

# Modélisation du Contenu Electronique Total de la sous couche F2 de l'ionosphère à la station d'ionosonde de Ouagadougou avec IRI-2016

Raoul ILBOUDO<sup>1\*</sup>, Emmanuel NANEMA<sup>1,2</sup>,  
Frédéric OUATTARA<sup>1</sup>

## Résumé

L'effet de la réfraction ionosphérique sur les signaux émis par les stations d'émission d'ondes radioélectriques dépend du Contenu Electronique Total (TEC), aussi la concentration en électrons libres dépend principalement de l'activité solaire interceptée par l'ionosphère.

Le travail, effectué à la station de Ouagadougou (Lat : 12,4°N ; Long : 358,5°E), consiste à étudier la variabilité temporelle du TEC de la couche F2, pendant les jours les plus calmes des quatre saisons du minimum et du maximum du cycle solaire 22. IRI 2016 a permis de capturer les données du TEC. Le traitement des données a permis d'établir les variabilités saisonnières du TEC. Il ressort de cette étude que le profil du TEC dépend de la saison, du moment et de l'activité solaire. L'étude révèle des créneaux horaires pendant lesquels la production électronique est importante et propice pour un calibrage optimum des stations d'émission d'ondes radioélectriques. Elle met en évidence le phénomène de *l'anomalie d'hiver*. L'étude de la variabilité du TEC avec IRI 2016 a donné des résultats qui concordent avec ceux obtenus avec IRI 2012.

**Mots clés :** Ionosphère, couche F, Contenu Electronique Total, cycle solaire, jours calmes, modèle IRI.

## Modeling the Total Electronic Content of the F2 sub-layer of the ionosphere at the Ouagadougou ionosonde station with IRI-2016

### Abstract

The effect of the ionospheric refraction on the signals emitted by radio wave transmitting stations depends on the Total Electron Content (TEC), so the free electron concentration depends mainly on the solar activity intercepted by the ionosphere.

The work, carried out at the Ouagadougou station (Lat: 12.4°N; Long: 358.5°E), consists in studying the temporal variability of the TEC of the F2 layer, during the quietest days of the four seasons of the minimum and maximum of the solar cycle 22. IRI 2016 has captured the TEC data. Processing of the data allowed us to establish the TEC's seasonal variabilities. From this study, it is found that the TEC profile is dependent on season, timing, and solar activity. The study reveals time slots during which the electronic production is important and conducive to an optimum calibration of the radio wave transmission stations. It highlights the phenomenon of the winter anomaly. The study of the variability of the TEC with IRI 2016 gave results that are consistent with those obtained with IRI 2012.

**Keywords:** Ionosphere, F layer, Total Electronic Content, solar cycle, calm days, IRI model.

## Introduction

Depuis la première étude de la climatologie de l'ionosphère équatoriale ouest-africaine en utilisant la station de Ouagadougou à travers trois cycles solaires (OUATTARA et al., 2009) qui a permis de montrer la morphologie complète des paramètres de l'ionosphère, de nombreuses études sur la couche ionosphérique ont été effectuées (GNABAHOU et al., 2012 ; NOUR A-M et al., 2015 ; NANEMA et al., 2013 ; GNABAHOU et al., 2013 ). Ouattara et al. (2013) ont utilisé les données du Contenu Electronique Total ou Total Electron Content

<sup>1</sup> Université Norbert ZONGO, Unité de Recherche et de Formation en Sciences et Technologie (UFR-ST), Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace (LAREME), BP 376 Koudougou, Burkina Faso

<sup>2</sup> Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), 03 BP 7047 Ouagadougou, Burkina Faso

\*Auteur correspondant : ilboudoraoul@yahoo.fr

(TEC) en anglais provenant du Centre de détermination d'orbite en Europe CODG qui signifie CODE GIM (Center for Orbit Determination in Europe, Global Ionospher Map), d'une part pour apprécier la précision de l'estimation du CODG et d'autre part pour sortir l'étude de la variabilité de l'ionosphère (OUATTARA et al., 2009). Une analyse de la prédiction du modèle CODG pendant le maximum et le minimum solaire à la station de Niamey a montré que le TEC estimé est plus élevé au printemps et plus bas en été (ZOUNDI et al., 2013). De nombreuses études ont montré que le système américain de positionnement par satellite à l'échelle du globe GPS (Global Positioning System) est également un outil efficace pour le contrôle de l'activité de l'ionosphère par la mesure du Contenu Électronique Total 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 (BOUTIOUTA et al., 2006). Le Contenu Electronique Total étant le nombre total d'électrons présents le long d'un chemin entre un émetteur radio et un récepteur se présente donc comme un bon paramètre pour surveiller les communications ionosphériques. En effet la propagation des ondes radioélectriques est intimement liée à l'état de l'ionosphère. En fonction du moment de la journée, de la saison et du cycle solaire l'ionisation des atomes et des molécules chargées ou neutres de l'ionosphère varie constamment, affectant ainsi les communications ionosphériques (OUATTARA et al., 2008 ; OUATTARA et al., 2011 ; OUATTARA et al., 2014). Les électrons libres résultant de l'ionisation sont essentielles car leurs variations en densité dans l'ionosphère provoquent la réfraction des ondes radioélectriques.

Cet article traite de la modélisation du TEC à la station d'ionosonde de Ouagadougou (Lat : 12,4°N ; Long : 358,5°E) au cours des quatre saisons du minimum et du maximum de phase du cycle solaire 22 dans les conditions de jours calmes. Notre objectif est de mettre en évidence la réponse de la version 2016 du modèle International Référence Ionosphère (IRI) sur la modélisation du TEC au cours de quatre saisons du minimum et du maximum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou.

## **I. Matériel et méthodes**

### **1.1. Matériel**

De nombreux modèles ont été développés pour étudier la couche ionosphérique (BITTENCOURT et al., 1994 ; RICHMOND et al., 1992 ; WANG et al., 2004 ; OUATTARA et al., 2008). L'objectif de chaque modèle étant d'obtenir une meilleure approche de description de la morphologie et de la composition particulière de la couche ionosphérique. Certains modèles sont des approches mathématiques tandis que d'autres utilisent les données de stations de mesures (NANEMA et al., 2018). Parmi ces modèles, l'International Reference Ionosphere (IRI) est l'un des modèles utilisés pour étudier la couche ionosphérique. Le modèle IRI est le modèle de référence de l'ionosphère. Depuis sa création, il a été amélioré et on est actuellement à sa version 2016. IRI est un modèle semi-empirique, développé et régulièrement mis à jour (tous les quatre ans en moyenne) par une équipe de chercheurs. Le modèle amélioré est remis aux utilisateurs tous les cinq ans. Il est accessible à l'aide du lien (<http://irimodel.org>). Le modèle permet de capturer les paramètres ionosphériques à une station donnée, connaissant les paramètres géographiques du site. La version 2016 du modèle IRI est le modèle utilisé dans le cadre de la présente étude pour la détermination du Contenu Electronique Total (TEC).

La station de Ouagadougou, située en Afrique de l'ouest, présente les caractéristiques suivantes : Lat = 12.4°N, Long = 358.5°E.

## 1.2. Méthodes

La méthodologie de l'étude repose sur les trois principes de base suivants : (i) la saison est entièrement décrite par un mois caractéristique ; (ii) le minimum et le maximum d'une phase d'un cycle solaire sont définis respectivement par le nombre  $Rz \leq 20$  et  $Rz \geq 100$  (ZERBO et al., 2011 ; OUATTARA et al., 2012 ; GNABAHOU et al., 2012) ; (iii) les valeurs moyennes horaires du TEC de la sous couche F2 des cinq jours les plus calmes (définis par l'index  $Aa \leq 20nT$ ) de chaque mois caractéristique d'une saison représentent entièrement la saison.

Pour le principe (i), nous faisons l'hypothèse que le printemps, l'été, l'automne et l'hiver ont comme mois caractéristiques respectivement mars, juin, septembre et décembre.

L'application du principe (ii) permet d'extraire l'année 1985 comme minimum de phase et 1990 comme maximum de phase pour le cycle solaire 22.

Le principe (iii) permet d'écrire l'équation (1) comme suit :

$$TEC_h = \frac{\sum_{j=1}^5 TEC_{h,j}}{5} \quad (1)$$

Dans cette expression,  $TEC_h$  désigne le Contenu Electronique Total moyenne de la sous couche F2 à l'heure  $h$  pour le mois caractéristique considéré,  $TEC_{h,j}$  est la valeur du Contenu Electronique Total à l'heure  $h$  pour le jour  $j$ . Dans ces conditions, l'indice  $h \in [0,24]$ , et l'indice  $j \in [1,5]$ .

De façon pratique, 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 hiono (hauteur IP). Les conditions d'exécution du modèle appliquées dans ce travail sont : hauteur IP = 350km, Pas horaire = 1.

Les données acquises sont traitées avec le Logiciel Excel pour obtenir d'abord les moyennes horaires mensuelles et ensuite les différents profils d'évolution horaires

Le Tableau I présente les cinq jours les plus calmes de chaque saison au cours du minimum et du maximum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou (NANEMA et al., 2018).

**Tableau 1** : Jours les plus calmes au minimum et au maximum de phase du cycle solaire 22.

Cycle solaire	Phase	Année	Jours	Mois			
				Mars	Jun	Septembre	Décembre
C22	Minimum	1985	Jours	9,13,21,22,25	3,14,16,18,19	2,3,4,5,29	8,9,21,23,29
	Maximum	1990	Jours	4,10,16,17,31	16,17,20,21,30	2,3,27,29,30	10,11,19,21,29

## II. Résultats

L'exécution de la version 2016 du modèle IRI permet de générer les valeurs  $TEC_{h,j}$  pour une station donnée.

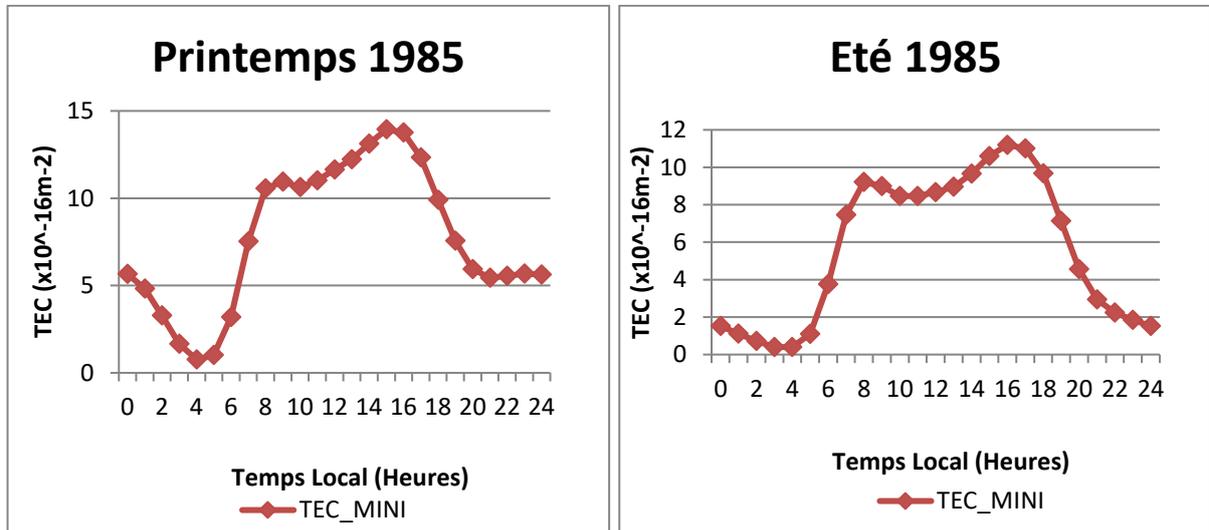
L'heure locale TL sur un site donné est liée au temps universel TU par la relation :

$$TL = TU + \frac{Long}{15^\circ} \quad (2)$$

La station de Ouagadougou est caractérisée par  $Long = 358,5^\circ E$ . Nous faisons l'approximation  $Long = 358,5^\circ E \sim 360^\circ \sim 0^\circ$ .

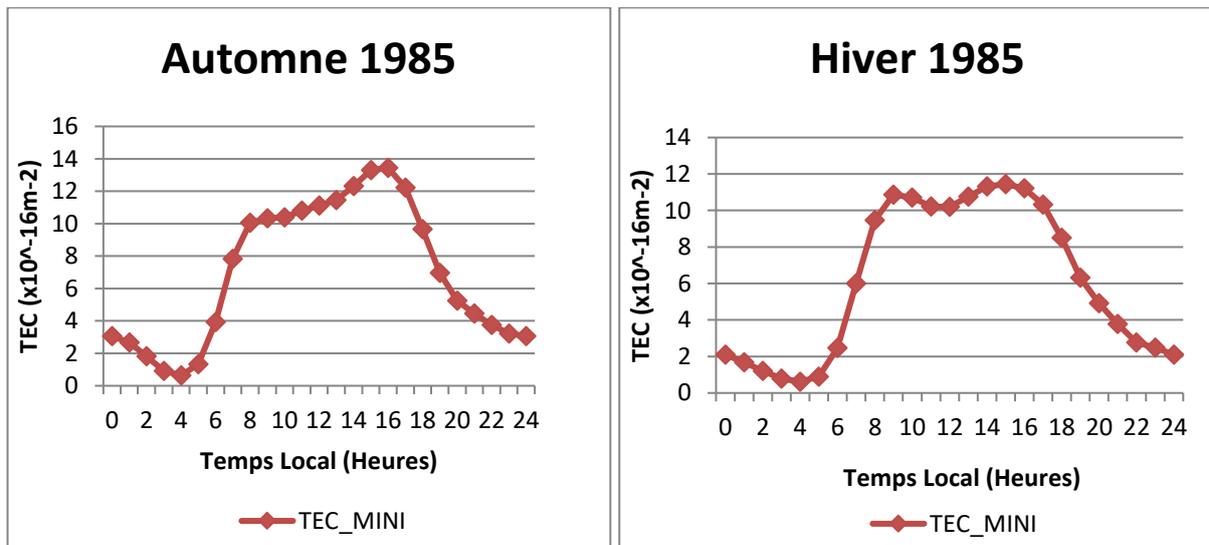
Ainsi, pour la station de Ouagadougou, nous faisons l'approximation que  $TL \sim TU$ .

Les Figures 1 et 2 présentent respectivement la variabilité horaire du Contenu Electronique Total (TEC) pendant le minimum et le maximum de phase du cycle solaire 22. Les panneaux 1a, 1b, 1c, 1d sont respectivement les profils horaires du TEC au printemps, en été, en automne et en hiver au cours du minimum et les panneaux 2a, 2b, 2c, et 2d sont respectivement les profils horaires du TEC au printemps, en été, en automne et en hiver au cours du maximum.



Panneau 1a : Profil horaire du TEC au Printemps

Panneau 1b : Profil horaire du TEC en Eté



Panneau 1c : Profil horaire du TEC en Automne

Panneau 1d : Profil horaire du TEC en Hiver

Figure 1 : Profils horaires du contenu électronique total au minimum 1985

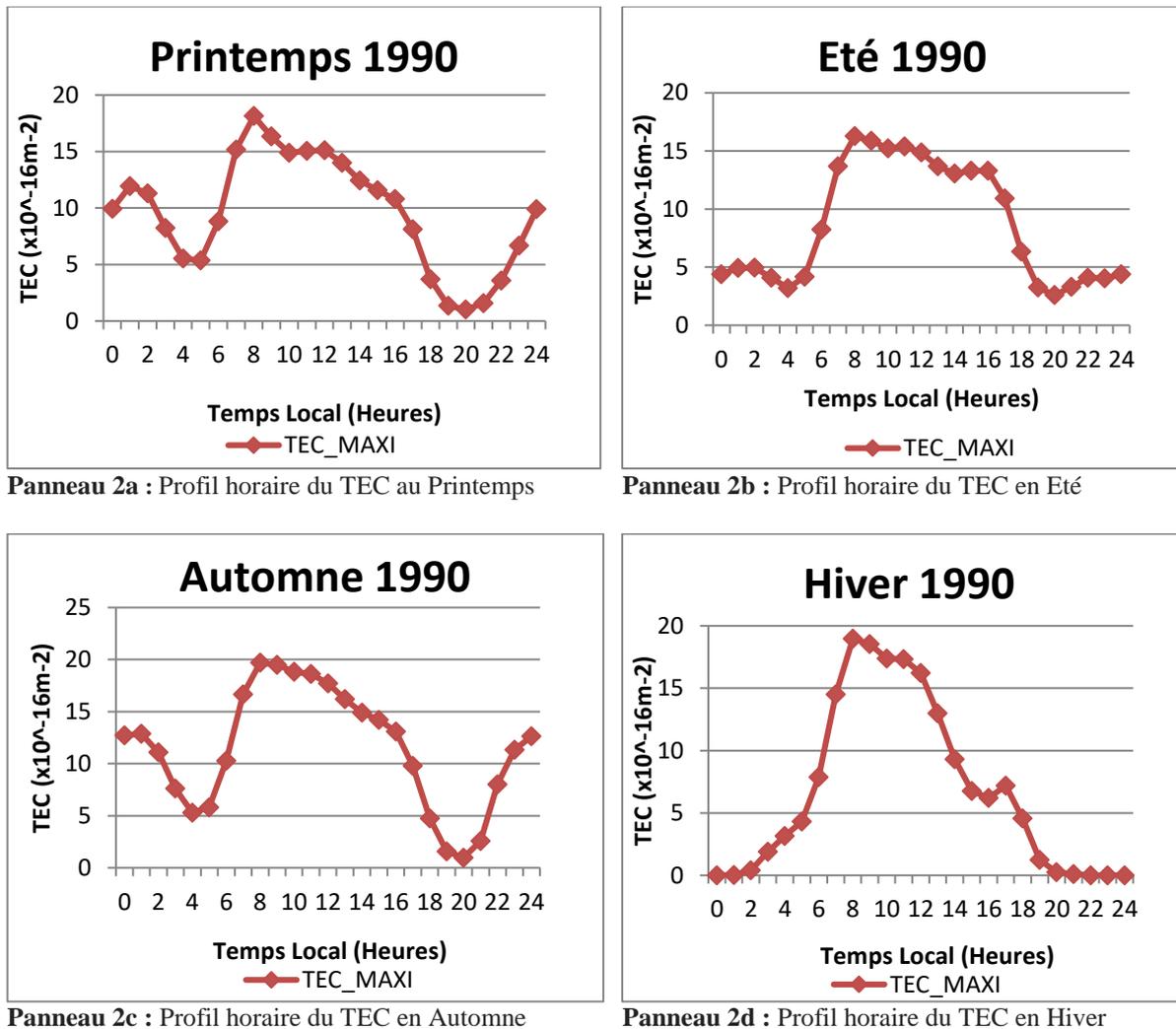


Figure 2 : Profils horaires du contenu électronique total au maximum 1990

### III. Interprétation

Les Figures 1 et 2 présentent le Contenu Electronique Total (TEC) de la sous couche F2 pendant les jours les plus calmes au cours du minimum et du maximum de phase du cycle solaire 22. Sur chaque figure la variation horaire moyenne mensuelle du TEC pour les jours calmes retenus dans la présente étude est présentée.

Pour la station de Ouagadougou, TL = TU. Sur chaque panneau le profil horaire du Contenu Electronique Total de la sous couche F2 comporte trois parties essentielles :

Une zone décroissante de 00.00 LT à 04.00LT et 16.00 LT à 24.00 LT

Une zone croissante entre 04.00 LT et 09.00 LT

Une zone croissante marquée par la présence d'une inflexion (autour de 12.00 LT) entre 09.00 LT et 16.00 LT.

Les profils horaires du Contenu Electronique Total au printemps, en été et en automne du minimum de phase du cycle solaire 22 sont de type « Reversed » marquant la présence d'un contre électrojet intense au cours de l'après-midi. Celui d'hiver est de type « Noon bite-out » correspondant à la superposition d'un électrojet le matin et d'un contre électrojet dans l'après-midi.

Au maximum de phase du cycle solaire 22 les profils horaires du Contenu Electronique Total au printemps, en été, en automne et en hiver du maximum du cycle solaire 22 sont de type « Morning Peak » caractérisé par un pic matinal et correspondant à la présence d'un électrojet moyen pendant la journée.

L'ensoleillement augmente au cours du printemps, atteint son maximum en été et décroît en automne. L'hiver est la saison la moins ensoleillée. L'ionisation des particules présentes dans l'ionosphère due aux rayons solaires est donc plus faible en hiver qu'au cours des autres saisons. Le pic de la densité électronique (NmF2) de la sous couche F2 est lié à la fréquence critique par la relation :

$$foF2 = 9(NmF2)^{1/2} \quad (3)$$

Dans l'expression (3), la fréquence critique foF2 est en MHz si le pic de la densité électronique NmF2 est en m<sup>-3</sup>. La variation de la densité d'électrons libres dans l'ionosphère provoque la réfraction des ondes radioélectriques HF (courbure), ce qui permet à la haute atmosphère d'être utilisée comme réflecteur pour les communications entre des emplacements distants du sol.

Pendant le minimum de phase, le profil du Contenu Electronique Total (TEC) décroît entre 00.00 TL et 04.00 TL, augmente au cours de la journée entre 04.00 TL et 16.00 TL et décroît de 16.00 TL à 24.00 TL au cours des quatre saisons excepté l'hiver. Il présente une évolution quasi-constante entre 20.00 TL et 24.00 TL en hiver. La densité électronique augmente au cours de la journée. L'augmentation de la densité électronique dans l'ionosphère due à l'ionisation des particules présentes dans cette couche n'est pas expliquée seulement par l'irradiation due aux rayons solaires. En effet, aux environs de 16.00 TL en basses latitudes, les rayons solaires sont plus faibles en toutes saisons qu'à 12.00 TL. La forte densité électronique a des origines autres que solaire. Une des hypothèses sera les collisions entre les particules présentes dans cette couche. Ces collisions sont responsables d'une ionisation qui ne dépend pas des rayons solaires mais plutôt du mouvement des particules dans le plasma. Au cours de cette phase, le profil du TEC présente un creux autour de 04h00 avec une production électronique minimale du fait de la faible irradiation à cette période. Par contre entre 04.00 TL et 16.00 TL on note une reprise de la production électronique avec deux pics à 09.00 TL et 16.00 TL au printemps et en hiver. Le même constat est fait en été avec deux pics à 08.00 TL et 16.00 TL et en automne avec un seul pic obtenu à 16.00 TL.

Au cours du maximum de phase du cycle solaire, le profil du TEC décroît d'abord entre 02.00 TL et 04.00 TL puis de 09.00 TL à 20.00 TL et croit entre 04.00 TL à 09.00 TL puis de 20.00 TL le jour J à 02.00 TL le jour J+1 au cours des quatre saisons excepté l'hiver. Il présente une évolution quasi-constante après 20.00 TL en hiver avec des valeurs faibles. La production électronique par l'ionisation des particules dépend du temps. Elle varie avec l'intensité des rayons solaires. Le profil du Contenu Electronique Total montre des valeurs nocturnes minimales avec la présence de deux creux à 04.00 TL et autour de 21.00TL pour le printemps, l'été et l'automne. On note également deux pics obtenu respectivement autour de 01.00 TL et 08.00 TL au printemps, à 08.00 TL et à 11.00 TL en été et à 08.00 TL pour l'automne et l'hiver. La période comprise entre 04h00 et 18h00 correspond à une forte ionisation et une production électronique importante capable d'affecter la propagation des signaux provenant des stations d'émission d'ondes radioélectriques.

L'ensoleillement qui provoque l'ionisation des particules ionosphériques est plus important en été qu'en hiver par contre on remarque que le paramètre TEC présente des valeurs supérieures en hiver qu'en été. Cela met en évidence le phénomène de *l'anomalie d'hiver* qui traduit un excès d'ionisation de la couche F2 en hiver comparativement en été et observé précédemment par d'autres auteurs (NANEMA et al., 2019 ; OUATTARA et al., 2017 ; THIAM et al., 2012 ; QIAN et al., 2010 ; RISHBETH et al., 2000). Il en résulte que le phénomène d'ionisation de la

couche ionosphérique n'est pas seulement dû à l'irradiation solaire. Les collisions entre les particules dans le cadre du mouvement du plasma ionosphérique contribuent également à une ionisation partielle de l'ionosphère. Il subsiste donc une ionisation résiduelle due aux collisions particulaires. Toutefois, l'ionosphère conserve sa neutralité électrique.

Les Figures 1 et 2 montrent également que la densité électronique est plus élevée dans l'ionosphère au cours du maximum que pendant le minimum de phase quelle que soit la saison. Ainsi, l'irradiation solaire est forte pendant le maximum de phase qu'au minimum.

La période 06.00TL-18.00TL correspond une production électronique importante pouvant affecter une onde radioélectrique en fonction de sa fréquence.

## Conclusion

L'étude de la variabilité temporelle du Contenu Electronique Total de la sous couche F2 par la version 2016 du modèle IRI au cours du maximum et du minimum de phase du cycle solaire 22 en basses latitudes montre que ce paramètre ionosphérique dépend du moment, de la saison et de la phase du cycle solaire. Cette étude avait pour objectif la mise en évidence de la réponse de IRI 2016 à la modélisation du Contenu Electronique Total de la sous couche F2. Elle révèle des profils « Reversed » pour toutes les saisons du minimum de phase du cycle solaire 22 excepté l'hiver qui a un profil « Moon-bite out ». Au maximum de phase du cycle solaire 22 l'étude montre un profil « Morning – peak » pour toutes les saisons. Cette étude a permis de mettre en évidence l'existence d'une fraction d'ionisation qui n'est pas due à l'irradiation solaire. Cette ionisation peut être liée aux collisions entre particules dans l'ionosphère. Notre étude a également permis de mettre en évidence le phénomène de *l'anomalie d'hiver*. La version 2016 du modèle IRI est également utilisable pour connaître les créneaux horaires pendant lesquels la production électronique est importante et en conséquence la période propice à respecter pour un calibrage optimum des stations d'émission d'ondes radioélectriques.

## Références bibliographiques

- OUATTARA F., AMORY-MAZAUDIER C., FLEURY R., LASSUDRIE DUCHESNE P., VILLA P., PETITDIDIER M., 2009. West African equatorial ionospheric parameters climatology based on Ouagadougou ionosonde station data from June 1966 to February 1998. *Ann. Geophys.*, 27, 2503–2514, 2009 [www.ann-geophys.net/27/2503/2009/](http://www.ann-geophys.net/27/2503/2009/)
- GNABAHOU D. A., OUATTARA F., 2012. Ionosphere Variability from 1957 to 1981 at Djibouti Station. *Eur. J. Sci. Res*, 73 382–390. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2018.82013>
- NOUR A-M., OUATTARA F., ZERBO J-L., GYEBRE A-M-F., NANEMA E., ZOUGMORE F., 2015. Statistical Study of foF2 Diurnal Variation at Dakar Station from 1971 to 1996: Effect of Geomagnetic Classes of Activity on Seasonal Variation at Solar Minimum and Maximum. *International Journal of Geosciences*, 6, 201-208. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2015.63014>
- OUATTARA F., 2013. IRI-2007 foF2 Predictions at Ouagadougou Station during Quiet Time Periods from 1985 to 1995. *Archives of Physics Research*, 4, 12-18.
- NANEMA E., OUATTARA F., 2013. HmF2 quiet time variations at Ouagadougou and comparison with IRI-2012 and TIEGCM predictions during solar minimum and maximum. *Archives of Applied Science Research*, 5 (5):55-61
- GNABAHOU D. A., OUATTARA F., NANEMA E., ZOUGMORE F., 2013. foF2 diurnal variability at African equatorial stations: Dip equator secular displacement effect. *International Journal of Geosciences*, 4 1145. <https://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.48108>
- OUATTARA F., 2009. Relationship between geomagnetic classes' activity phases and their occurrence during the sunspot cycle. *Ann. Geophys.* 52, 107–116.
- ZOUNDI C., OUATTARA F., FLEURY R., ZOUGMORE F., 2013. CODGTEC variation during solar

maximum and minimum over Niamey. *European Scientific Journal* Edition vol.9, No.27 ISSN: 1857 – 7881

BOUTIOUTA S., BELBACHIR A. H., DEKKICHE H., 2006. Contrôle de l'activité ionosphérique à partir des données GPS . *Ed. Télédétection*, Vol. 5, N°4, 325-338.

OUATTARA F., ROLLAND F., 2008. Variability of CODG TEC and IRI 2001 Total Electron Content (TEC) during IHY Campaign Period (21 March to 16 April 2008) at Niamey under Different Geomagnetic Activity Conditions. *Scientific Research and Essays*, 6, 3609-3622. <https://doi.org/10.5897/SRE10.1050>

OUATTARA F., AMORY-MAZAUDIER C., 2012. Statistical study of the equatorial F layer critical frequency at Ouagadougou during solar cycles 20, 21 and 22, using Legrand and Simon's classification of geomagnetic activity. *EDP Sci.* 2.

OUATTARA F., NANEMA E., 2014. Quiet Time foF2 Variation at Ouagadougou Station and Comparison with TIEGCM and IRI-2012 Predictions for 1985 and 1990. *Phys. Sci. Int. J.* 892–902.

BITTENCOURT J. A., CHRYSSEAFIDIS M., 1994. On the IRI model Predictions for the Low-Latitude Ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 56, 995-1009. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)90159-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)90159-7)

RICHMOND A. D., RIDLEY E. C., ROBLE R. G., 1992. A Thermosphere/Ionosphere General Circulation Model with Coupled Electrodynamics. *Geophysics Research Letter*, 1960. <https://doi.org/10.1029/92GL00401>

WANG W., WILTBERGER M., BURNS A. G., SOLOMON S. C., KILLEEN T. L., MARUYAMA N., LYON J. G., 2004. Initial Results from the Coupled Magnetosphere-Ionosphere Thermosphere Model: Thermosphere-Ionosphere Responses. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66 (1516)1425. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.04.008>

NANEMA E., OUEDRAOGO I., ZOUNDI C., OUATTARA F., 2018. Electron Bulk Surface Density Effect on Critical Frequency in the F2-Layer. *International Journal of Geosciences*, 9, 572-578. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.99033>.

ZERBO J. L., OUATTARA F., ZOUNDI C., GYÉBRÉ A., 2011. Solar cycle 23 and geomagnetic activity since 1868. *Revue CAMES, série A.12* (2), 255-262.

OUATTARA F., ZOUNDI C., FLEURY R., 2012. Comparison between CODG TEC and GPS based TEC observations at Koudougou station in Burkina Faso, *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 41, 617-623.

OUATTARA F., ZERBO J.-L., KABORE M., FLEURY R., 2017. Investigation on equinoctial asymmetry observed in Niamey Station Center for Orbit Determination in Europe Total Electron Content (CODG TEC) variation during ~ solar cycle 23. *Int. J. Phys. Sci.* 12, 308–321.

THIAM N., OUATTARA F., GNABAHOU A. D., AMORY-MAZAUDIER C., FLEURY R., DUCHESNE P. L., 2012. Variation de la Fréquence Critique de la Couche F2 (foF2) de la Station de Dakar avec le Cycle Solaire. *J. Sci.* 11, 16–20.

NANEMA E., KONATE M., OUATTARA F., 2019. Peak of Electron Density in F2-Layer Parameters Variability at Quiet Days on Solar Minimum. *J. Mod. Phys.* 10, 302–309. <https://DOI:10.4236/jmp.2019.103021>

OUATTARA F., KABORE S., GYEBRE A. M. F., ZERBO J.-L., 2015. CMEs' Shock Occurrences from Solar Cycle 11 to solar Cycle 23. *European Journal of Scientific Research* 130, 153–159.

QIAN L., BURNS A. G., CHAMBERLIN P. C., SOLOMON S. C., 2010. Flare location on the solar disk: Modeling the thermosphere and ionosphere response. *Journal of Geophysical Research*, 115, A09311, <https://doi:10.1029/2009JA015225>.

RISHBETH H., MULLER-WODARG I. C. F., ZOU L., FULLER-ROWELL T. J., MILLWARD G. H., MOFFETT R. J., IDENDEN D. W., AYLWARD A. D., 2000. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Annales Geophysicae*, 18(8), 945–956.