Télédétection, 2006, vol. 5, n°4, p. 325-338
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

CONTRÔLE DE L'ACTIVITÉ IONOSPHÉRIQUE À PARTIR DES DONNÉES GPS

Seddik BOUTIOUTA[1], Ahmed Hafid BELBACHIR[2] et Hichem DEKKICHE[3]

[1] Département de Radio Communication, Institut des Télécommunications d'Oran, B.P. 1518, El-Mnouar, Oran 31000, Oran, Algérie.
Courriel : Boutioutas@yahoo.fr
[2] Département de Physique, Faculté des Sciences, Université des sciences et de la technologie d'Oran, B.P. 1505, El'Mnouar, Oran 31000, Algérie.
Courriel : ahbelbachir@univ-USTO.dz
[3] Centre National des Techniques Spatiales, B.P. 13, Arzew, Algérie.

(Soumis le 16 septembre 2005 ; révisé le 2 février 2006 ; accepté le 29 mai 2006)

Le système GPS (Global Positioning System) est aujourd'hui l'outil privilégié pour se positionner avec une grande précision et sert également en tant que référence temporelle. Il est couramment utilisé pour le positionnement et la synchronisation des mesures. De nombreuses études ont montré que le GPS est également un outil efficace pour le contrôle de l'activité de l'ionosphère par la mesure du Contenu Électronique Total (CET) le long du trajet satellite Terre ainsi que pour estimer la quantité intégrée en vapeur d'eau dans l'atmosphère, quantité utile pour la climatologie. Par contre, le CET est une perturbation pour la précision de la localisation surtout pour la précision du positionnement en navigation quelle que soit sa nature terrestre, maritime ou aérienne. La précision et la résolution de l'ambiguïté des mesures de phases que l'on peut atteindre varient selon le dispositif GPS et la technique de mesure utilisés.
L'objectif de cet article est de présenter une méthode de détection de l'activité de l'ionosphère (Contenu Électronique Total (CET), ou en anglais « Total Electronics Contents (TEC) ») en utilisant des mesures GPS à partir des stations de références du réseau IGS (International GPS Geodynamics Service), par exemple, la station de Rabat « Rabt » au Maroc, dans le cas qui nous intéresse. On décrit la dépendance du CET, des perturbations ionosphériques et des orages magnétiques du cycle solaire et ce par l'observation d'une forte activité de l'ionosphère due à une forte activité solaire. L'activité ionosphérique est caractérisée par de fortes valeurs du CET qui ont été enregistrées les 1, 7, 9, 10, 20, 22, 23 et 25 janvier 2004.

Mots clés : GPS ; ionosphère ; modélisation ; CET ; positionnement ; activité solaire et magnétique.

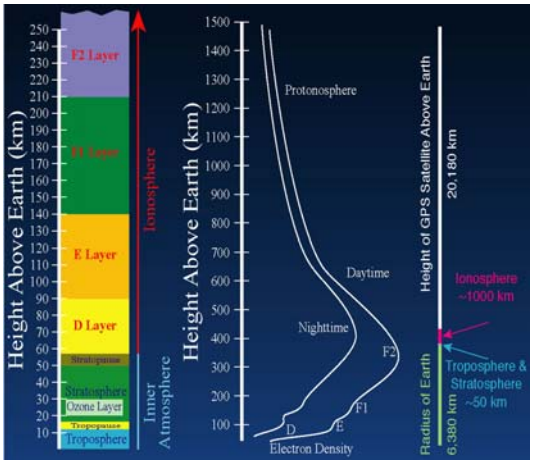
MONITORING IONOSPHERE ACTIVITY FROM GPS DATA

The Global Positioning System (GPS) is today the most readily used tool for positioning with a high degree of accuracy and is also useful as a temporal reference. It is usually used for the positioning and the synchronization of measurements. Numerous studies have shown that the GPS is also an effective tool for the control of the activity of the ionosphere through the measurement of the Total Electronic Content (TEC) along the satellite/Earth trajectory, as well as for estimating the quantity of water vapour integrated into the atmosphere, quantity which is useful in climatology. On the other hand, TEC introduces a disturbance to positioning precision especially in the case of navigational positioning whether terrestrial, maritime or aerial in nature. The precision and the resolution of the ambiguity of the phase measurements that can be expected vary according to the GPS device and the measurement technique used.
The work presented here presents a method for detecting the activity of the ionosphere (TEC) using GPS measurements obtained from the IGS (International GPS Geodynamics Service) network for the area under study (for example, the Rabat station « Rabt », in Morocco). We describe the dependence of the TEC, ionospheric disturbances and magnetic storms associated with the solar cycle and this through the observation of strong activity in the ionosphere due to strong solar activity. Ionospheric activity is characterized by strong TEC values, which were reached on the 1, 7, 9, 10, 20, 22, 23 and 25 of January 2004.

Keywords : GPS; ionosphere; modelling; TEC; positioning; solar and magnetic activity.

1. INTRODUCTION

Lors de leur traversée de l'atmosphère, les signaux émis par les satellites GPS subissent l'effet de la réfraction atmosphérique. Cet effet atmosphérique est une perturbation qu'il faut éliminer afin d'améliorer la qualité des observations GPS (code et phase) et pour obtenir des positions précises. D'autre part, l'effet de la réfraction atmosphérique sur les signaux GPS est caractéristique des propriétés de l'atmosphère (ionosphère et troposphère, figure 1).



Source : Stanford University.

FIGURE 1 : L'atmosphère terrestre. *The Earth's atmosphere.*

L'ionosphère est la partie haute ionisée de l'atmosphère terrestre ; elle s'étend d'environ 50 km jusqu'à 2000 km d'altitude. L'ionosphère est souvent répartie en deux couches principales : la couche inférieure désignée par la couche E (parfois appelée « Kennelly-Heaviside Layer »), comprise entre 80 et 113 km au-dessus de la surface de la Terre et qui réfléchit les ondes radio de fréquences basses, et une couche supérieure, appelée couche F (ou « Appleton Layer »), qui réfléchit les ondes radio les plus élevées ; celle-ci en contrepartie est divisée en deux couches, la couche F_1 qui se situe au-delà de 180 km au-dessus de la surface de la Terre, et la couche F_2 qui se situe au-delà de 300 km au-dessus de la surface de la Terre, présente le jour et qui se maintient la nuit malgré l'absence du terme de production. Elle est maintenue par les mouvements verticaux et surtout horizontaux de l'ionisation, ce qui entraîne un changement de ses caractéristiques réfléchissantes (Boutiouta, 1994). L'effet de la réfraction ionosphérique sur les signaux émis par les satellites GPS dépend du contenu électronique total (CET), c'est-à-dire du nombre d'électrons libres rencontrés par ces signaux lors de leurs parcours dans l'ionosphère ; la concentration en électrons libres dépend, entre autres, de l'activité solaire c'est-à-dire de la quantité de rayonnement solaire interceptée par l'ionosphère (figure 1).

Le retard ionosphérique, qui se traduit par un retard de groupe (allongement du temps de parcours satellite-récepteur dans le cas des mesures code) ou une avance de phase (raccourcissement du temps de parcours satellite-récepteur) dans le cas des mesures de phase, est compris entre 0 et 50 mètres et varie en fonction de l'agitation ionosphérique. L'ionosphère a une propriété très importante car c'est un milieu dispersif pour les fréquences qui nous intéressent. Le retard électronique dépend de la fréquence et donc l'utilisation de deux fréquences GPS va permettre d'éliminer le retard ionosphérique. Pour calculer les effets de l'ionosphère, la densité d'électrons libres le long du trajet de propagation satellite-récepteur doit être prise en considération (Total Electron Content Unit, 1 TECU = 10^{16} el / m^2).

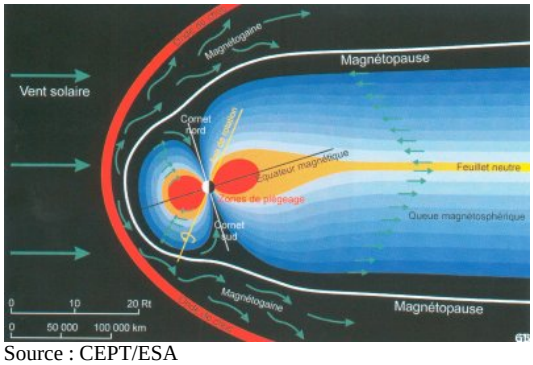
Compte tenu de sa grande variabilité spatiale et temporelle, la modélisation précise de l'ionosphère est difficile à réaliser. la troposphère (figure 1) est la couche inférieure de l'atmosphère terrestre ; elle s'étend du sol jusqu'à environ 8 à 15 km d'altitude. Elle produit une réduction variable de la vitesse de l'onde transmise, ce qui allonge le temps de parcours, c'est le retard troposphérique. L'effet de la réfraction troposphérique sur les signaux GPS dépend entre autres des conditions météorologiques : quantité d'humidité (vapeur d'eau), température sèche et pression ainsi que de l'élévation du satellite. L'erreur est minimum au zénith. La troposphère est un milieu non dispersif et le retard troposphérique ne dépend pas de la fréquence. Contrairement à l'ionosphère, cette erreur ne peut être annulée par la mesure de deux fréquences.

Dans le cas où la position du récepteur serait connue avec une bonne précision, et ce par comparaison de la distance géométrique satellite-récepteur de la station de référence (IGS) par rapport à la mesure de pseudo-distance (observation), les mesures GPS peuvent être utilisées pour calculer l'effet de la réfraction atmosphérique sur les signaux GPS. Dans ce cas, l'inconnue à résoudre n'est plus la position de l'observateur mais la perturbation atmosphérique qui elle-même dépend de paramètres tels que le contenu électronique total de l'ionosphère ou la quantité de vapeur d'eau dans la troposphère. C'est de cette manière que les signaux GPS permettent de déterminer le contenu électronique total ainsi que la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Le bruit atmosphérique devient une information utile aux météorologues et climatologues.

1.1 La magnétosphère

Grâce au grand nombre de satellites qu'y se trouvent dans l'espace, on peut étudier les lignes de champ géomagnétique dans l'espace environnant la Terre. Ce qu'on appelle « magnétosphère » de la Terre est l'espace où s'exerce le champ magnétique (Figure 2a). Celle-ci constitue une sorte de bouclier magnétique qui nous protège contre les particules (électrons, protons, ions) venant du Soleil. Elle ralentit et divise en effet ce « vent solaire » constitué de particules électrisées. La forme de cette

magnétosphère ressemble à l'onde de choc qui se produit à l'avant d'un bateau en mouvement sur l'eau : l'eau est comprimée par l'étrave à l'avant du bateau. À l'arrière, au contraire, l'eau forme une longue traînée. La structure est un peu analogue à celle des comètes lorsqu'elles sont près du Soleil. La magnétosphère terrestre présente toujours sa traîne à l'opposé du Soleil quelle que soit l'heure. Les lignes de champ s'ouvrent et se ferment lorsqu'elles passent du côté jour au côté nuit du fait de la rotation de la Terre.



Source : CEPT/ESA

FIGURE 2A : Les régions de la magnétosphère. *The magnetosphere regions.*

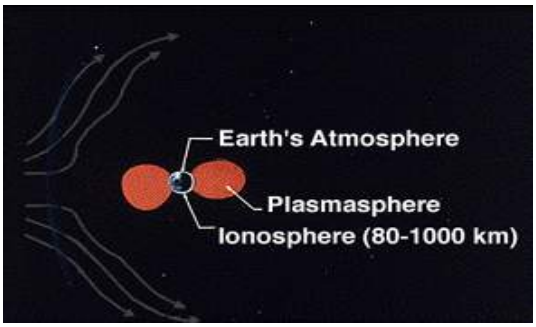
À une altitude d'environ 10 rayons terrestres (R_T), le vent solaire entre en contact avec le bouclier magnétique de la Terre. Le champ magnétique terrestre est un obstacle pour le vent solaire. À l'intérieur de ses limites, le champ magnétique de la Terre commande les mouvements des particules chargées. Puisque le vent solaire s'écoule très rapidement (à des vitesses supérieures aux vitesses des ondes magnétosonores et des ondes d'Alfvén, quand il rencontre l'obstacle magnétosphérique que représente la Terre, il se forme une onde de choc en amont (bow shock). Au niveau du choc, le vent solaire est ralenti à des vitesses subsoniques et échauffées, et il forme alors un plasma comprimé dans ce que l'on nomme la magnétogaine. La frontière externe de la magnétosphère du côté jour est aplatie et comprimée. Du côté nuit, le champ magnétique est étiré à plus de 60 rayons terrestres (R_T), bien au-delà de la Lune et forme ce qu'on appelle la queue magnétosphérique. La frontière de la magnétosphère s'appelle la magnétopause (Van Hauwaert et Deback, 2002).

1.2 Ondes d'Alfvén

Dans les plasmas où existe un champ magnétique, il existe des ondes qui propagent des modifications du champ magnétique. Il en existe trois types. L'onde d'Alfvén (découverte par Annes Alfvén vers 1940) propage un changement de direction du champ magnétique. Deux autres ondes, les ondes magnétosonores lentes et rapides, propagent une modification du champ magnétique associée à une modification de la pression (d'où leur épithète de magnétosonore). Ces ondes jouent un rôle extrêmement important dans les plasmas.

1.3 La plasmasphère

C'est une région de la magnétosphère qui est entraînée par la rotation de la planète sur elle-même. On dit que le plasma y est en co-rotation. C'est une région qui s'étend surtout aux basses latitudes. Dans le cas de la Terre, la plasmasphère (figure 2b) n'est pas très étendue. Dans le cas de Jupiter (champ magnétique fort et rotation rapide de la planète), la plasmasphère est une région vaste qui joue un rôle très important. La plasmasphère est une région de plasma froid (énergie des particules inférieure à 1ev). Elle contient essentiellement des protons (79 %), des ions d'hélium (20 %) et des ions d'oxygène. Cette zone s'étend de 4 à 6 rayons terrestres. À l'intérieur de la plasmasphère se situent également les ceintures de Van Allen.



Source : NASA

FIGURE 2B. La plasmasphère. *The plasmasphere.*

1.4 La scintillation ionosphérique

La scintillation ionosphérique est produite par des irrégularités à petite échelle de la densité d'électrons ionosphériques et peut perturber l'amplitude et la phase des signaux radio qui la traversent (déforme le trajet des ondes radioélectriques). De tels effets peuvent causer des évanouissements sévères (atténuation) du signal ou de rapides variations de phase qui dépassent l'aptitude d'un récepteur à démoduler le signal ; plusieurs cas de pertes de contrôle dans de telles conditions ont été rapportés (Nordwall, 1996). Parmi les autres effets solaires, l'activité dans l'ultraviolet (U.V) est une cause majeure de la turbulence ionosphérique.

Pour les signaux GPS, les effets ionosphériques majeurs qui proviennent de l'activité solaire dans l'ultraviolet sont : les retards de mesure ionosphérique, le fading d'amplitude (évanouissement) et les scintillations de phase. Le paramètre caractérisant l'intensité des fluctuations des signaux radioélectriques qui traversent l'ionosphère est l'indice de scintillation défini par S4, avec :

$$S_4 = \left[\frac{\langle A \rangle - \langle A \rangle}{\langle A \rangle} \right]^{1/2}$$

A = intensité du signal et $\langle\ \rangle$ = la moyenne

Pour une valeur de l'indice de scintillation S4 > 0,7, les récepteurs de navigation tendent à perdre de vue le signal, ce qui mène à une interruption des méthodes de navigation. En plus des amplitudes de scintillations, la phase des scintillations doit être prise en considération dans la conception des systèmes. L'agitation ionosphérique n'est pas constante dans le temps et varie en fonction des paramètres suivants :

- la latitude du point (lieu géographique) : l'ionosphère est plus agitée au pôle et à l'équateur ;
- l'activité solaire (cycle solaire) : tous les 11 ans, le Soleil connaît un pic d'activité pendant lequel les vents solaires (constitués de particules électriques) sont beaucoup plus violents et leurs interactions avec l'ionosphère la rendent beaucoup plus agitée ;
- la période de l'année (saison) et du jour ou de la nuit (heures/jours).

D'autre part, l'activité de scintillation ionosphérique devient plus significative à des latitudes basses, particulièrement immédiatement après le coucher du Soleil (Knight and Finn, 1996). De plus, les effets ionosphériques augmentent et diminuent en concordance avec le nombre de taches solaires. Durant les orages géomagnétiques et les perturbations ionosphériques associées, la scintillation ionosphérique peut entraver l'usage du GPS.

1.5 Indices et tempêtes magnétiques

Un indice consiste en une suite de valeurs discrètes destinées à fournir une information résumée, pertinente et fiable sur l'évolution dans le temps d'un phénomène. À un instant donné, la valeur de l'indice caractérise celle du phénomène étudié, ou plus précisément, sa valeur caractéristique durant un intervalle de temps donné. L'indice magnétique (Kp) est une mesure des variations du champ magnétique de la Terre basée sur les données d'un réseau d'observatoires géomagnétiques. L'indice Kp (de « planetarische Kennziffer » = index planétaire), numéroté de 0 à 9, est utilisé pour référer à l'activité géomagnétique pendant une période de 3 heures. Un indice Kp de 5 ou plus indique une activité géomagnétique de type tempête. L'indice Kp est décrit par des effets des particules solaires sur le champ géomagnétique. Il classifie sur une période de 3 heures le niveau de perturbation engendré par la composante instable du champ horizontal. Chaque niveau d'activité est en relation quasi logarithmique avec l'amplitude de la perturbation correspondante. Les indices mesurés toutes les trois heures permettent de discriminer les véritables perturbations du champ géomagnétique des variations produites par les courants ionosphériques. C'est la moyenne arithmétique des valeurs de K mesuré dans 13 observatoires (dont 1 seul pour l'hémisphère sud) qui donnent l'indice Kp. Une tempête géomagnétique affecte le champ magnétique de la Terre, alors qu'une tempête ionosphérique affecte les conditions des couches ionosphériques ionisées et cause finalement des perturbations aux systèmes de positionnement par satellite.

2. MODÉLISATION DE L'IONOSPHÈRE

Pratiquement, l'ionosphère est modélisée comme une couche sphérique à deux dimensions d'épaisseur infinitésimale ou, en d'autres mots, comme une coquille sphérique se situant à une altitude h_{iono} (hauteur IP) de 355 km (figure 3).

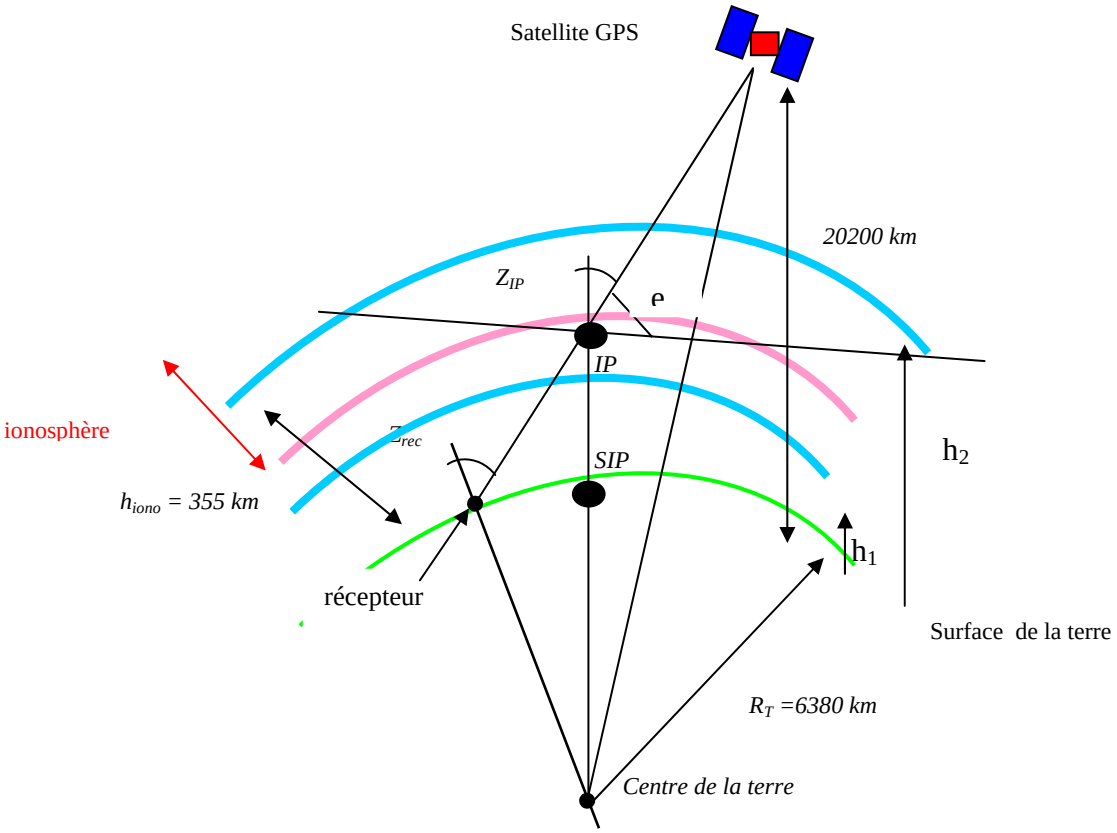


FIGURE 3 : Point ionosphérique et sub-ionosphérique. *Ionospheric and sub-ionospheric point.*

L'intersection entre la ligne de visée du satellite et cette coquille sphérique est appelée le point ionosphérique (représenté par le symbole déduit de la terminologie anglaise « IP : Ionospheric Point »), parfois aussi appelée point de Pierce (en anglais « IPP : Ionospheric Pierce Point »). La projection radiale du point ionosphérique sur la surface de la Terre s'appelle le point sub-ionosphérique (en anglais « SIP : Sub-Ionospheric Point »). Sur la figure 3, Z_{rec} et Z_{IP} représentent respectivement les angles zénithaux du satellite GPS tels qu'ils sont vus par le récepteur à un site donné et au point ionosphérique. R_T symbolise le rayon terrestre. Puisque ce satellite ne se trouve pas à la verticale du lieu d'observation, le contenu électronique total mesuré le long de cette ligne de visée est ramené à la verticale à l'aide de la fonction $(\cos(z_{IP}))^{-1}$(car les observations se font le long d'un trajet qui ne suit pas la verticale). L'effet de la réfraction ionosphérique sur les signaux GPS (les mesures de pseudo-distances : « codes » et les mesures de phases « porteuses ») se traduit par le retard de groupe dans la propagation des modulations « code » qui résulte en un allongement apparent de parcours, $I_P(t)$. D'autre part, la réfraction ionosphérique provoque une avance de phase dans la propagation des porteuses ou encore un raccourcissement apparent de leur parcours égal à $-I_P(t)$.

Pour une propagation à la verticale du lieu où le chemin pour lequel le temps de parcours est minimum (principe de Fermat), la correction ionosphérique dans ce cas sera égale à la longueur trajet curviligne moins la distance géométrique. Le temps requis par les signaux GPS code et phase pour aller des satellites aux récepteurs est une fonction du chemin (parcours), c'est-à-dire des paramètres définissant le parcours suivi entre les satellites et les récepteurs.

L'indice de réfraction de l'ionosphère a une très grande importance sur la propagation des signaux GPS et est modélisé d'après Appleton et Hartree (Schiffer, 1996) comme suit :

$$n = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{1}{2}\frac{\omega_P^2}{\omega^2} = 1 - \frac{C}{f^2}N_e$$

les indices de réfraction de phase et de groupe sont :

$$n_p = 1 + \frac{C_2}{f^2} + \frac{C_3}{f^3} + \frac{C_4}{f^4} + \ldots\ldots ; \quad n_g = 1 + \frac{C_2}{f^2} - 2f\frac{C_2}{f^3} = 1 - \frac{C_2}{f^2}$$

où :

$$X = \frac{\omega_P^2}{\omega^2} \; ; \; \omega_P^2 = \frac{e^2 N_e}{M \varepsilon_0} \; ;$$

$$C = \frac{e^2}{(8\pi^2 M \varepsilon_0)} \approx 40{,}3\left[m^3/s^2\right]$$

e = charge de l'électron
M = masse de l'électron
ε_0 = constante diélectrique (vide)
N_e = densité d'électrons /m^3 (Bilitza *et al.*, 1993)
ω_P = fréquence plasma (Belbachir, 1981), variant de 6 à 60 Mhz, très petite devant la fréquence GPS (ω).
Après tous les calculs, l'indice de réfraction est donc :

$$n = 1 - \frac{C}{f^2} N_e = 1 - \frac{40{,}3}{f^2} N_e$$

La réfraction ionosphérique pour les deux cas de mesures (phase porteuse et groupe « modulations ») est :

$$I_{phase}(t) = -\frac{40{,}3}{f} \int_{chemin(sat-rec)} N_e ds \; ;$$

$$I_{groupe}(t) = \frac{40{,}3}{f} \int_{chemin(sat-rec)} N_e ds$$

En fait, la valeur absolue de la réfraction ionosphérique est la même pour les porteuses que pour les modulations, mais son signe est différent, elle devient :

$$I_{rec}^{sat}(t) = \frac{40{,}3}{f} \int_{chemin(sat-rec)} N_e ds$$

Le contenu électronique total CET ou TEC, le long de la ligne de visée du récepteur (j) vers le satellite GPS (i) est :

$$TEC_j^i = \int_{chemin(sat-rec)} N_e ds$$

La relation de la réfraction ionosphérique et du TEC est donc :

$$I_{phase}(t) = -\frac{40{,}3}{f} TEC \; ; \; I_{groupe}(t) = \frac{40{,}3}{f} TEC$$

À vrai dire, la quantité :

$$TEC_j^i = \int_{chemin(sat-rec)} N_e ds$$

représente le contenu électronique total oblique le long de la ligne directe, (Slant Total Electrons Content « STEC ») en électrons/m², entre le récepteur terrestre (j) et le satellite (i).
On note donc :

$$TEC_j^i = \int_{chemin(sat-rec)} N_e ds = \text{STEC.} \; ;$$

donc :

$$I_j^i(t) = \frac{40{,}3}{f} .STEC$$

On note aussi le contenu électronique total ramené à la verticale par :

$$TEC_{j,vertical}^i . = VTEC.$$

À la verticale et à l'aide de la fonction $(\text{Cos}(Z_{IP}))^{-1}$, l'effet de la réfraction ionosphérique devient :

$$I_j^i(t) = \frac{40{,}3}{f \, Cos(z_{ip})} .VTEC$$

Cette manière de procéder néglige l'effet des gradients horizontaux dans l'ionosphère. Il est à noter qu'en pratique la fonction $(Cos(z_{IP}))^{-1}$ devient de moins en moins réaliste lorsque l'angle, Z_{ip} ,croit. Pour cette raison, toutes les mesures correspondant à des angles zénithaux Z_{rec} supérieurs à 70 ° sont rejetés dans les calculs. Il est à remarquer que le $VTEC$ obtenu de cette manière n'est pas représentatif de l'ionosphère au-dessus du récepteur GPS (site), mais bien de l'ionosphère située à la verticale du point sub-ionosphérique.
Ceci est valable pour une observation vers un satellite à une époque donnée. Dans notre cas, précisons que l'observation se fait simultanément vers plusieurs satellites et à plusieurs époques. On obtient donc un échantillon d'observations que l'on peut combiner avec des mesures d'autres stations pour connaître l'ionosphère au-dessus d'une région donnée.

3. MÉTHODOLOGIE

L'une des caractéristiques importantes de l'ionosphère est qu'elle disperse l'énergie électromagnétique des signaux radio électriques dans la bande L (Boutiouta, 1994). Les satellites GPS émettent actuellement deux signaux dans la bande L appelés L_1 et L_2 de fréquences radio f_1=1575,42 Mhz et f_2=1227,6 Mhz et de longueur d'ondes λ_1 = 19 cm et λ_2 = 24,4 cm respectivement ; ces signaux L_1 et L_2 sont principalement polarisés en circulaire droite (mode RHCP : Right Hand Circular Polarization), ce qui permet la naissance

d'ondes ordinaires (mode de propagation positif) et d'ondes extraordinaires (mode de propagation négatif), qui subissent différentes perturbations (erreurs). Cette propriété de l'ionosphère peut être exploitée pour la détermination de ces erreurs en utilisant les mesures de récepteur bi-fréquences (type géodésique). Le calcul du CET est biaisé par plusieurs erreurs telles que : les décalages d'horloge récepteur et satellites, erreurs de propagation troposphérique et ionosphérique, bruit du récepteur et les trajets multiples (Sardon *et al.*, 1994). Les ordres de grandeur de ces erreurs sont montrés dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : Sources d'erreurs GPS et ordre de grandeur. *GPS error sources and magnitude.*

Source d'erreurs	Ordre de grandeur
Décalages d'horloge (récepteur et satellites)	3,0 m
Ionosphère (perturbée)	4,0 m
Troposphère	0,7 m
Trajets multiples	1,4 m
Bruit du récepteur	0,5 m

Plusieurs méthodes de corrections précises des erreurs sur le GPS existent ; prenons par exemple les erreurs de l'ionosphère. Pour les corrections précises du retard de groupe ou d'avance de phase des signaux de navigation par satellite GPS, on cite à titre indicatif trois méthodes :

- L'utilisation d'un modèle ionosphérique à 8 paramètres (modèle de Klobuchar) et les paramètres inclus dans le message de navigation.
- La transmission du signal de mesure de distance sur deux fréquences indépendantes, ce qui permet par l'effet dispersif de propagation à travers un plasma d'estimer le CET à partir du retard différentiel.
- La création de stations (récepteurs) de référence sur des sites de localité (coordonnés) connus qui mesurent les erreurs de mesure dues au retard ionosphérique (comme pour les éphémérides et les erreurs d'horloge) et qui les transmettent aux récepteurs mobiles.

Il est difficile de trouver un modèle TEC satisfaisant à cause de la dépendance de l'influence des variations temporelles. La méthode la plus efficace est d'éliminer l'effet de la réfraction ionosphérique par l'utilisation de deux signaux avec différentes fréquences. Cette dualité de fréquences est la principale raison de l'utilisation de deux fréquences par le système GPS. Les systèmes de positionnement précis (centimétriques, mesures de phase porteuse) par satellite fonctionnent donc avec deux fréquences principalement pour pouvoir déterminer le retard ionosphérique. Les deux types de mesure suivants sont utilisés : la pseudo-distance P^i_j et la phase porteuse L^i_j .
La pseudo-distance P^i_j et la phase porteuse L^i_j GPS pour les fréquences f_1 et f_2, en unités de distance peuvent être exprimées (Al'pert, 1973 ; Klobuchar, 1996 ; Liu *et al.*, 2000 ; Gao and Liu, 2002) par :

$$P^i_{1,j} = \rho^i_j + I^i_{ion,1,j} + d^i_{trop,j} + c(\tau^i - \tau_j) + d^i_{ins,1} + d_{ins,1,j} + d^i_{orb} \quad (1)$$

$$P^i_{2,j} = \rho^i_j + I^i_{ion,2,j} + d^i_{trop,j} + c(\tau^i - \tau_j) + d^i_{ins,2} + d_{ins,2,j} + d^i_{orb} \quad (2)$$

$$L^i_{1,j} = \lambda_1 \phi^i_{1,j} = \rho^i_j - I^i_{ion,1,j} + d^i_{trop,j} + c(\tau^i - \tau_j) - \lambda_1 b^i_{1,j} \quad (3)$$

$$L^i_{2,j} = \lambda_2 \phi^i_{2,j} = \rho^i_j - I^i_{ion,2,j} + d^i_{trop,j} + c(\tau^i - \tau_j) - \lambda_2 b^i_{2,j} \quad (4)$$

où

les indices i et j représentent le satellite et le récepteur GPS respectivement.
ρ^i_j : distance vraie entre le récepteur et le satellite ;
I_{ion} : effets de l'ionosphère ;
d_{trop} : effets de la troposphère ;
c : vitesse de la lumière en espace libre ;
τ : décalage d'horloge récepteur « inconnu » et satellite « connu : modélisé et contenu dans le message de navigation GPS » ;
d_{ins} : biais instrumental du satellite et récepteur ;
d_{orb} : erreur de l'orbite (forme générale) ;
λ : longueur d'onde de la porteuse ;
ϕ : phase de la porteuse entre le récepteur et le satellite ;
b : saut de cycle de la phase porteuse.

L'ambiguïté de cycle est liée à la méconnaissance du nombre de cycles entiers parcourus par la phase sur chacune des fréquences au premier instant où le signal du satellite est reçu par le récepteur. On utilise les mesures de phase pour obtenir une précision de l'ordre du millimètre. Le problème est qu'il est impossible de mesurer à un instant donné le nombre de cycles entre le satellite et le récepteur. On ne peut mesurer que la partie fractionnaire de la phase à un instant donné et le nombre de cycles entre deux instants. La mesure de la phase est donc une mesure de variation de distance entre le satellite et le récepteur entre deux instants.
Un autre problème limitant la précision des calculs GPS avec les phases sont les sauts de cycle.

Le saut de cycle est une discontinuité dans l'enregistrement des phases qui donne entre deux époques un nombre de cycles aberrant. Tous les logiciels aujourd'hui disposent de programmes qui détectent et corrigent les sauts de cycle. Parmi les techniques utilisées pour l'élimination des erreurs dans le GPS, signalons la technique des différences. On utilise la différence simple pour éliminer les corrections d'horloge satellite et certaines erreurs systématiques (instrumentales), la différence double pour éliminer la correction d'horloge récepteur et la différence triple pour éliminer l'ambiguïté des sauts de cycle.
La manipulation des équations 1, 2, 3 et 4 permet l'élimination des effets troposphériques dans les mesures de phase porteuse et de pseudo-distance.
Les effets ionosphériques en terme de contenu électronique total oblique le long de la ligne directe, STEC en électrons/m², entre le récepteur terrestre (j) et le satellite (i) peut être exprimé par :

$$I_{ion} = \rho^* - \rho_0 = \int_j^i (n_g - 1) ds = \frac{40{,}3}{f^2} \int_j^i N_e \, ds = \frac{40{,}3}{f^2} STEC \qquad (5)$$

où :
ds = longueur infinitésimale du chemin de propagation de l'onde radio (abscisse curviligne) ;
ρ^* = distance virtuelle entre le récepteur et le satellite ;
ρ_0 = distance réelle entre le récepteur et le satellite ;
n_g = indice de réfraction de groupe ;
N_e = densité d'électrons (concentration en électrons/m^3) ;
f = la fréquence de l'onde radio en Hz.

On peut éliminer l'effet du TEC par une combinaison de fréquences f_1 et f_2, démarche en général décrite dans la plupart des livres sur les GPS.
Après tout calcul fait par la manipulation des équations 1, 2, 3, 4 et 5, on obtient le contenu électronique total oblique comme suit:

$$STEC = \frac{1}{40{,}3} \frac{f_1^{\,2} f_2^{\,2}}{f_1^{\,2} - f_2^{\,2}} (P^i_{2,j} - P^i_{1,j} - k^i - k_j), \qquad (6)$$

$$STEC = \frac{1}{40{,}3} \frac{f_1^{\,2} f_2^{\,2}}{f_1^{\,2} - f_2^{\,2}} (\lambda_1 \phi^i_{2,j} - \lambda_2 \phi^i_{2,J} + A^i_j) \qquad (7)$$

où :
$K^i = d^i_{ins,2} - d^i_{ins,1}$, $K_j = d_{ins,2,j} - d_{ins,1,j}$ et

$$A^i_j = (P^i_{2,j} - P^i_{1,j}) + (\lambda_2 \phi^i_{2,j} - \lambda_1 \phi^i_{1,j}) - (k^i - k_j) \qquad (8)$$

Quoique l'équation 5 puisse nous donner directement le TEC, à cause de la longueur du pseudo-code, la précision du STEC est relativement faible (précision de la pseudo-distance). On doit utiliser par après l'équation 6 pour obtenir une meilleure précision du STEC.
Le STEC peut être obtenu comme indiqué précédemment. Cependant, il a été démontré qu'il est préférable d'ajuster mathématiquement le STEC au TEC observé au point sub-ionosphérique (SIP), (Radicella *et al.*, 2004) qui est le point de référence pour le contenu électronique total vertical (VTEC) ; avec

$$VTEC = STEC.S(e) \qquad (9)$$

$S(e)$ est la fonction oblique (figure 3) donnée par (Sover and Fanselow, 1987) :

(10)

$$S(e) = \frac{\sqrt{R_r^2 Sin\, e) - R_r^2 + (R_T + h_1)^2} - \sqrt{R_r^2 \sin e) - R_r^2 + (R_r + h_2)}}{h_1 - h_2}$$

où : e est l'élévation du satellite ; h_1 et h_2 sont les hauteurs la plus basse et la plus haute des couches de l'ionosphère respectivement et R_T est le rayon principal de la Terre (figure 3). Il est à noter que la fonction $S(e)$ dépend principalement de la hauteur de la couche principale de l'ionosphère,

$$h_m = (h_1 + h_2)/2.$$

Davies (1990) a indiqué que h_m varie entre 300 et 450 km. Cependant, d'autres chercheurs considèrent qu'elle se limite entre 300 et 400 km. Par souci de simplicité, Sardon *et al.* (1997) ont assumé que h_m est égale à 355 km (figure 3). Afin de minimiser le décalage temps et de réduire les erreurs indésirables, l'angle d'élévation de coupure (cut-off elevation angle) pour chaque récepteur GPS est de 20 °. La procédure et la démarche algorithmique sont montrées sur les figures 4 et 5 et expliquées par la suite.

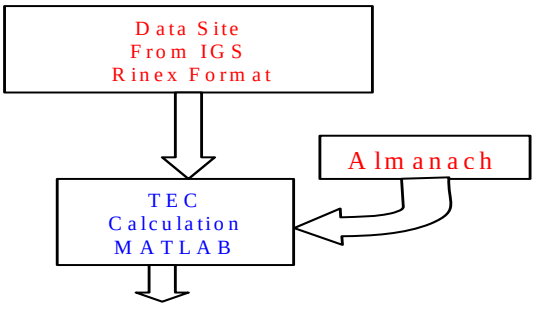


FIGURE 4 : Procédure de calcul du TEC. (*Procedure for computing the TEC*).

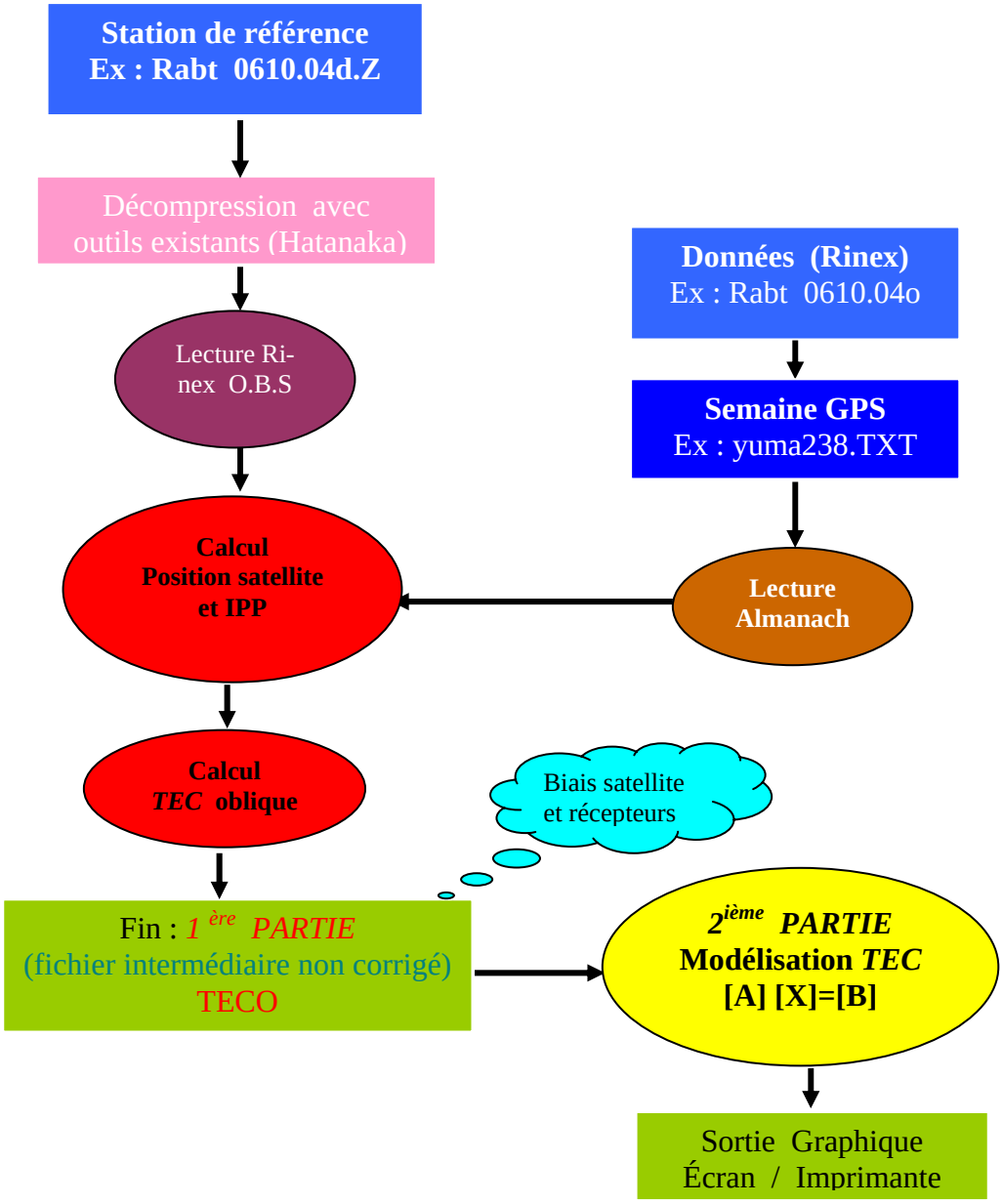


FIGURE 5 : Algorithme de calcul du TEC. *TEC Algorithm calculation.*

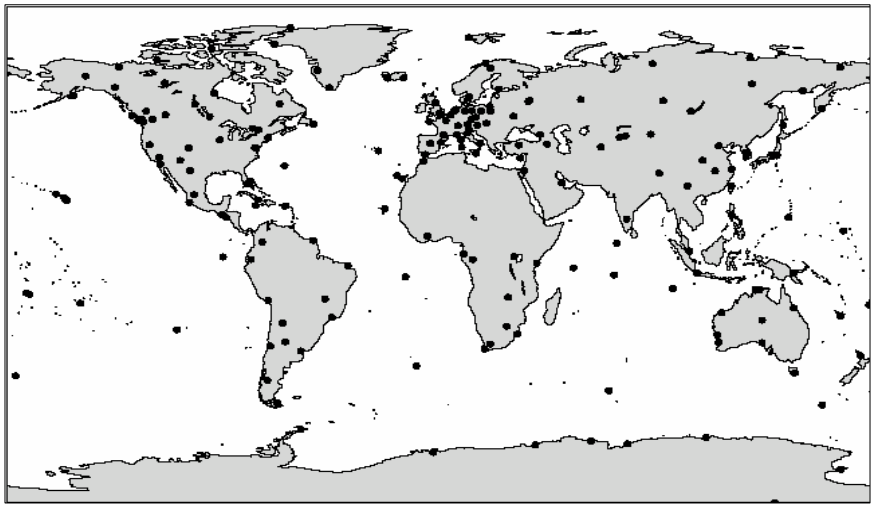
4. TRAITEMENT DES DONNÉES ET ANALYSE DES RÉSULTATS

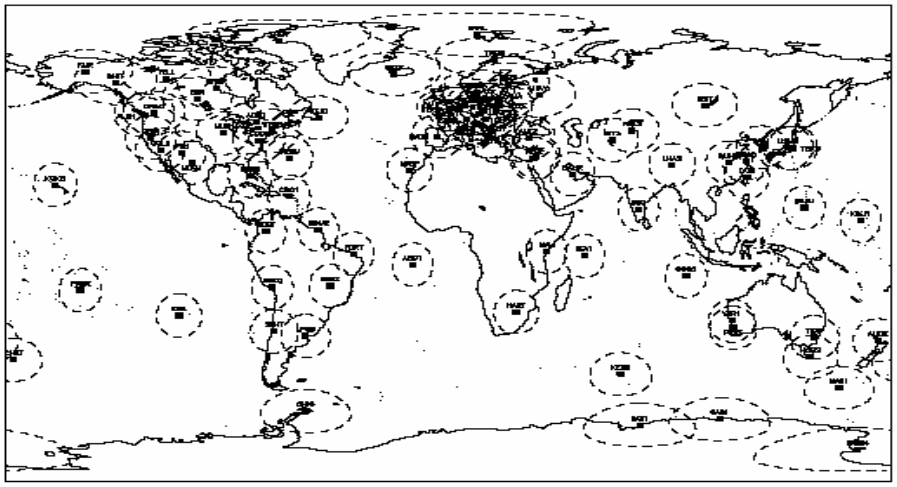
Nous avons utilisé les coefficients du modèle ionosphérique CODE (centre for Orbit Determination in Europe). Le CODE (Schaer, 1997) est responsable de la publication des cartes ionosphériques. Il est l'un des centres d'analyse de l'IGS et il fournit les orbites (GPS) précises, les paramètres d'orientation de la Terre, les coordonnées des stations (GPS) ainsi que d'autres paramètres géophysiques d'intérêt sur une base journalière en utilisant la combinaison linéaire ionosphère-free de la double différence des observations de phase porteuse GPS. Le Centre produit des cartes de l'ionosphère global (GIMs) depuis le 1er janvier 1996 comme produit additionnel, en analysant la combinaison linéaire géométrie-free, qui contient l'information sur la réfraction ionosphérique.

Pour chaque jour, un ensemble de coefficients TEC est déterminé, ce qui donne une approximation de la distribution moyenne du VTEC à une échelle globale. Les GIMs sont utilisées dans le traitement CODE pour améliorer la résolution de l'ambiguïté initiale de phase porteuse.

Une approche de modélisation du TEC à partir des stations IGS (Global Ionosphere Maps produites par le CODE) a été utilisée. Nous avons pris les mesures GPS de la station IGS de « Rabat » au Maroc. Nous avions également besoin des almanachs pour calculer la position des satellites et des points sub-ionosphériques pour développer un modèle régional limité autour de la station. Le modèle régional est construit en raison du fait que les réseaux des stations GPS de référence (IGS) distribuées à l'échelle régionale avec des lignes de base de plusieurs centaines de kilomètres sont utilisées aujourd'hui pour créer des corrections ionosphériques pour des utilisateurs dans ces régions (RADGPS : Regional Area Differential GPS ou « Réseau régional GPS Différentiel »). Depuis un certain moment, le positionnement GPS utilisant les réseaux RADGPS a suscité un grand intérêt dans la communauté du GPS. On espère que la précision de la restitution du TEC vertical (VTEC) pourra être considérablement améliorée dans ce cas, en plus de la configuration condensée des stations GPS de référence qui a amélioré la résolution de restitution de l'ionosphère. L'objectif de cette modélisation est de trouver un modèle et une méthode d'estimation de l'activité de l'ionosphère (TEC) en se basant sur un réseau GPS régional capable de fournir des corrections ionosphériques précises et d'assurer le positionnement et la navigation avec une précision acceptable.

Les mesures de la station de Rabat sont intégrées pour développer un modèle (sur une région précise en Méditerranée) pour l'estimation de l'ionosphère en utilisant des réseaux GPS régionaux (RADGPS) et à l'échelle du globe existants, c'est-à-dire dans notre cas les stations EPN et IGS. Le réseau EPN (European Permanent Network) regroupe aujourd'hui plus de 150 stations en Europe. Il faut noter aussi qu'en 2005, le Centre d'analyse CODE traite les données d'environ 350 stations à l'échelle du globe qui sont distribuées à travers le monde (figure 6).





Source : CODE / AIUB

FIGURE 6 : Stations GPS considérées par CODE. Échelle graphique :1/1. *GPS stations considered by CODE.*

La figure 6 montre les stations utilisées par le CODE. Les cercles montrent les endroits où le TEC a été déterminé. Le CODE GIM (Global Ionosphere Maps ou CODG) est basé sur un modèle à une seule couche ou couche mince. Ce modèle assume que les électrons libres sont concentrés dans une échelle sphérique à couche mince infinitésimale. Le diamètre de chaque surface cellule est de plus de 2 000 km tandis que l'angle de coupure est de moins de 20 °. Le contenu électronique total oblique est converti par la suite en contenu électronique total vertical « STEC to VTEC » (Fernandez, 2004).

Dans notre étude, nous avons pris le cas d'une zone près de la région d'Oran en Algérie (latitude 35° 39' 50" et longitude 0° 38' 08"), qui se situe à une distance de l'ordre de 300 km de Rabat, et nous avons utilisé des mesures d'une durée d'un mois (janvier 2004). Après avoir téléchargé les mesures concernant la période indiquée, la procédure de calcul du TEC a consisté à décoder les données de mesure des stations GPS (IGS) et à implanter sur Matlab l'algorithme de modélisation (figure 5). Chaque fichier (message de navigation) contient en début de fichier un en-tête et un bloc d'information, l'en-tête comportant des informations globales sur le fichier entier. Chaque fichier d'observations contient les données d'un site et d'une session. Le fichier est en format RINEX (Receiver Independent Exchange) et se présente comme suit **:** SSSSdddf.yyt. Ce fichier est récupéré sur le site web du GPS Data Archive (http://www.ngs.noaa.gov/GRD/grddatasoftware.shtml) et se présente sous une forme à trois champs. Par exemple, le fichier « Rabt0420.04d.Z », en format compressé doit être décompressé à l'aide de la procédure de Hatanaka (Hatanaka, 1998), c'est-à-dire que le fichier d'entrée à trois champs va devenir à la sortie un ficher à deux champs ; par exemple, à l'entrée le fichier Rabt0420.04d.Z devient à la sortie : Rabt0420.04. Les codes d'information sont les suivants : ssss = 4 character station name designator ; ddd = day of the year of first record ; f = file sequence number within day ; yy = year et t = file type ; 0 : file contains all the existing data of the current day ; O : Observation file ; N : Navigation file ; M : Meteorological data file ; G : GLONASS Navigation file et H : Geostationary GPS payload nav mess file.

Hatanaka a élaboré les procédures compresse/décompresse intitulées « rnx2crx et crx2rnx ». Celles-ci permettent à l'utilisateur de récepteurs GPS de compresser et décompresser les fichiers RINEX OBS en fichiers de format ASCII de petite taille. La compression et la décompression de Hatanaka sont ainsi une forme de compression propre aux observations GPS. La procédure s'opère suivant l'algorithme développé par Hatanaka lui-même. La compression est basée sur les fortes corrélations qui existent entre les mesures de phase ou de pseudo-distance relative à des époques consécutives. Pour réduire la taille des fichiers, on remplace les observations répétées par des observations codées. La procédure de calcul (figure 4) passe par la lecture du message de navi-

gation (en-tête), puis par un algorithme pour le calcul du TEC (figure 5). Les différentes étapes pour la réalisation de cette procédure sont :

1. Le téléchargement des fichiers d'observations sous format RINEX (Hatanaka) à partir du site de l'IGS ;
2. Le téléchargement du logiciel de décompression de Hatanaka ;
3. La décompression des fichiers RINEX ;
4. Récupération de l'almanach sur le site web (fichier : yuma.txt) ;
5. La réalisation d'un programme sur Matlab pour la lecture des grandeurs d'observations à partir de ces fichiers ;
6. L'implantation de l'algorithme sur Matlab 6.5 édition 13 pour le calcul du modèle TEC local.

Pour l'algorithme de calcul du TEC (figure 5), le calcul du TEC oblique passe donc par les étapes suivantes :

1. Lecture OBS (fichier Format RINEX) ;
2. Lecture Almanach (fichier : yuma.txt);
3. Calcul des coordonnées du point ionosphérique de Pierce (*IPP*) ;
4. Calcul des coordonnées du satellite.

Le produit de la première partie est un résultat intermédiaire non corrigé (fichier intermédiaire non corrige : TEC oblique avec les erreurs Ionosphère, Troposphère, Biais horloge satellite et récepteurs). On trouve ensuite les biais satellite et récepteurs sur le Web (fichier journalier) pour la correction. Les résultats sont montrés sur la figure 7. Le résultat de la période traitée montre bien une activité particulière pour les jours 1, 7, 9, 10, 20, 22, 23 et 25. Afin d'interpréter l'évolution du TEC, nous avons cherché les indices magnétiques sur le Web et nous avons fait l'interprétation suivante : la variation du TEC pendant ce mois est fonction de l'activité magnétique car, si l'on regarde l'indice magnétique Ap pour la période traitée, on observe un gros orage magnétique (valeurs très importantes).

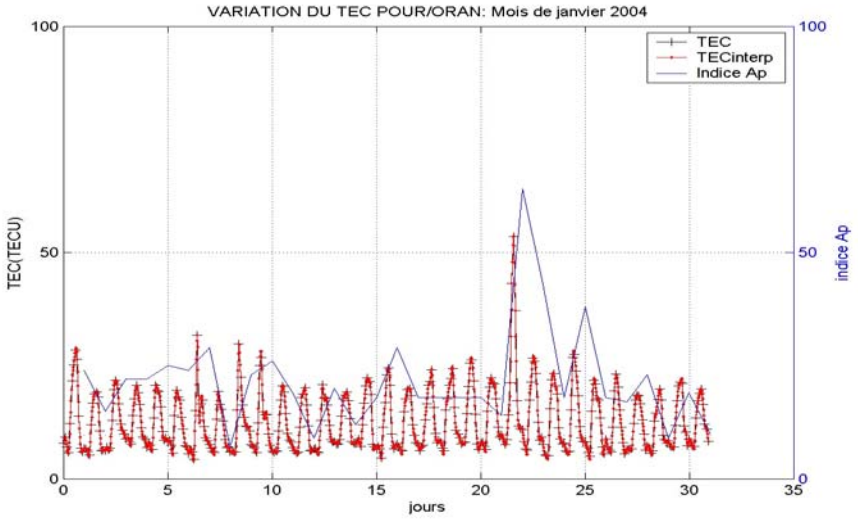


FIGURE 7 . Variation du TEC pour la ville d'Oran, mois de janvier 2004.
(TEC variation for the city of Oran for the month of January 2004).

Le pic de TEC est donc une phase positive de l'ionosphère en réaction à la perturbation magnétique qui est en relation directe avec l'activité solaire connue, avec un cycle de 11 ans. Le plus récent pic d'activité solaire a eu lieu en décembre 2001 et nous sommes depuis lors en phase décroissante d'activité. La morphologie du TEC lors d'une perturbation magnétique est de phase négative au printemps, en été et à l'automne, et de phase positive en hiver (sauf si l'orage magnétique est fort et, dans ce cas, il y a une phase négative).
Pour quantifier l'activité géomagnétique deux indices sont définis, l'indice A et l'indice K, qui représentent les perturbations du champ magnétique mesurées aux 3 heures. En ce qui nous concerne, nous avons utilisé l'indice K_p (plané-

taire) et l'indice A_p (planétaire) pour faire l'interprétation de nos résultats. Les conditions géomagnétiques en fonction des indices K_p et A_p sont présentées sur les tableaux 2 et 3.

TABLEAU 2 : Variation du TEC.
(TEC variation).

Jours	Indice A_p	Valeurs TEC (TECU)
01	24	29
07	29	32
09	23	30
10	26	28
20	18	27
22	64	54
23	43	27
25	38	28

TABLEAU 3 : Indices Kp et Ap.
(Kp and Ap indexes).

Indice K_p	Indice A_p	État du champ géomagnétique
< 4	< 10	calme
4	> 10 et < 20	instable
> 4	> 20 et < 40	tempête géomagnétique (apparition d'aurores boréales)

5. CONCLUSION

Ce travail traite de l'activité de l'ionosphère (TEC) et de ses relations avec les orages magnétiques et les observations GPS. Il présente le contrôle du TEC au-dessus de la région d'Oran à partir des données GPS collectées à partir du réseau IGS au cours du mois de janvier 2004. Nous avons combiné les données de mesure pour la période du mois de janvier 2004 afin de tracer le graphe du TEC en fonction des jours (temps). Le graphe représente l'état de l'ionosphère durant cette période et nous permet de voir l'état de l'évolution des perturbations TEC au-dessus de la région considérée. La courbe du TEC tracée en deux dimensions montre clairement des perturbations dues à un orage magnétique sous le contrôle du processus de la magnétosphère terrestre associé au large gradient dans l'ionosphère et la plasmasphère. Le climat de l'espace et les perturbations associées dans le champ magnétique peuvent provoquer de larges gradients dans le TEC aux altitudes moyennes. Les larges gradients du TEC sont associés fréquemment aux événements de scintillations ionosphériques dans des conditions dures. Ces fluctuations peuvent causer la perte de vue (liaisons récepteurs-satellites) des récepteurs GPS. La combinaison des données à partir d'un réseau de récepteurs GPS double fréquences en fonction continue permet le développement de l'effet de ces perturbations du TEC. Ce travail est réalisé par le CODE qui publie les cartes de l'ionosphère.

Des programmes d'accroissement de la précision du positionnement par satellite tels que SBAS (Satellite-Based Augmentation System), WAAS (Wide Area Augmentation System) en Amérique du Nord, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) en Europe et MSAS (Multifunctional Transport Satellite-based Augmentation System) en Asie se développent et ont mis au point des modèles ionosphériques dont les valeurs sont transmises en temps réel aux utilisateurs via les satellites géostationnaires.

À titre d'exemple, le WAAS corrige les erreurs dues aux perturbations ionosphériques et les erreurs de temps et d'orbites des satellites. Il corrige les informations vitales d'intégrité de chacun des satellites. Bien qu'il ne soit pas encore approuvé pour l'aviation, le système est disponible pour usage par des navigateurs et des fervents du plein air. Sa couverture est beaucoup plus étendue sur Terre et sur mer compararativement au système terrestre DGPS (GPS différentiel). Un autre grand avantage est qu'il n'exige pas de récepteur additionnel comme le DGPS. La précision typique du WAAS est inférieure à 3 mètres.

Les structures fines dans l'ionosphère, fréquemment associées avec les gradients régions larges, peuvent provoquer des scintillations ; ces dernières sont observées par les utilisateurs GPS comme des fluctuations d'amplitude et de phase du signal reçu. En premier lieu, ces variations de TEC et les scintillations sont associées aux régions polaires et équatoriales ; cependant, de larges gradients TEC et des scintillations peuvent être observées à des latitudes moyennes pendant des périodes de perturbations géomagnétiques modérées ou graves. Du fait que la majorité des utilisateurs GPS se trouvent à des latitudes moyennes, les perturbations causées par les orages magnétiques importants peuvent particulièrement affecter la

moyenne des utilisateurs GPS, que ce soit en géodésie ou en navigation.

L'utilisation des données de mesure (codes et phases) d'un réseau dense de récepteurs GPS permet non pas seulement la fourniture de cartes TEC par des services tels que le CODE, avec une grande résolution spatiale et temporelle, mais aussi le suivi de l'activité ionosphérique en fonction de l'activité solaire et magnétique, ce qui a fait l'objet de notre recherche.

Le GPS peut donc être utilisé pour l'étude des orages magnétiques et il constitue également un outil de compréhension de l'environnement Terre-Soleil. À vrai dire, il est un système indispensable pour bien comprendre certains phénomènes de l'atmosphère dont l'impact est important pour la météo et la climatologie.

Références

Al'pert, Y. L. (1973) Radio Wave Propagation and the Ionosphere. A Division of Plenum Publishing Corporation, New York.

Belbachir, A. H. (1981) Investigation of parametric instabilities in plasmas induced by stochastic pumps. Doctoral thesis, University of Michigan.

Bilitza, D., Rawer, K., Bossy, L and Gulyaeva, T. (1993) International Reference Ionosphere-Past, Present and Future : I Electron Density. Advances in Space Research, vol.13, no 3, p. 3-23.

Boutiouta, S. (1994) Étude de l'influence de l'ionosphère sur les liaisons de télécommunications par satellites. Thèse de Magister, Université de Sciences et Technologie d'Oran (USTO).

Davies, K. (1990) Ionospheric Radio. Peter Peregrinus Ltd., London, U.K.

Fernandez, M. G. (2004) Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data. Thèse de doctorat, Département de mathématique appliquée IV, Université Polytechnique de Catalogne.

Gao, Y. and Liu, Z. Z. (2002) Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. Journal of Global Positioning Systems, vol. 1, nop. 18-24.

GPS Data Archive : http://www.ngs.noaa.gov/GRD/grddatasoftware.shtml et gracie.grdl.noaa.gov [140.90.160.199].

Gurtner, W. (1998) Introduction of the Hatanaka Compression. IGSMAIL, no 1785, Tue, 13 Jan 1998.

Hatanaka, Y. (1998) Compact RINEX Format : ftp://terras.gsi.go.jp/software/RNXCMP_2.4.2/docs/crinex.txt

Klobuchar, J.A. (1996) Global Positioning System : Theory and Applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

Knight, M. and Finn, A. (1996) The Impact of Ionospheric Scintillations on GPS Performance. Proc. of ION GPS-96, Institute of Navigation, Kansas City, MO, September, p. 555.

Liu, J.Y., Y. H. Chu, M. Q. Chen, L. C. Tsai and C. M. Huang (2000) Modeling and Ground Observations of the Ionosphere Related to the COSMIC Project. TAO, vol. 11, no 1, 349-364.

Nordwall, B. (1996) Atmospheric/Multipath Concerns for DGPS. Aviation Week, October, 145, p. 60-61.

Radicella, S. M., Nava, B., Coïsson, P., Kersley, L. and Bayley, G.J. (2004) Effects of gradients of the electron density on earth-space communication. Cost 271 Final Meeting, Abington, 26-27 August 2004.

Sardon, E., A. Rius and N. Zarraoa (1994) Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations, Radio Science, 29, p 577-586.

Sardon, E., A. Rius and N. Zarraoa (1997) Estimation of total electron content using GPS data : how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases, Radio Science, 32, 1899-1910.

Schaer, S. (1997) How to use CODE's Global Ionosphere Maps. Astronomical Institute of the University of Bern.

Schiffer, A. (1996) Superdarn measurements of double-peaked velocity spectra. Physics of the ionosphere : magneto-ionic theory and the Appleton-Hartree equation. Ph.D. Thesis, http://www.ferzkopp.net/Personal/Thesis/node7.htm.

Sover, O. J. and J. L. Fanselow (1987) Observation model and parameter partials for the JPL VLBI parameter estimation software MASTERFIT-1987, Jet Propulsion Lab. Publ. 83-39, Rev. 3, p. 1-60.

Van Hauwaert, E. et Deback, G. (2002) Les aurores polaires : projet bibliographique 2001-2002. http://www.ens-lyon.fr/DSM/magistere/projets_biblio/2002/gdeback/II.2.html