



HAL
open science

Contribution à l'étude de la scintillation ionosphérique équatoriale sur la crête sud de l'Afrique

Bruno Kahindo, Albert Kazadi Mukenga Bantu, Rolland Fleury, Franck
Tondozi Keto, André Zana Ndontoni, Marc Kakule Kaniki, Christine
Amory-Mazaudier, K. Groves

► **To cite this version:**

Bruno Kahindo, Albert Kazadi Mukenga Bantu, Rolland Fleury, Franck Tondozi Keto, André Zana Ndontoni, et al.. Contribution à l'étude de la scintillation ionosphérique équatoriale sur la crête sud de l'Afrique. *Journal des sciences*, 2017, 17 (2), pp.27-47. hal-01801579

HAL Id: hal-01801579

<https://hal.science/hal-01801579>

Submitted on 6 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à l'étude de la scintillation ionosphérique équatoriale sur la crête sud de l'Afrique

B. Kahindo Murumba¹, A. Kazadi Mukenga Bantu¹, R. Fleury², F. Tondozi Keto¹, A. Zana Ndontoni¹, M. Kakule Kaniki¹ and C. Amory-Mazaudier³, K. Groves⁴

¹ *Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Kinshasa, Kinshasa, Democratic Republic of Congo*

² *Lab-STICC, UMR 6285, Institut Mines-Telecom Atlantique, CS 83818, 29288 Brest Cedex 3, France*

³ *LPP/Polytechnique/UPMC/CNRS, 4 place Jussieu 75005, France*

⁴ *Institute for Scientific Research, Boston College, Maryland, USA*

RESUME

Cet article présente une étude sur la scintillation ionosphérique associée aux irrégularités équatoriales sur la crête sud de l'anomalie équatoriale. Les données utilisées sont le contenu électronique total (TEC) et l'indice de scintillation d'amplitude S4 enregistrées par le GPS SCINDA de Kinshasa (République Démocratique du Congo). Du fait de cette position géographique bien particulière, ces mesures constituent une opportunité de caractériser l'ionosphère sensible à de nombreux phénomènes spécifiques (forts gradients d'ionisation, scintillation, ...). Le travail couvre la période qui va de mai 2011 à octobre 2012 situé dans la phase ascendante du cycle solaire numéro 24. Les résultats montrent que la scintillation est très intense avec des valeurs S4 voisines de 1 et au-delà pendant de nombreux jours de l'année. La répartition temporelle montre que les fortes valeurs de l'indice sont observées entre 19h à 23h TL (Temps Local). Ce résultat confirme que la scintillation est un phénomène présent dès le coucher du Soleil et peut se prolonger sur les quelques heures après minuit. On a aussi observé un fort effet saisonnier qui s'est manifesté par des valeurs intenses de scintillation aux mois d'équinoxe comparés aux périodes de solstice.

Afin de mieux caractériser le degré d'ionisation dans la région équatoriale sud, nous avons utilisé les mesures GPS (pseudo-distances, bi-fréquences) effectuées par la station NKLG à Libreville au Gabon. C'est la seule station dans cette partie de l'Afrique qui possède une série historique de mesures sous forme de fichiers Rinex journaliers. Elle est rattachée au réseau IGS, ce qui garantit un suivi opérationnel très sérieux. Nous avons exploité ces mesures pour calculer le VTEC (Contenu Total Electronique vertical) et suivre le comportement de l'ionisation pendant la période de nos mesures. Le VTEC montre une variation

diurne fonction de l'angle solaire zénithal (rayonnement solaire) et du rayonnement solaire ionisant. Ce dernier est quantifié par le nombre glissant de taches solaires (R_{12}) permettant de situer notre période de mesures dans le cycle solaire en cours. Le VTEC est compris entre quelques unités d'unités de TEC ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$) la nuit et 80-100 tecu de jour. Le maximum diurne est observé aux environs de 15 TL.

Mots clés : GPS SCINDA, irrégularités ionosphériques, Anomalie Equatoriale, Contenu Electronique Total Vertical (VTEC), Scintillation Ionosphérique et Indice S4

Abstract

Between interplanetary space and terrestrial atmosphere, ionospheres' plasma is affected both by geomagnetic field as well as solar wind and radiations. The ionosphere is the basis of the turbulent fluctuations of electronic density which cause rapid variations ionosphere refraction index. These variations generate rapid fluctuations of radio electric signals amplitude and phase traversing them up to 12 Ghz [ITU-R, 2012] are called ionospheres' scintillation. The data used come from the GPS SCINDA Kinshasa site and obtained during the period from May 2011 to October 2012.

Key words: GPS SCINDA, ionospheric irregularities, Equatorial anomaly, Vertical Total Electronic Content (VTEC), ionospheric scintillation and Index S4.

1. INTRODUCTION

C'est à Vancouver en 1987 que l'Association International de la Géomagnétique et Aéronomie (International Association for Geomagnetism and Aeronomy, IAGA) a développé un projet scientifique international appelé "Année Internationale de l'Electrojet Equatorial" (AIEE) qui a fonctionné pendant les années 1993, 1994. A cette occasion un groupe de géophysiciens européens et africains ont institué un réseau de scientifiques en Afrique de l'Ouest appelé Groupe International de Recherche en Géophysique Europe –Afrique (GIRGEA) (Amory-Mazaudier, 2011). Ce réseau utilisera des nombreux instruments de mesure de haute technologie notamment le système GPS pour les études sur la densité électronique de

l'ionosphère équatoriale. La campagne lancée par la communauté internationale a proposé des instruments qui incluent les mesures de la scintillation ionosphérique qui sont presque inexistantes en Afrique et aussi voulant rendre ce réseau de détection mondial.

L'ionosphère est la région de l'atmosphère terrestre située entre 80 et 1500-2000 km d'altitude. C'est un plasma constitué de molécules neutres et de particules ionisées. Le milieu est variable dans le temps et dans l'espace. La variabilité temporelle est liée aux variations de l'activité solaire qui suit un cycle moyen de 11 ans ainsi qu'aux émissions de matière lors d'éruptions solaires en particulier. Ce plasma est transporté par le vent solaire et précipite au niveau de la zone aurorale entraînant des modifications des courants ionosphériques, un resserrement des lignes du champ magnétique terrestre et une dispersion de l'énergie apportée sur une grande étendue de latitudes sous l'action des vents neutres. La variabilité spatiale est due à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au Soleil qui crée les saisons et à la forme et l'intensité du champ magnétique terrestre qui crée des zones différentes selon la latitude magnétique (polaire, aurorale, moyennes latitudes, basses latitudes, équatoriale, ..) avec des caractéristiques différentes.

Le système GPS (Global Positioning System) est couramment utilisé pour le positionnement et la synchronisation de très nombreux équipements. Les satellites de la constellation orbitent à 20200 km d'altitude aussi les signaux traversent toute l'ionosphère de manière oblique avant d'être enregistré au sol. La nature dispersive de l'ionosphère en fréquence s'est traduite en terme système, par l'émission de signaux sur 2 fréquences. Les mesures peuvent alors être combinées pour la détermination du Contenu Électronique Total (TEC) le long d'un trajet satellite-Terre. Par contre, le TEC est une perturbation de la valeur réelle de la distance géométrique et ainsi dégrade la précision de la localisation quelle que soit sa nature, terrestre, maritime ou aérienne. Ainsi l'installation de stations GPS sur l'Afrique apporte de nouvelles informations sur la variabilité de l'ionisation en zone équatoriale par rapport aux traditionnelles ionosondes verticales. Cependant, ce ne sont pas les mêmes paramètres mesurés, ce qui nécessite d'effectuer un état de l'art préalable. En particulier, nous nous focalisons sur l'apparition et le renforcement de la présence d'irrégularités de densité électronique qui sont à l'origine de la scintillation ionosphérique

sur les signaux GPS : les signaux subissent des fluctuations de phases et d'amplitudes, liées aux propriétés aléatoires du milieu.

Dans cette étude nous évaluons le niveau du contenu total en électrons TEC à la verticale du site NKLG (Gabon) et l'importance de l'indice S4 des fluctuations d'amplitude sur la zone de visibilité de satellites GPS couverte par notre scintillateur. Notre but est d'observer les phénomènes présents, de les quantifier et de les interpréter.

2. MATERIEL ET METHODOLOGIE

Sites d'observation et méthodes de traitements

Le modèle du Scintillateur GPS (Global Positioning System), c'est le Novatel GSV 4004B. Il nous a été fourni par le laboratoire AFRL (Air Force Research Laboratory) de Boston College dans le cadre du projet SCINDA (Scintillation Network Decision Aid). Il est piloté par un PC (Personal Computer) qui permet de gérer l'acquisition et le stockage des données des mesures. Un panneau solaire permet de réguler la puissance électrique. L'ensemble du dispositif est représenté à la Figure 1. Les mesures de scintillation sont (1) l'indice S4 sur l'amplitude, (2) l'indice σ de la phase sur la fréquence f1 (1575.42 MHz) du système GPS à la cadence d'une minute.



Figure 1: Dispositif expérimental du Scintillateur GPS SCINDA implanté à la Faculté Polytechnique de l'Université de Kinshasa.

3. Résultats et Discussion

Cet équipement fait partie d'un effort d'investissement de la part de ce laboratoire pour acquérir des mesures de scintillation dans de nombreux endroits du monde (zones équatoriale et aurorale) et en particulier en Afrique Equatoriale (Figure 2). Les signaux GPS des stations basses latitudes sont affectés par la scintillation ionosphérique (Lassudrie-Duchesne et al., 2010).

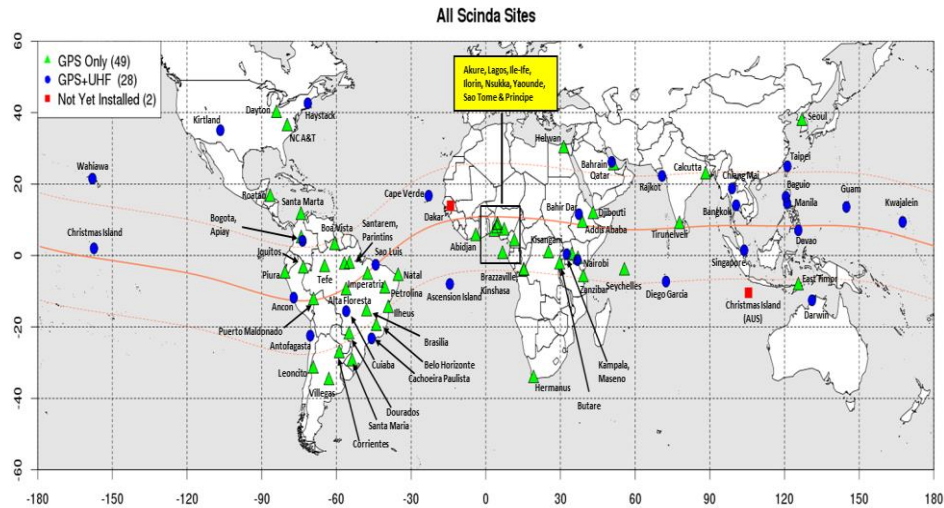


Figure 2 : implantations des différents scintillateurs par l'AFRL (Groves, 2014)

Les premières installations ont été réalisées vers 2008. Le nombre d'années de mesures permet maintenant à des scientifiques de différents pays de publier leurs travaux dans des revues scientifiques. Nous présentons quelques publications récentes liées uniquement à la scintillation qui est le phénomène initiateur du projet Scinda.

Les principales observations effectuées par les stations Scinda de Lagos (Nigéria), Nairobi (Kenya) et Kampala (Ouganda) durant les années 2009-2011 sont résumées dans la publication d'Akala, Amaeshi *et al.* (2013) :

- La scintillation apparait dès le coucher du Soleil jusqu'à 02h00 TL avec un maximum entre 20h00-23h00 TL,
- L'occurrence de scintillation augmente fortement avec le cycle solaire, elle est faible en 2009 année du minimum et la plus forte en 2011 (activité moyenne autour de 50-60),
- La scintillation présente une forte variation saisonnière : elle est maximale aux 2 équinoxes (mars-avril et octobre-novembre), minimale au solstice de juin et surtout totalement absente en janvier,
- La scintillation est plus forte sur les 2 stations éloignées de l'équateur magnétique Nairobi (Inclinaison magnétique $I=-9.9^\circ$) et Kampala ($I=-8.4^\circ$) que celle plus proche (Lagos, $I=-3.8^\circ$): elle

est localisée au sud des 2 premières stations c'est-à-dire au plus proche du maximum de la crête sud équatoriale ($\sim 20-25^\circ$) où les gradients de TEC sont les plus forts (Olowendo, Baki *et al.*, 2016),

- Quelques apparitions de faibles niveaux sont présentes en juin sur les heures après minuit pour Nairobi et Kampala,
- Le niveau de l'indice de scintillation d'amplitude S4 présenté est borné à 0.50, valeur que les auteurs considèrent dans la case forte scintillation alors qu'elle est plutôt typique d'une scintillation modérée. Il n'y a pas d'analyse de l'occurrence au-dessus de ce seuil sachant qu'il n'est pas forcément présent puisque l'année de 2011 est plutôt de moyenne activité solaire ainsi que nous l'avons précédemment indiqué. Des valeurs jusqu'à 0.8 sont présentées par Olowendo, Baki *et al.* (2016) pour l'équinoxe 2012 à Nairobi.

Akala, Awoyele *et al.*, (2016) ont publié une analyse autour des mesures de Dakar ($I=15.4^\circ$) sur la période 2012-2014. Les principales conclusions se résument ainsi

- La scintillation débute dès le coucher du Soleil et est maximale sur la période 22-02 TL,
- Elle est maximale aux équinoxes et le maximum est en octobre. Les niveaux sont les plus faibles au solstice d'été (mai, juin, juillet),
- Elle est faible en janvier, mais elle est présente,
- La climatologie de la scintillation est plus proche du secteur des longitudes Amérique du Sud que celles de L'Afrique centrale et de l'Est.

Une analyse des mesures de Addis-Abeba ($I=11.1^\circ$) sur la période 2009-2013 sont présentées par Akala, Ejalonibu *et al.* (2017). Elle se résume comme suit:

- La scintillation est localisée dans le secteur 22-02 TL,
- La scintillation est maximale aux équinoxes (mars-avril et septembre-octobre) avec le maximum en avril et est faible en juin, juillet et décembre,
- La scintillation est maximale en 2012 qui correspond au premier maximum du cycle solaire 24 (le second un peu plus fort est en 2014) et est minimale en 2009 au minimum solaire,
- L'influence de l'activité magnétique n'est pas clairement visible et demanderait une analyse plus fine.

Ackah *et al.* (2011) ont publié leurs observations sur Abidjan ($I=-6.1^\circ$). Elles couvrent l'année 2008 situé au minimum de l'activité solaire et donc peu favorable à la présence de scintillation. En outre, le site est assez pollué par des multi trajets et ces points ne peuvent être enlevés qu'en ne conservant que les mesures au-dessus de 30° d'élévation.

Ces quelques références bibliographiques remontent des observations communes. La position géographique de notre récepteur, plus au sud devraient accentuer.

Notre scintillateur a été implanté en avril 2011 à Kinshasa (4.41°S , 15.30°E). L'inclinaison magnétique est d'environ 23°S , ce qui correspond à la position de la crête sud de l'anomalie équatoriale ($\sim 20^\circ\text{-}25^\circ\text{S}$). Nous disposons également à proximité de la station de NLKG au Gabon (0.35°N , 9.67°E) qui est une station du réseau IGS fournissant des mesures journalières de pseudo-distance et de phase aux 2 fréquences GPS, à la cadence de 30s et sous le format Rinex.

Le réseau des stations IGS constitue le réseau principal des scientifiques qui leur permet de calculer la position des satellites GPS sur leurs orbites et la position précise centimétrique des stations au sol. Ces stations s'engagent à suivre précisément l'évolution des leurs récepteurs et à fournir des mesures de haute qualité sous forme de fichiers horaires Rinex (en temps réel pour certaines positions). Les fichiers journaliers rassemblés sont mis gratuitement à la disposition de la communauté internationale. Lorsqu'on consulte la carte actualisée du réseau IGS (Figure 3), on observe un nombre faible pour le continent africain et la présence d'une seule position (NKLK, $I=-15.4^\circ$) pour ce qui concerne notre région. Il nous a donc semblé naturel d'utiliser ces mesures pour caractériser l'ionosphère et de faire le lien avec nos mesures de scintillation ionosphérique à Kinshasa.

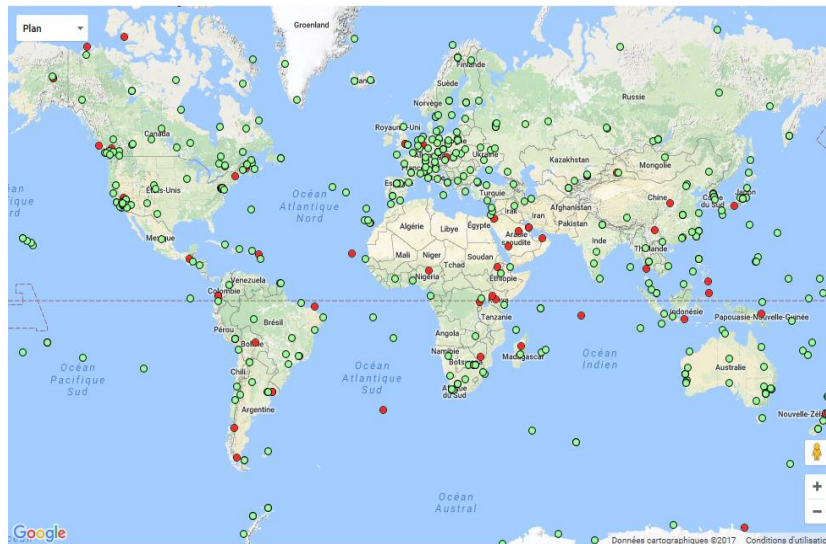


Figure 3: le réseau IGS (03/05/2017). Les stations opérationnelles avec un rond vert, les stations arrêtées récemment avec un rond rouge

Notre période principale d'acquisition des paramètres de scintillation se situe de fin avril 2011 à fin octobre 2012 avec des jours absents du fait de problèmes matériels (coupures de courant principalement). Nous avons donc exploité les fichiers Rinex des années 2011 et 2012 pour calculer le VTEC. Le logiciel utilisé est un code Matlab développé par Fleury (2013). Il utilise la combinaison bi-fréquence des 2 mesures de pseudo-distances effectuées toutes les 30s, pour calculer le STEC (TEC oblique). La calibration à partir d'informations supplémentaires fournis par l'équipe CODE de l'Université de Berne :

- Les fichiers DCB mensuels pour les biais satellites
- Les fichiers IONEX journalier pour déterminer le biais du récepteur. Celui-ci est calculé journalièrement par l'ajustement des 2 STEC, celui issu des fichiers Rinex et celui recalculé par les fichiers Ionex sur les instants d'observation. Le point important est que le modèle Ionex/codg ne fournit que des valeurs de VTEC toutes les 2 heures sur une grille mondiale régulière. Nous avons donc utilisé une interpolation bi rectiligne sur le point d'observation et un lissage par spline cubique sur les instants de mesures Rinex 30s pour représenter de modèle à la verticale de NKLK.

Le VTEC est obtenu par la loi de la sécante en prenant une altitude de référence à 450 km.

(a) Etude du Contenu électronique vertical

Quelques résultats spécifiques sont illustrés sur la figure 4. Le VTEC modélisés par Ionex est représenté par la courbe verte et celui issu des fichiers Rinex par la courbe rouge. Nous avons choisi 3 jours particuliers

- Le premier est le 22 juillet 2011 (quantième 203). Les 2 courbes sont très proches avec des valeurs minimales la nuit vers 10 tecu et un maximum de 35 tecu en début d'après-midi. Cette valeur est assez faible du fait qu'elle est représentative de la saison été.
- Le second est le 28 septembre 2011 (quantième 271) c'est-à-dire dans l'équinoxe d'automne. Le minimum du lever du Soleil vers 04TU est plus marqué et les valeurs de jour sont nettement plus fortes, autour de 60 tecu. Nous avons sélectionné cette journée pour la divergence entre les 2 courbes. Le VTEC Ionex est naturellement très lissé puisque nous avons interpolé les valeurs bi-horaires par un spline cubique. Le VTEC issu des mesures Rinex montre un minimum local vers 14 UT entouré de 2 pics, l'un en fin de matinée vers 12 UT et l'autre dans l'après-midi vers 17 TU. C'est une situation typique du fait de la position géographique où la crête équatoriale sud prend de l'extension en se déplaçant vers des latitudes plus basses le matin après sa formation et inversement l'après-midi, se rapproche de l'équateur magnétique. Le 3^{ème} maximum situé vers 21:30 TU résulte d'une augmentation de l'ionisation avec la montée en altitude de la couche F2 après le coucher du Soleil. La valeur observée également égale à 60 tecu est très forte et traduit dans ce cas la force du phénomène.
- Le troisième cas est le 22 octobre 2011 (quantième 295) également durant l'équinoxe d'automne. Le niveau d'ionisation a fortement augmenté en moins d'un mois pour atteindre 92 tecu. Nous n'avons qu'un seul maximum de jour bien reproduit par le modèle Ionex. Le pic d'après le coucher du Soleil est encore présent avec un niveau identique au précédent à 60 tecu et n'est toujours pas représenté par le modèle GIM/Ionex.

Cette figure 4 illustre fortement l'intérêt de disposer de mesures locales de VTEC qui permettent d'observer et de quantifier des phénomènes non représentés par le modèle mondial du type de GIM/Codg.

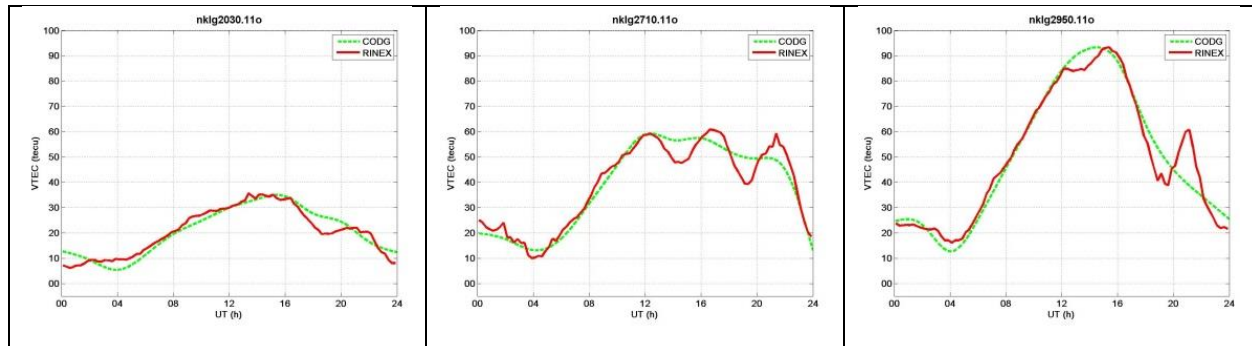


Figure 4: variations diurne du VTEC à NKLK, les quantiles 203, 271 et 295 en 2011

La seconde visualisation que nous avons exploitée est celle représentant le VTEC tous les jours d'un mois donné (Figure 5). L'indice magnétique Dst est également tracé pour identifier les orages magnétiques correspondant à des valeurs négatives de cet indice. Un exemple est celui de la figure 3 pour le mois d'avril 2012. Le maximum diurne du VTEC se présente sous la forme d'une sinusoïde avec un minimum relatif vers le 15/04 et 2 maximums, le premier le 06/04 (76 tecu) et le second le 24/04, plus fort à 82 tecu. Ce dernier est la phase positive d'un orage magnétique moyen (-100 γ) ayant débuté dans les premières heures du 23 avril. Beaucoup de variations journalières sont avec un seul pic mais on peut distinguer quelques-uns avec 2 maximums (17/04) et la présence régulière d'un maximum sur les heures après le coucher du soleil, excepté le 08-09/04 par exemple.

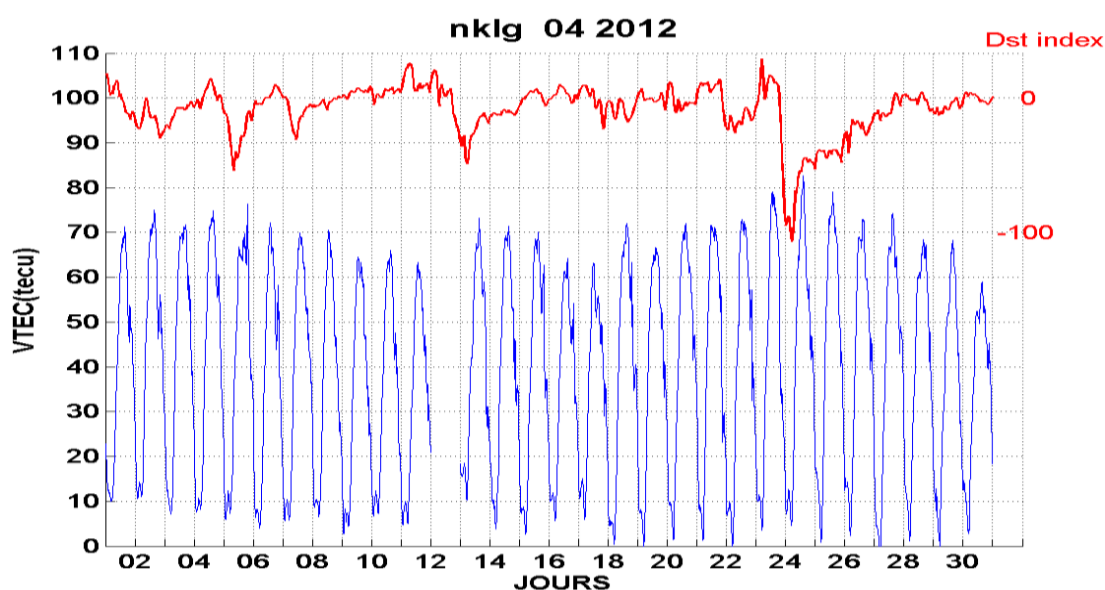


Figure 5 : variation diurne journalière du VTEC au mois d'avril 2012 superposée aux variations horaires de l'indice magnétique Dst

A partir des variations journalières, les médianes mensuelles ont été calculées et tracées avec la superposition de toutes les valeurs de VTEC en fonction des instants de mesures. Un exemple de résultat est présenté sur la figure 6 relatif aux mois de mars (équinoxe) et juillet 2012 (été). La variation saisonnière est mise en évidence avec un maximum de jour inférieur à 50 tecu en été et égal à 70 tecu à l'équinoxe de printemps sur les valeurs médianes (courbe rouge). La dispersion des valeurs journalière est assez semblable sur ces 2 mois (autour de 10 tecu de jour et 5 tecu la nuit) ; l'écart-type autour de la médiane est donné sur la courbe rouge au-dessus de la valeur 0 tecu. Les valeurs médianes peuvent être exploitées pour quantifier les modèles existants (IRI, NeQuick) de représentation de l'état de l'ionosphère.

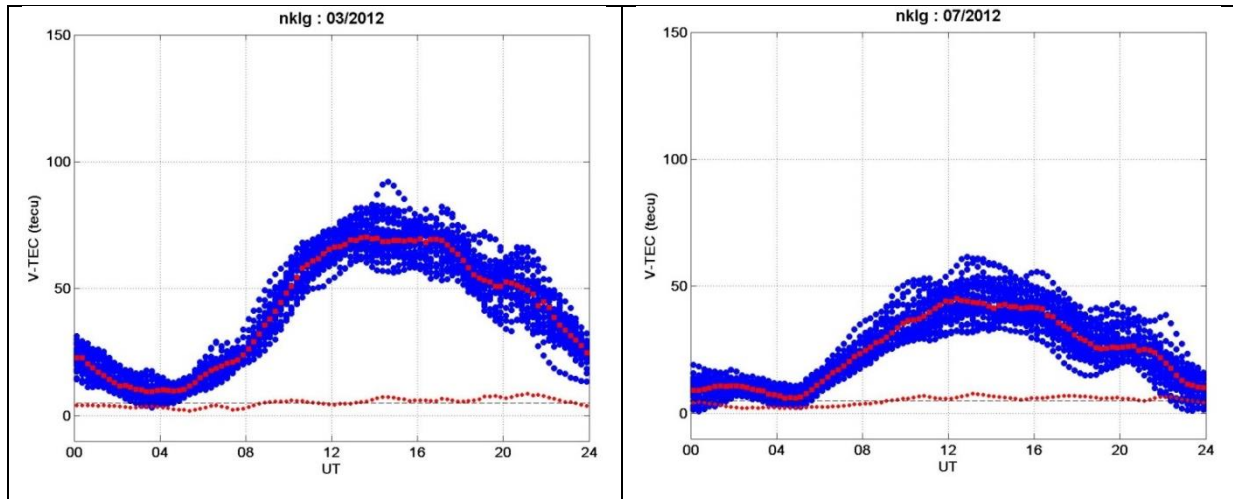


Figure 6 : Les médianes mensuelles en mars et juillet 2012 à NKLK et la dispersion journalière

Enfin, au vu de la variation journalière, des représentations 3D ont été faites : le but est de représenter le VTEC sur une échelle de couleur selon sa valeur entre 0 et 100 dans le repère avec l'ensemble de jours de l'année en abscisse et l'heure TU en ordonnée. Le résultat sur les 2 années 2011 et 2012 est donné sur la figure 7.

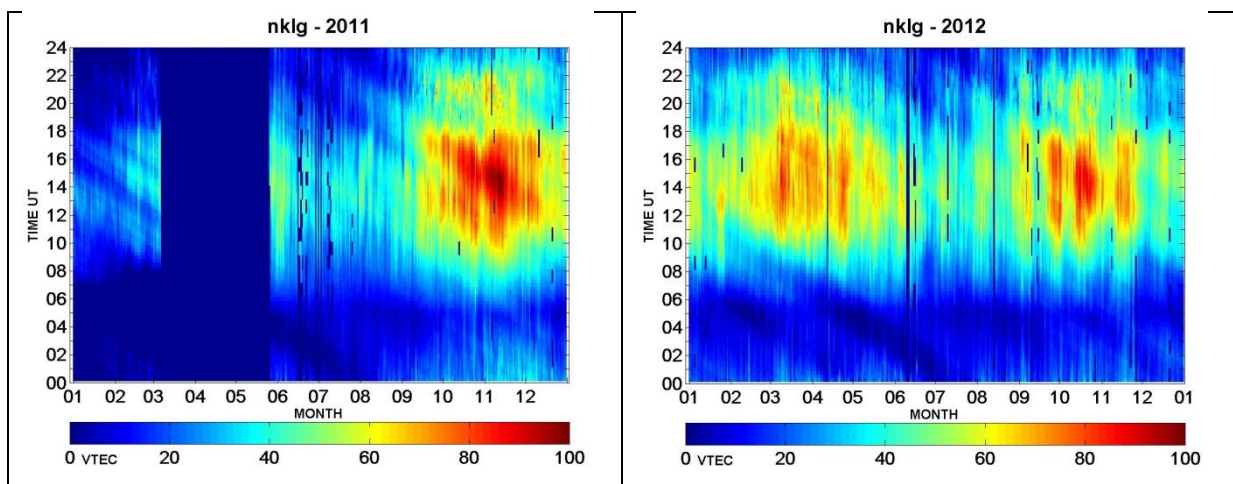


Figure 7 : Représentation 3D de la variation du VTEC dans le repère (jours/heure TU) pour les 2 années 2011 et 2012.

Les valeurs de nuit sont inférieures à 20 tecu excepté une légère remontée à 40 tecu en novembre et décembre 2011 sur les 2 heures après minuit TU. De jour, les valeurs maximales de 2 équinoxes sont mises en évidence avec une couleur de rouge à noir traduisant des valeurs au-dessus de 80 tecu. Le maximum de l'équinoxe de printemps est plus faible. Il reflète certainement la baisse de l'activité solaire puisque le premier maximum du cycle 24 observé en novembre 2011 est suivie d'une baisse de -30% jusqu'au début 2013 et d'une nouvelle remontée avec un second maximum plus fort que le premier en 2014. On voit aussi la zone rouge n'est pas homogène puisque des bandes jaunes sont visibles traduisant quelques jours consécutifs avec des niveaux plus faibles (début novembre 2011 mais aussi en mars et avril 2012).

Les plus faibles niveaux de jour sont centrés sur le solstice d'été (juillet) avec des valeurs autour de 35-45 tecu. Durant l'hiver 2011-2012, les valeurs sont légèrement au-dessus. Concernant l'horaire, le maximum est bien centré à 14TU.

Ces courbes montrent bien le caractère symétrique du comportement saisonnier de TEC par rapport à l'équateur magnétique.

(b) Etude de la scintillation

Nous avons repris le mois d'avril 2012 de la variation du VTEC (Figure 5) et tracé l'évolution horaire de l'indice S4, qui mesure la variabilité de l'amplitude du signal à la fréquence f_1 représentée à la Figure 8.

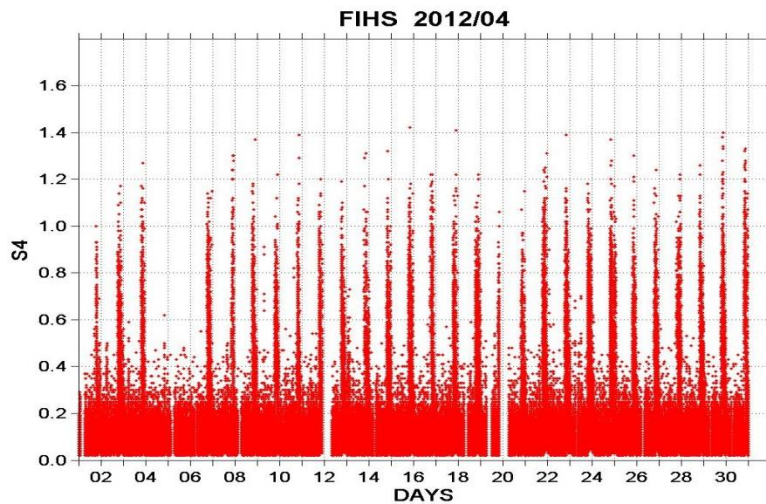


Figure 8 : Evolution de l'indice S4 au cours du mois d'avril 2012

Qu'observe-t-on ? Des valeurs présentent en permanence entre 0 et 0.2 et une succession de fortes valeurs (> 1.0) de cet indice sur des créneaux étroits presque tous les jours. Les faibles valeurs de l'indice S4 proviennent des obstacles locaux au voisinage de l'antenne de réception qui forment des multi-trajets à angle d'élévation faible ($< 30^\circ$) et qui se traduit par des fluctuations rapides du signal en amplitude et en phase. Une prise en compte d'un seuil de l'angle d'élévation (à optimiser en fonction de l'environnement de chaque récepteur) doit permettre d'éliminer ces points. Les fortes valeurs se produisent en fin de journée dans le créneau coucher du Soleil-minuit. Sur l'exemple présenté, le phénomène est régulier excepté les 4 et 5 avril. Lorsqu'on regarde l'indice magnétique Dst de la figure 5, on voit que nous sommes en présence d'un orage magnétique mineur ($\sim -50\gamma$) dont la phase principale a débuté au milieu de la journée du 04/04. Une seconde perturbation très semblable à la première débute le 12/04 mais ne neutralise pas l'apparition de la scintillation. Enfin, la troisième toujours avec une phase principale de début d'après-midi du 23/04 a plutôt un effet inverse puisque le nombre de forts points de mesures semble beaucoup plus épais le 24/04. Au vu de la régularité du phénomène, nous avons tracé l'indice S4 en fonction de l'heure TU pour chaque mois de notre base de données. Les graphes sont restitués sur la figure 9 avec l'année 2011 sur la partie supérieure (les 8 mois de mai à décembre 2011, de gauche à droite) et l'année 2012 sur la partie inférieure (les 10 mois de janvier à octobre 2012). Cette concentration masque un peu la lisibilité du phénomène,

mais nous permet de présenter toute notre base de données. L'abscisse couvre les 24 heures TU et l'ordonnée couvre une échelle de l'indice entre 0 et 1.8. Cette figure confirme de renforcement drastique de l'indice S4 en fin de journée et on voit apparaitre une variation saisonnière puisque septembre, octobre et novembre 2011 présentent des valeurs plus fortes et plus denses. L'équinoxe de printemps 2012 présente également un renforcement du phénomène sans atteindre l'intensité de 2011.

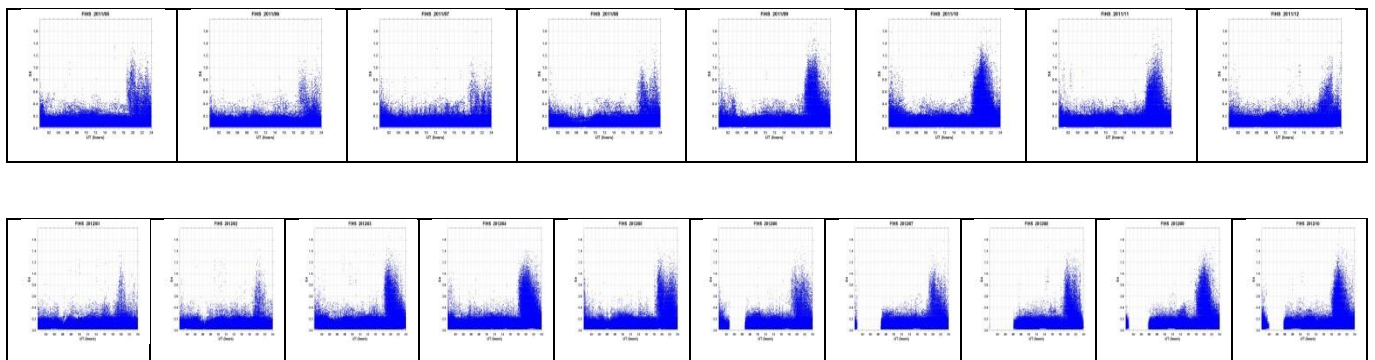


Figure 9 : Variation mensuelle de l'indice S4 du mois de mai à décembre 2011 (graphe supérieur) et du mois de janvier à octobre 2012 (graphe inférieur)

Nous avons adapté notre visualisation 3D du VTEC à l'indice S4. Le but est de représenter les différentes valeurs de l'indice par un code couleur dans le repère jours de l'année en abscisse et heure TU en ordonnée (Figure 10). Hélas, nous avons quelques interruptions dans l'acquisition des signaux, heureusement situés en fin de nuit et ils figurent en blanc dans la représentation. Nous avons borné l'extension de l'indice S4 à la valeur 1.

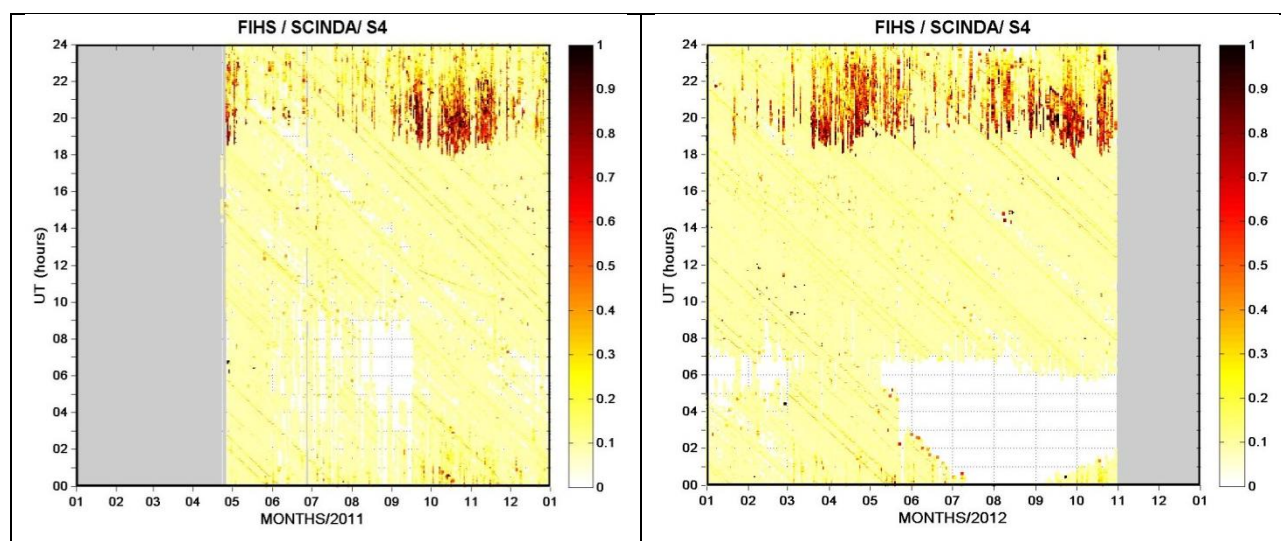


Figure 10 : Représentation 3D de la variation de l'indice S4 dans le repère (jours/heure TU) pour les deux années 2011 (gauche) et 2012 (droite).

De cette figure 10, on voit une large plage de valeurs en jaune (inférieur ou égal à 0.2 et donc un bruit) entre 00 et 18 TU. On retrouve le premier maximum de fortes valeurs en septembre-novembre 2011, peu après 18TU (19TL) avec seulement quelques points après minuit en octobre. Les valeurs maximales sont autour de 21TL. Le phénomène s'atténue après 23TL. On distingue également quelques bandes jaunes verticales indiquant des jours sans scintillation. Le phénomène s'atténue fortement en hiver après la mi-novembre, jusqu'à sa disparition début janvier 2012. De forts niveaux sont de nouveau visibles en mars et se poursuivent en avril et mai durant l'équinoxe de printemps. Le phénomène s'atténue de nouveau durant l'été sans totalement disparaître et reprend sa même vigueur de 2011 dès les premiers jours de septembre 2012.

En conclusion de ses mesures, la scintillation est uniquement présente sur la période allant du coucher du soleil à minuit avec un maximum à 21TL. Le phénomène est maximum sur les 2 équinoxes (printemps et automne) et l'effet maximal est situé en octobre 2011 (conclusion identique à celle du VTEC). La scintillation est quasi-absente en janvier 2012. Nous retrouvons des conclusions identiques aux travaux de Akala, Amaeshi *et al.* (2013). L'apport de la station de Kinshasa consiste à l'observation de valeurs assez exceptionnelles de l'indice S4 (des pics réguliers à 1.4) du fait de sa position plus septentrionale au

voisinage du maximum de la densité de la crête sud équatoriale. Il n'y a pas de position équivalente en Afrique de l'Est et ces fortes valeurs peuvent également être interprétées par une présence plus importante de la scintillation aux longitudes de l'Afrique centrale par rapport aux longitudes plus à l'est.

En période magnétiquement calme, le déplacement des particules chargées de l'ionosphère à travers les lignes de force du champ magnétique terrestre crée la dynamo ionosphérique qui consiste en la présence d'un champ électrique régulier.

Au voisinage de l'équateur et pendant les heures de jour, l'association de la composante zonale du champ électrique et de la composante nord-sud du champ magnétique terrestre provoque une dérive verticale $E \times B$ du plasma de la région E vers les plus hautes altitudes. Dans la région F, sous l'influence de la gravité et du gradient de pression, ce plasma diffuse le long des lignes de force du champ magnétique dans les 2 hémisphères nord et sud. Ce processus crée ainsi 2 régions de maximum de densité électronique appelée crêtes équatoriales : c'est l'anomalie équatoriale (EIA pour 'Equatorial Ionospheric Anomaly'). Les 2 crêtes sont situées à environ 20-25° d'inclinaison magnétique. Nous avons donc une zone de forts gradients d'ionisation qui fait que les récepteurs positionnés enregistrent les signaux GNSS avec une forte et variable contribution ionosphérique puisque arrivant sous des azimuts différents. Le positionnement est dégradé par rapport aux stations des autres latitudes et variable dans le temps du fait de géométries différentes. L'amélioration du positionnement nécessite d'utiliser une modélisation de l'ionosphère mais n'est pas suffisante en terme d'intégrité car on peut trouver des structures hétérogènes de petites tailles qui peuvent échapper à la mesure. En outre, la restitution du TEC par les mesures bi-fréquence est approximative du fait que le passage de la mesure oblique en une valeur verticale passe par le choix d'une altitude de référence imparfaite et mal maîtrisée à cause des gradients. Le challenge de la correction des systèmes SBAS (Satellite Based Augmentation System) et de EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) en particulier pour la zone Afrique passe par une bonne maîtrise des phénomènes présents et donc par l'acquisition fine de mesures pour laquelle noter scintillateur peut participer.

Le second phénomène très important aux basses latitudes est l'existence de scintillation (amplitude et phase) des signaux GNSS. En effet, dès le coucher du Soleil, un champ électrique zonal dirigé vers l'est est créé : c'est le PRE ('Pre-Reversal Enhancement'). Du fait de cette direction, ce champ provoque une forte dérive verticale du plasma, dirigée vers les altitudes plus élevées et qui se traduit par une montée des

couches ionosphériques. Elle est mesurée par le paramètre $h'F_2$ (base de la couche F2) sur les ionogrammes. L'existence de 2 champs électrique divergent de part et d'autre de l'instant du coucher du Soleil crée des instabilités de plasma dans la région E de type Raleigh-Taylor (RT) (Kelley *et al.*, 2009). Ces instabilités vont s'élever dans l'ionosphère en même temps que la montée de la couche F. C'est un processus analogue à la montée des bulles d'air dans une bouteille de champagne et à leur explosion à la surface. En s'élevant dans le milieu, les bulles sous-ionisées vont grossir, changer de forme et venir modifier les signaux GNSS arrivant dans différentes directions. En fonction de la taille des irrégularités, le phénomène s'appelle diffusion-F ('Spread-F') sur les ionogrammes (propagation verticale HF) ou bulles / plumes / EPB ('Equatorial Plasma Bubbles') sur les signaux GNSS (GHz). De telles structures irrégulières ont été mises en évidence sur des mesures de rétrodiffusion et en particulier avec le sondeur de Jicamarca (ref). La climatologie de la scintillation est importante pour dimensionner spatialement et temporellement le phénomène. Du fait de l'excellente position géographique, notre scintillateur participe à ce travail. Cependant du fait de cette nature irrégulière, une analyse plus fine serait nécessaire pour identifier les trajectoires affectées ou non et ainsi de n'utiliser que les signaux non perturbés par le positionnement.

4. CONCLUSION

Après la mise opérationnelle de notre scintillateur Scinda, nous avons pu enregistrer 17 mois de mesures de bonne qualité. Depuis fin 2012, nous avons rencontré des problèmes matériels avec notre récepteur qui font que les mesures sont trop discrètes pour être traitées. Ces presque 2 années de mesures en 2011 et 2012 de notre scintillateur Scinda à Kinshasa nous ont permis de récolter une base inestimable de mesures à une position géographique intéressante pour l'ionosphère des basses latitudes et à une période favorable du cycle solaire. De nombreux phénomènes présents (anomalie équatoriale, scintillation) ont pu être mis en évidence. Nous avons retrouvé et parfois amplifié, des observations publiées sur d'autres récepteurs Scinda en Afrique. Nous observons des caractéristiques maximales sur les valeurs du contenu total et sur l'amplitude de la scintillation du fait de la proximité avec la position de la crête sud équatoriale. Notre situation géographique constitue une excellente position pour observer les cas extrêmes. Notre analyse s'est limitée à l'observation de notre récepteur.

Un maillage plus dense serait également essentiel pour le suivi de la morphologie de l'ionisation et de la scintillation. La figure 2 des implantations Scinda montre qu'une première approche est possible en disposant des mesures de Kinshasa (RDC), Port-Gentil (Gabon), Yaoundé (Cameroun), Lagos et une position plus au nord pour le Nigéria. Hélas, les mesures sont actuellement individualisées par organismes étatiques et actuellement centralisées à Boston College. Une meilleure collaboration entre les différents universitaires permettrait aussi d'échanger nos mesures et nos analyses et ainsi d'avoir une vue plus fine de la complexité dans les régions équatoriales en Afrique. La mise en œuvre d'un serveur contenant ces mesures de type de ceux de l'IGS et ouvert publiquement à la communauté scientifique africaine serait un pas essentiel dans un travail collaboratif de ces phénomènes.

Les perspectives sont aussi à une densification du réseau de récepteurs en RDC pour mieux maîtriser la climatologie des phénomènes. Un travail sur les conséquences sur le positionnement serait également à conduire.

REMERCIEMENTS

Nous tenons sincèrement à remercier le laboratoire AFRL du Boston College qui a accepté d'installer le système GPS SCINDA au sein de notre université sans quoi ce travail n'aurait pas pu être présenté. Il a aussi mis à notre disposition quelques matériels logiciels. Nous remercions également Rolland Fleury à L'Ecole 'Telecom-Bretagne' de Brest pour l'initiation de ces travaux au cours d'une école d'été à laquelle nous avons participé. Nous n'allons pas oublier la Coopération Belge à travers le Projet KIN04 sans lequel le présent travail n'aurait pas atteint sa fin.

BIBLIOGRAPHIE

Akala AO, Amaeshi LLN, Doherty PH, Groves KM, Carrano CS, Bridgwood CT, Seemala GK, Somoye EO, (2013), Characterization of GNSS scintillations over Lagos, Nigéria during the minimum and ascending phases (2009-2011) of solar cycle 24, *Advanced in Space Research*

Akala AO, Awoyele A, Doherty PH, (2016), Statistics of GNSS amplitude scintillation occurrences over Dakar, Senegal, at varying elevation angles during the maximum phase of solar cycle 24, Space Weather, v14, p233-246, doi:10.1002/2015SW001261

Akala AO, Ejalonibu AH, Doherty PH, Radicella SM, Groves K, Carrano CS, Bridgwood CT, Stoneback, RA, (2017), Characterization of GNSS amplitude scintillations over Addis Ababa during 2009-2013, Advanced Space Research, doi:10.1016/j.asr.2017.01.044,34p

Amory-Mazaudier C, (2011), The International research Group in Geophysics Europe Africa: A laboratory without borders in the earth science and environment, J. of life Sciences, p335-314

Fleury R, (2013), Formation lors de l'Ecole d'été de Télécom-Bretagne sur le Campus de Brest.

Groves K, (2014), Space weather and the role of ISWI in the development of the SCINDA sensor network, Presentation à la conference United Nations, Vienna, Austria, 10-11 february 2014, 28p.

Kelley M. C. (2009): The earth's ionospheres: Physics Plasma and electrodynamics, Cornell University, Academy Press; Elsevier

Lassudrie-Duchesne P, Beniguel Y, Bourdillon A, Fleury R, Valette JJ, LE Huy M, Tran Thi L, (2010), Les effets de la scintillation ionosphérique sur le GPS, Navigation, v58, 17p.

Olwendo OJ, Baki P, Cilliers PJ, Doherty P, Radicella S, (2016), Low latitude ionospheric scintillation and zonal plasma irregularity drifts climatology around the equatorial anomaly crest over Kenya, J. Atmos. And Solar-Terrestrial Phys., v138-139, p9-22.