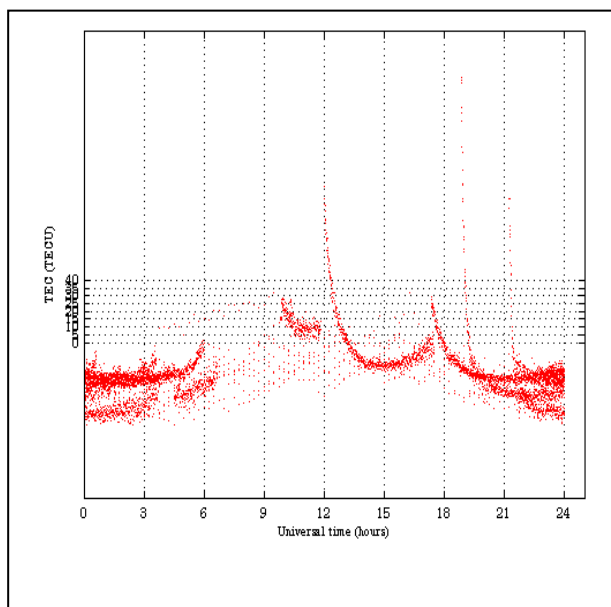
17/03/2013



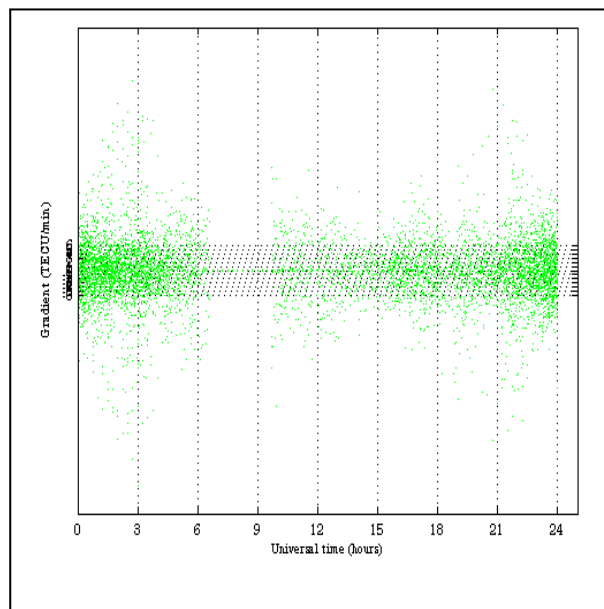
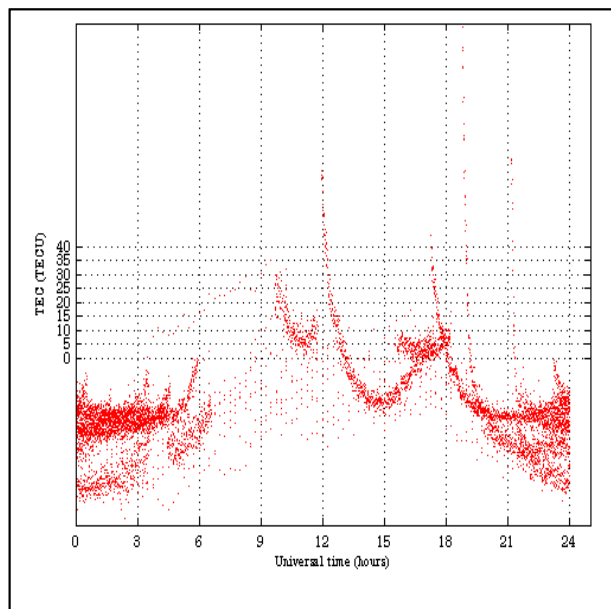
18/03/2013



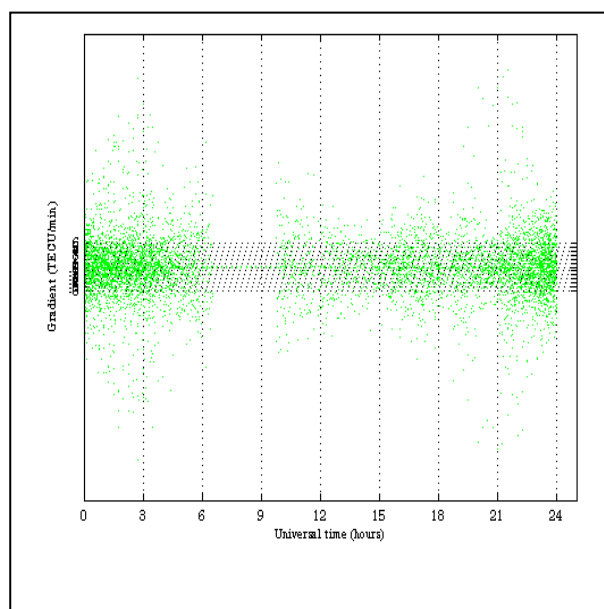
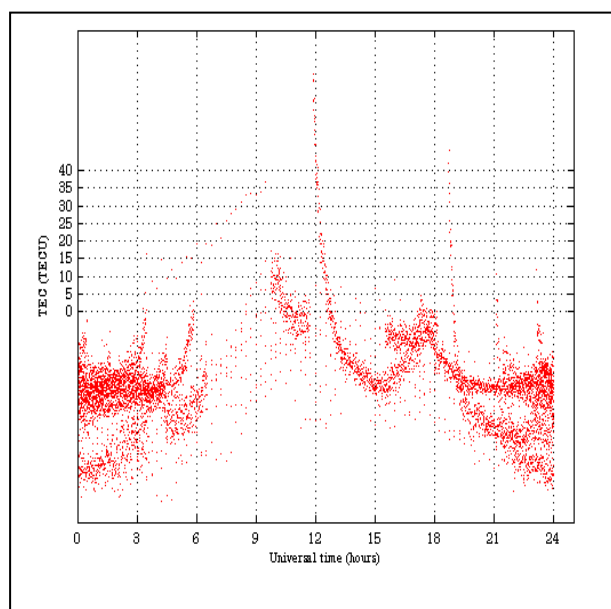
19/03/2013



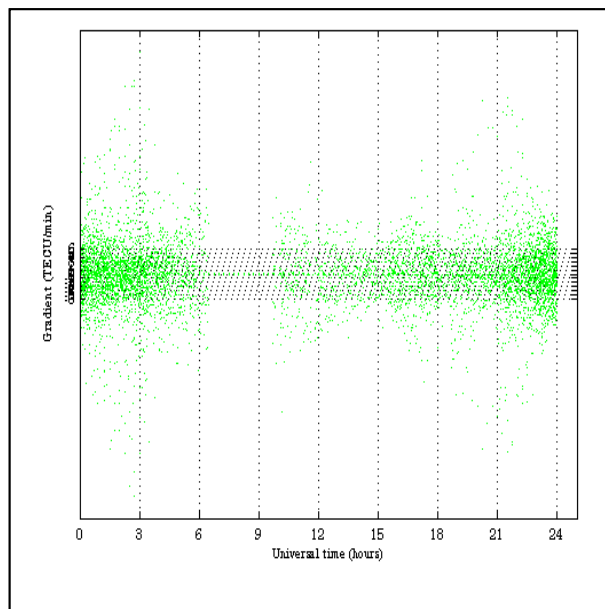
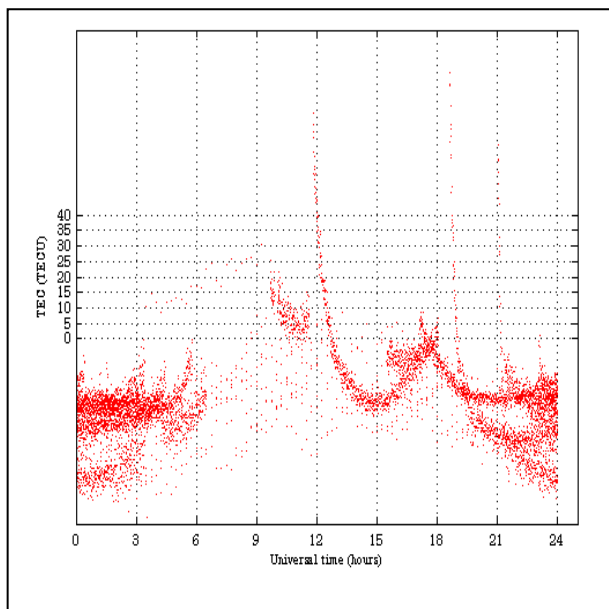
20/03/2013



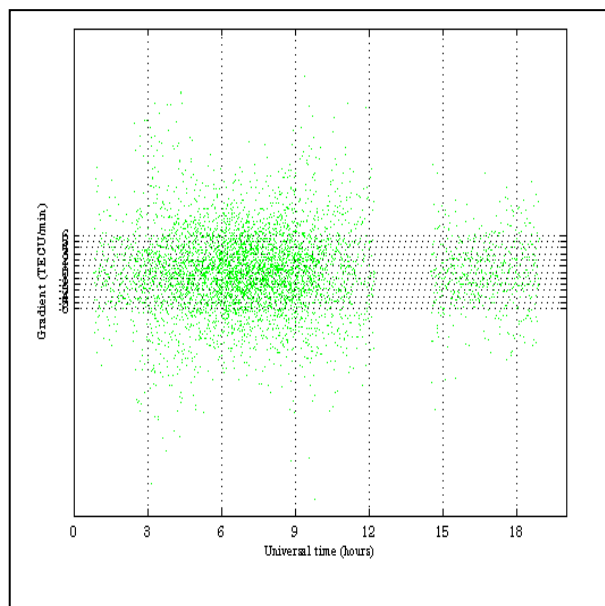
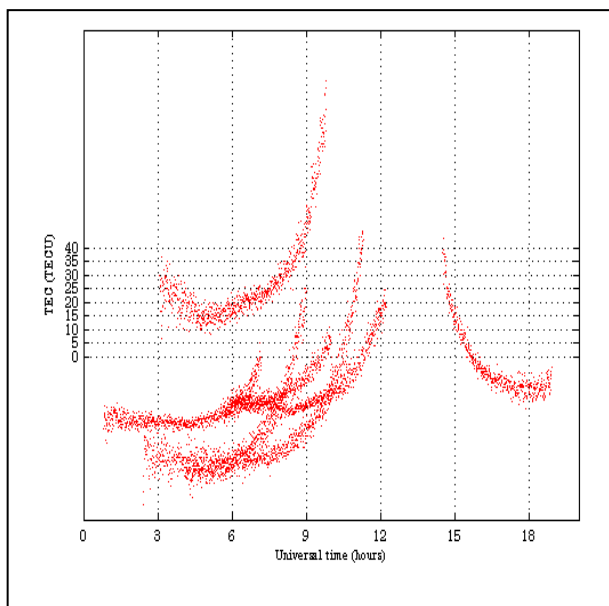
21/03/2013



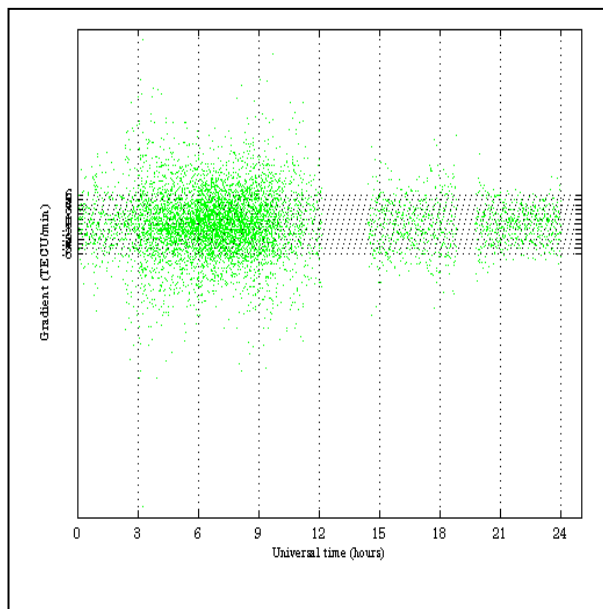
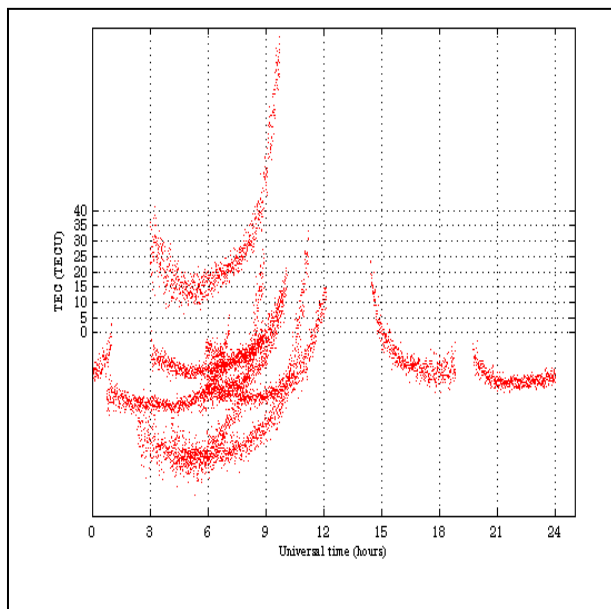
22/03/2013



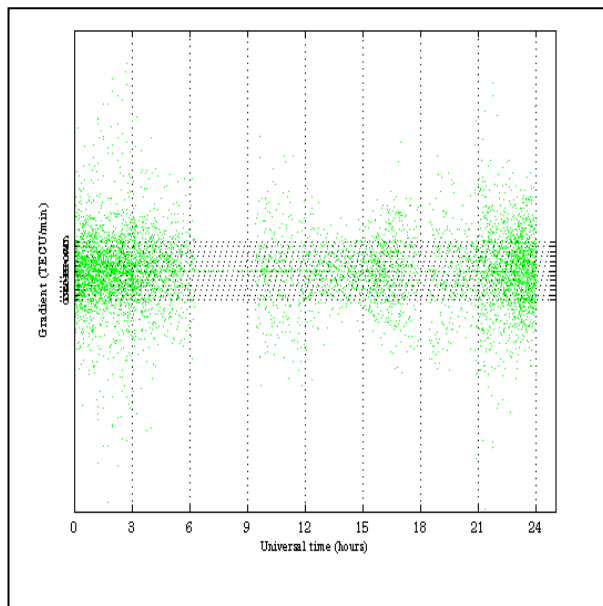
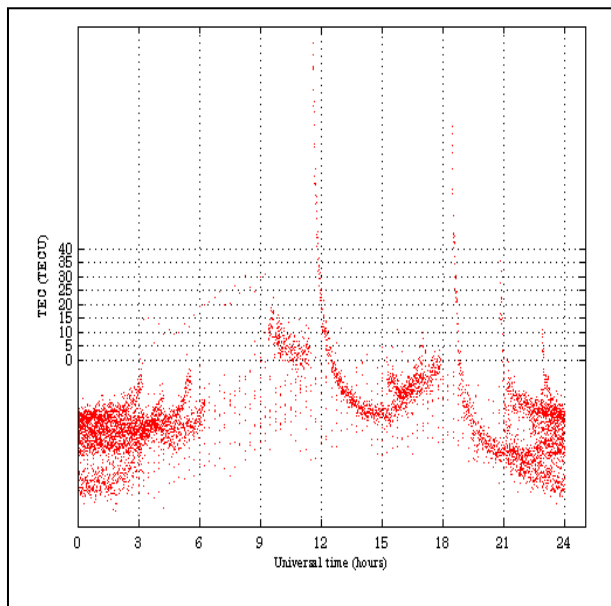
23/03/2015



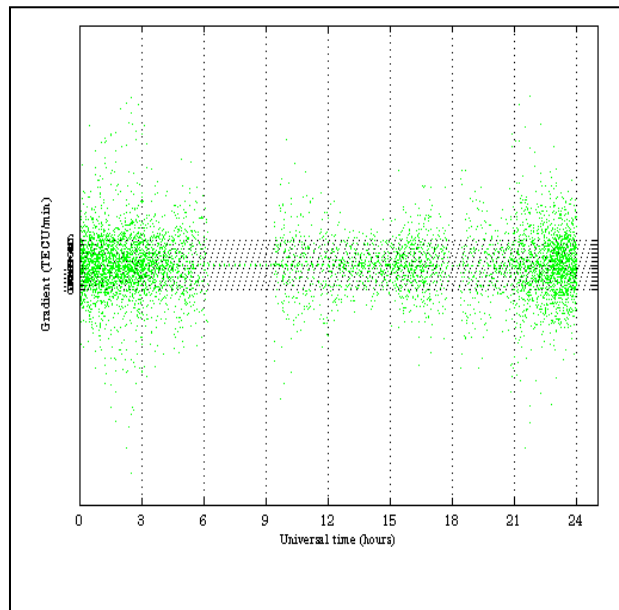
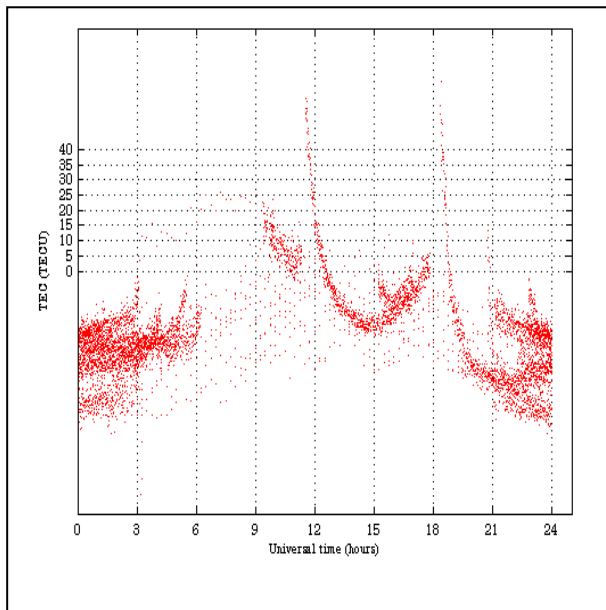
24/03/2013



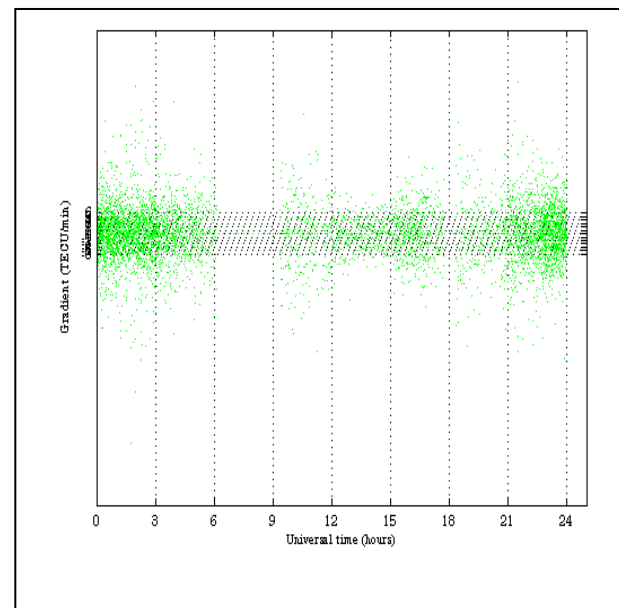
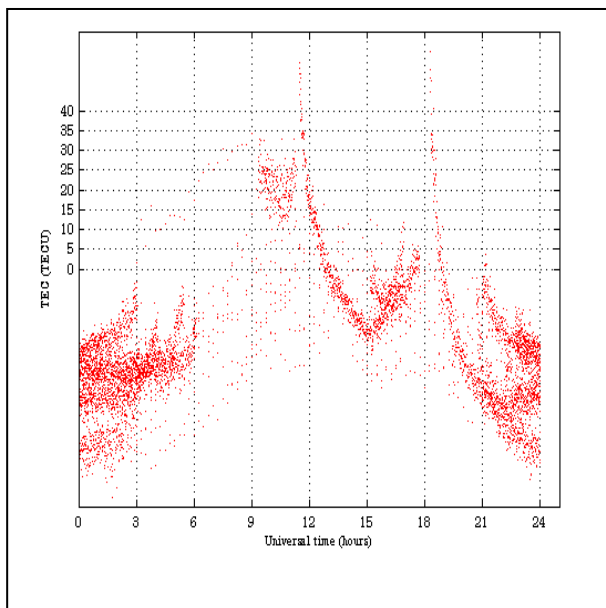
25/03/2013



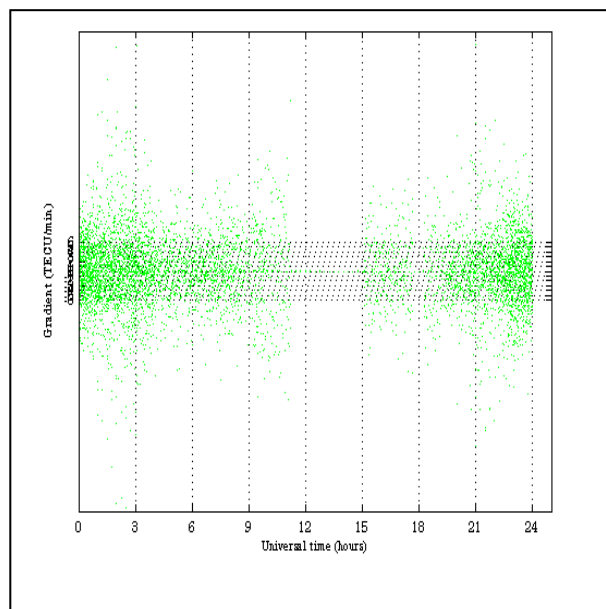
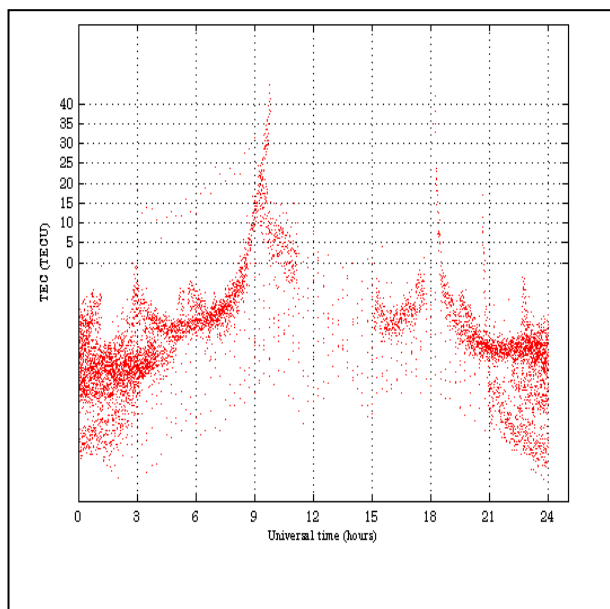
26/03/2013



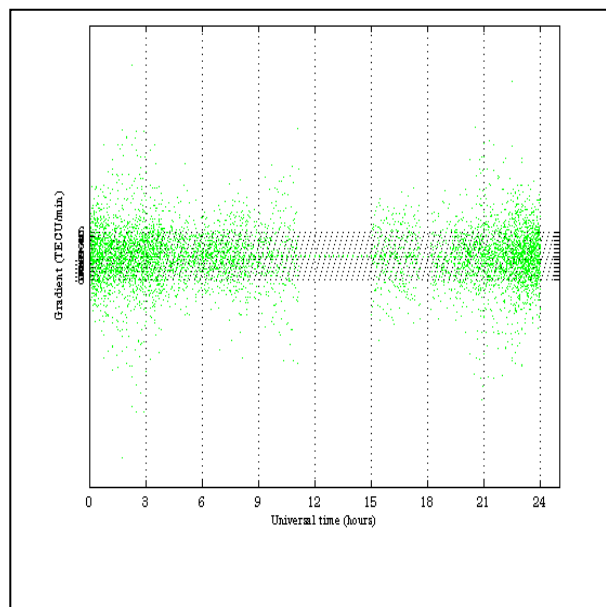
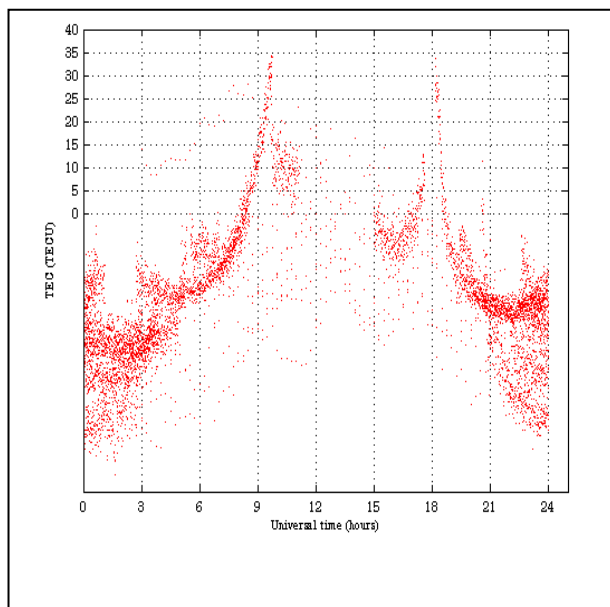
27/03/2013



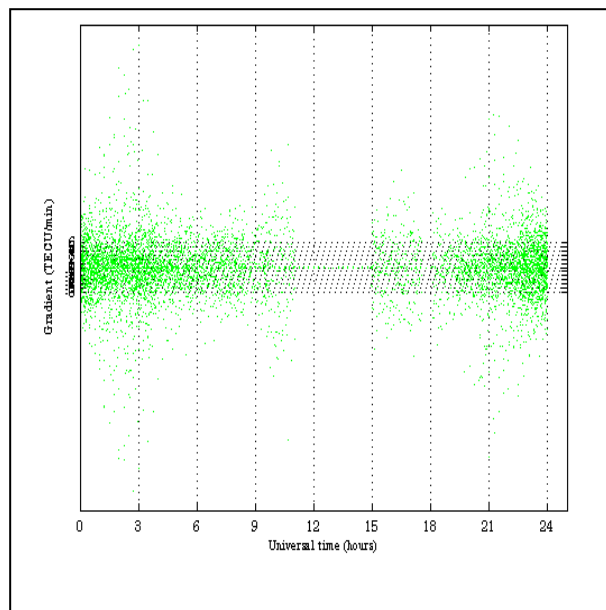
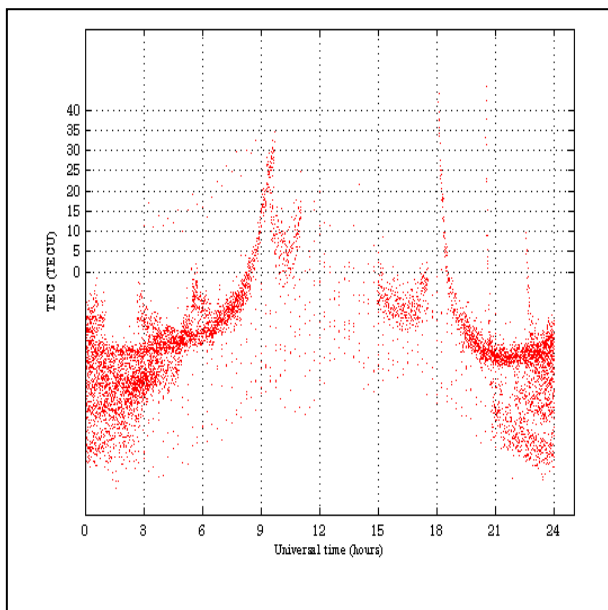
28/03/2013



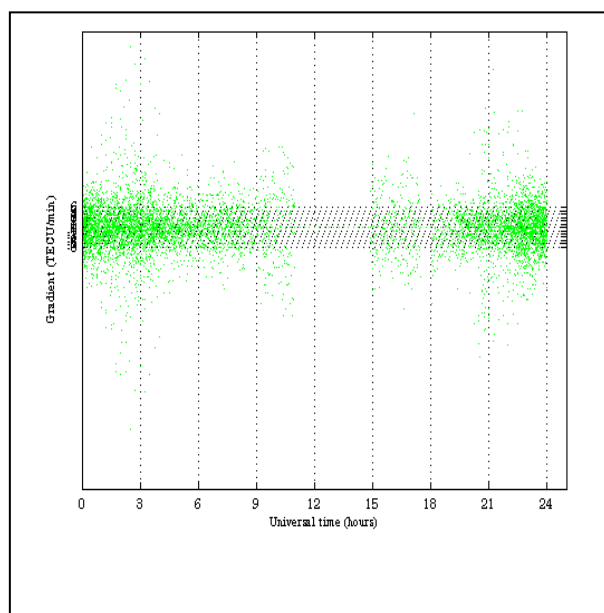
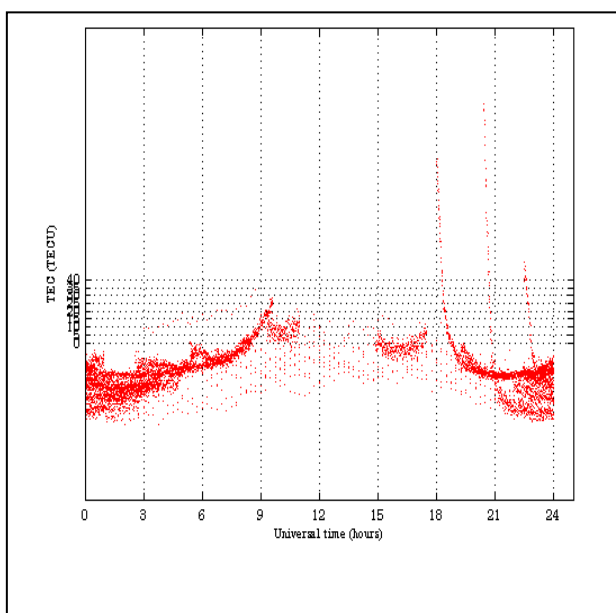
29/03/2013



30/03/2013



31/03/2013



Annexe C

Calcul des coordonnées du satellite GPS

B.1 Processus de calcul des coordonnées géocentriques d'un satellite GPS

Pour calculer les coordonnées du satellite, il doit y avoir tous les paramètres nécessaires aux calculs.

On sait que le mouvement du satellite est un mouvement relatif par rapport à la terre. Pour cela, il suffit de définir la position du satellite sur son orbite (repère relatif) et ensuite sa position par rapport au repère général terrestre.

B.1.1 Paramètres orbitaux

Lors de la détermination de l'orbite d'un satellite, il y a quatre éléments fondamentaux qui doivent être déterminés :

- La taille de l'orbite.
- La forme de l'orbite.
- L'orientation du plan orbital dans l'espace et de l'orbite dans son plan.
- La position du satellite sur son orbite.

Pour arriver à les connaître, les astronomes ont défini six éléments fondamentaux de l'orbite, appelés les COE (Classical Orbital Elements), ou encore les éléments de Kepler.

Le premier de ces éléments n'est autre que le demi-grand axe de l'ellipse " a ". Sa connaissance permet de connaître la taille de l'orbite.

Le deuxième élément est l'excentricité " e " qui permet de déterminer la forme de l'orbite ($e = 0$, cercle ; $0 < e < 1$, ellipse ; $e = 1$, parabole ; $e > 1$, hyperbole).

Le troisième élément est défini comme étant l'angle compris entre le plan orbital et le plan de l'équateur terrestre Fig(B.1) Cet angle, noté i , est appelé inclinaison.

A l'intersection du plan orbital du satellite et du plan de l'équateur se trouve une ligne, nommée ligne des nœuds. Les deux points où l'orbite franchit le plan de l'équateur sont les deux nœuds :

- Le nœud ascendant est le nœud où le satellite passe de l'hémisphère Sud à l'hémisphère Nord Fig(B.1).
- Le nœud descendant est le nœud où le satellite passe de l'hémisphère Nord à l'hémisphère Sud.

On définira donc le quatrième élément comme étant la longitude du nœud ascendant. Cet angle est noté par Ω et est mesuré par rapport à l'axe X qui est dirigé vers le point vernal Fig(B.1)

La connaissance du troisième et du quatrième élément (i et Ω) permet de déterminer l'orientation du plan orbital dans l'espace.

Le cinquième élément n'est autre que la position angulaire du périégée, qui est le point de la trajectoire du satellite le plus proche du centre de la Terre ; cette angle est compté par rapport au nœud ascendant dans la direction du mouvement du satellite, il est baptisé argument du périégée et est noté par ω Fig (B.1) Cet élément donne l'orientation de l'orbite dans son plan.

Le sixième élément fournit quant à lui la connaissance exacte de la position du satellite sur son orbite, c'est l'anomalie vraie. Elle est notée ν et est mesurée dans le sens de déplacement du satellite.

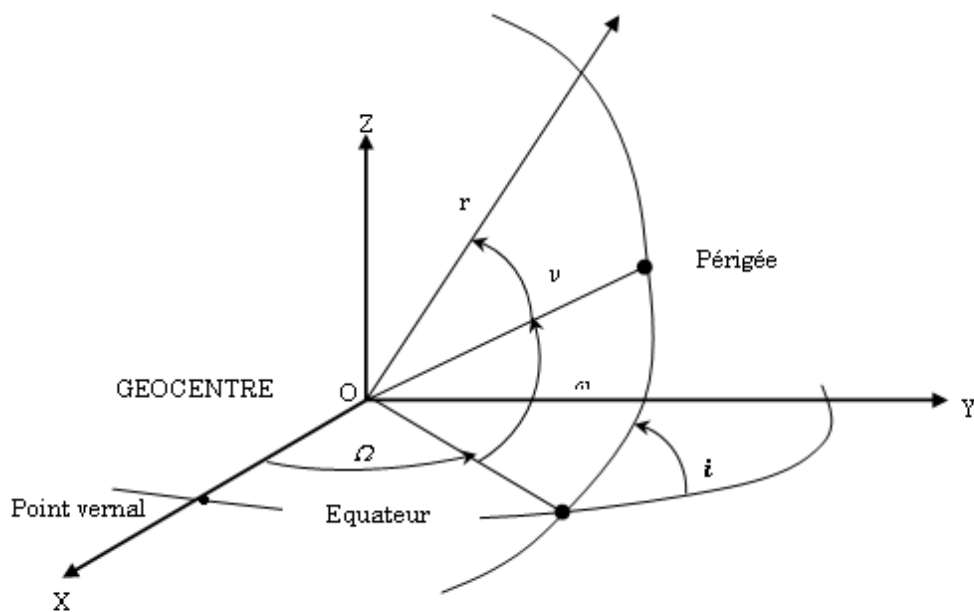
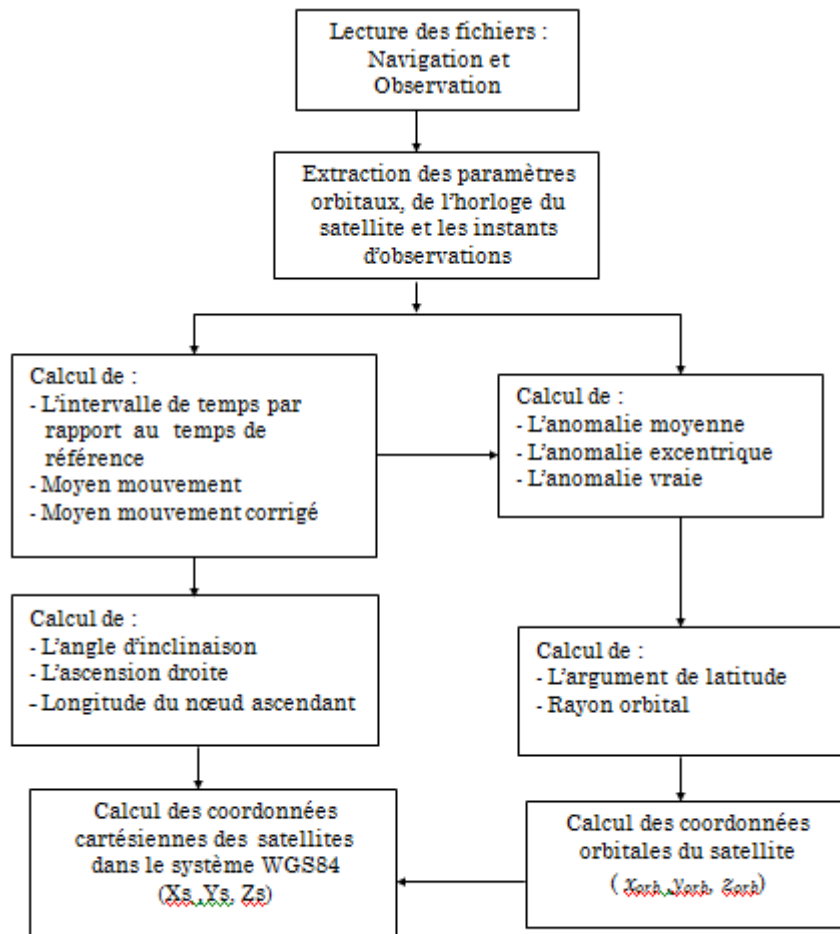


Figure (B.1) : Paramètres de l'orbite satellite

B.1.2 Organigramme de calcul des coordonnées du satellite GPS

Les coordonnées des satellites sont calculées pour chaque instant d'observation suivant cet organigramme :



B.1.3 Algorithme de calcul des coordonnées du satellite GPS

B.1.3 Algorithme de calcul des coordonnées du satellite GPS

La position du satellite GPS peut être déterminée dans le système de coordonnées géocentrique WGS84 en se basant sur les équations données par la suite.

Ainsi, on utilisera deux constantes ayant les valeurs suivantes

$$\mu = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m/sec}^2 \quad : \text{La constante géocentrique gravitationnelle.}$$

$$\dot{\Omega}_e = 7.292115167 \times 10^{-5} \text{ rad/sec} \quad : \text{La vitesse moyenne de rotation de la terre.}$$

Ces deux valeurs sont données pour le système WGS84, dans lequel les coordonnées du satellite sont calculées Tab (B.1).

$a = (\sqrt{a})^2$	Demi-grand axe de l'orbite
$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$	Mouvement moyen
$\Delta t = t - Toe$	Epoque par rapport au temps Toe
$n = n_0 + \Delta n$	Mouvement moyen corrigé
$M = M_0 + n \times \Delta t$	Anomalie moyenne
$M = E - e \times \sin E$	Equation de Kepler
$v = 2 \times \arctg \left[\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \times \tan \frac{E}{2} \right]$	Anomalie vraie
$u_0 = v + \omega$	Argument de latitude
$\Delta u = C_{uc} \cos(2u_0) + C_{us} \sin(2u_0)$	Correction de l'argument de latitude
$\Delta r = C_{rc} \cos(2u_0) + C_{rs} \sin(2u_0)$	Correction du rayon orbital
$\Delta i = C_{ic} \cos(2u_0) + C_{is} \sin(2u_0)$	Correction de l'inclinaison
$u = u_0 + \Delta u$	Argument de latitude corrigé
$r = a (1 - e \times \cos E) + \Delta r$	Rayon orbital corrigé
$i = i_0 + \Delta i + \dot{i} \Delta t$	Inclinaison corrigée
$\begin{cases} x_{orb} = r \times \cos(u) \\ y_{orb} = r \times \sin(u) \end{cases}$	Coordonnées orbitales
$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) \Delta t - \dot{\Omega}_e \times Toe$	Longitude du nœud ascendant corrigée
$\begin{cases} X_s = x_{orb} \cos(\Omega) - y_{orb} \cos(i) \sin(\Omega) \\ Y_s = x_{orb} \sin(\Omega) + y_{orb} \cos(i) \cos(\Omega) \\ Z_s = y_{orb} \sin(i) \end{cases}$	Coordonnées (WGS84) du satellite

Tab (B.1) : Algorithme de calcul des coordonnées du satellite dans le système WGS84