

Variabilité saisonnière de la fréquence critique de la couche E de l'ionosphère au minimum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou

Gédéon SAWADOGO¹, Emmanuel NANEMA^{1,2}
Frédéric OUATTARA¹

Résumé

L'ionosphère est la partie de l'atmosphère qui s'étend entre 50 km et 2000 km. Elle contient de nombreuses particules parmi lesquelles N_2 et O_2 . L'interaction entre les rayons X et ultraviolets provenant du soleil et les particules présentes dans la couche ionosphérique provoque l'ionisation de ces particules. Les ions dominants dans la couche ionosphérique sont les ions NO^+ ; N_2^+ ; O_2^+ ; O^+ ; O_2^- . Au cours de la journée, l'ionosphère, en basses latitudes, présente une stratification nette (D, E, F₁, F₂). Les couches D et E se combinent et peuvent même disparaître au cours de la nuit. L'ionisation des particules au sein de chaque couche la rend imperméable à certaines ondes électromagnétiques, notamment les ondes radio. La couche ionisée peut se comporter donc comme un obstacle au passage des ondes, en fonction de sa densité électronique. L'ionosphère demeure électriquement neutre et se comporte comme un plasma en mouvement. La densité électronique pour laquelle l'onde électromagnétique est réfléchié définit la fréquence critique de cette couche. Ce travail est une étude de la variabilité de la fréquence critique de la couche E de l'ionosphère (foE) au cours du minimum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou. Les variabilités saisonnières de foE pour les mois caractéristiques de chaque saison sont déterminées. L'étude est effectuée au cours des jours calmes, à l'aide du modèle International Reference Ionosphere (IRI).

Mots clés : Ionosphère, couche E, fréquence critique, cycle solaire, jours calmes, modèle IRI.

Critical frequency seasonal variability in ionosphere E region during 22 minimum solar cycle phase at Ouagadougou station

Abstract

Ionosphere is the part of atmosphere region laying from 50 km up to 1000 km. This layer contains numerous of particles among which we have N_2 and O_2 . Interactions between X-rays and ultraviolets coming from the sun and the particles in ionosphere layer cause ionization of these particles. The major ions in ionosphere are NO^+ , N_2^+ , O_2^+ , O^+ , O_2^- . At daytime, under low latitudes, ionosphere layer shows different layers (D, E, F₁, F₂). D and E layers combine at nighttime and sometimes disappear. The density of ionization of a layer gives it the capacity to reflect radio waves. Ionosphere layer is electrically neutral and moves like a plasma. Critical frequency is given by the maximum density value below which radio waves reflect when they hit the layer as an obstacle. This study deals with critical frequency of ionosphere E layer (foE) at 22 minimum solar cycle phase at Ouagadougou station. foE seasonal variability for characteristic month of each season is calculated. Quiet days are considered in this study. The study also uses International Reference Ionosphere (IRI) model for foE modeling.

Key words: Ionosphere, E-layer, critical frequency, solar cycle, quiet days, IRI model.

Introduction

La fréquence critique de la couche E (foE) est la fréquence au-dessous de laquelle une onde radio est réfléchiée par cette couche. La détermination de foE permet dans le cadre de la télécommunication, la détermination de la fréquence maximale utilisable (MUF) pour une propagation oblique des ondes radio. A la station de Ouagadougou, de nombreuses études de la couche F de l'ionosphère ont été effectuées ces dernières années (DIABATA *et al*, 2018 ;

¹ Université Norbert ZONGO, Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace (LAREME), Koudougou Burkina Faso ;

² Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), Ouagadougou, Burkina Faso, mail : nanema_emmanuel@yahoo.fr

CHEN *et al*, 2011 ; NANEMA *et al*, 2018, OUATTARA *et al*, 2011 ; OUATTARA *et al*, 2015). Ces études (ABE *et al*, 2013 ; CHU *et al*, 2009 ; MOSTAPHA *et al*, 2018 ; TITHERIDGE *et al*, 2000 ; WONGCHAROEN *et al*, 2015 ; ZHOU, 1999 ; ZOLESI *et al*, 2014) ont révélé que la variabilité de la fréquence critique dépend de trois principaux facteurs : la saison (printemps, été, automne et hiver), la phase du cycle solaire (minimum, ascendant, maximum et descendant) et l'activité géomagnétique (périodes calmes, perturbées). Le profil de la fréquence critique diffère d'une station à l'autre. Dans ce travail, la variabilité du pic de la fréquence critique de la couche E est déterminée pour chaque saison au cours du minimum de phase du cycle solaire 22. L'investigation faite dans ce travail est effectuée dans les conditions de jours calmes, à la station de Ouagadougou.

I. Matériel, site d'étude et méthodes

2.1 Matériel et site d'étude

L'*International Reference Ionosphere* (IRI) est le modèle utilisé pour la détermination du paramètre ionosphérique foE. IRI est un modèle semi-empirique, développé et mis à jour chaque quatre ans par une équipe de chercheurs. 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 station de Ouagadougou, située en Afrique de l'Ouest, présente les caractéristiques suivantes : lat = 12.4°N, long = 358.5°E.

2.2 Méthodes

Le minimum de phase du cycle solaire 22 est caractérisé par $Rz \leq 20$ (ZERBO *et al*, 2011). Les jours calmes dans ce minimum de phase sont définis par $Aa \leq 20nT$. Les mois caractéristiques des saisons sont les suivants : décembre pour l'hiver, mars pour le printemps, juin pour l'été et septembre pour l'automne.

La méthodologie de détermination de la fréquence critique repose sur le calcul de la moyenne horaire mensuelle du paramètre foE dans les cinq jours les plus calmes de chaque mois caractéristique.

Ainsi, l'équation (1) définit la fréquence critique comme suit :

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

Dans la relation (1), foE_h désigne la fréquence critique de la couche E à l'heure h pour le mois caractéristique considéré, foE_{h,j} est la valeur de la fréquence critique à l'heure h pour le jour j. Ainsi, h ∈ [0,24], et j ∈ [1,5].

Le modèle IRI permet d'extraire les différentes valeurs de foE_{h,j}. Il devient alors possible de déterminer la valeur de la fréquence critique à l'heure h (foE_h) en calculant la valeur moyenne des paramètres foE_{h,j} sur les cinq jours les plus calmes pour chaque mois caractéristique.

II. Résultats et interprétations

En considérant les hypothèses et conditions énoncées précédemment (paragraphe 2), l'année définissant le minimum de phase du cycle solaire 22 est 1985 avec $Rz = 17.9$ et $F10.7 = 70$. Le tableau suivant présente les jours les plus calmes pour les mois considérés.

Tableau: Sélection des jours les plus calmes au minimum de phase du cycle solaire 22

Minimum de phase du cycle solaire 22	Saison	Hiver	Printemps	Ete	Automne
	Mois	Décembre	Mars	Juin	Septembre
	Jours calmes	8,9,21,23,29	9,13,21,22,25	3,14,16,18,19	2,3,4,5,29

Les valeurs des paramètres foE obtenues à l'aide de l'équation (1) permettent d'obtenir les profils contenus dans les figures n°1, n°2, n°3, n°4 et n°5.

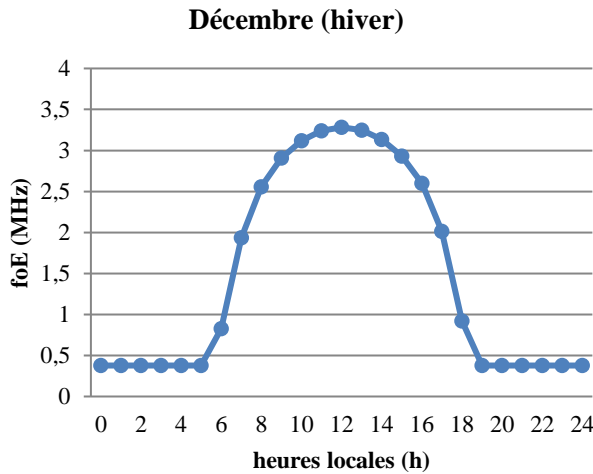


Figure 1 : Profil de foE en décembre 1985

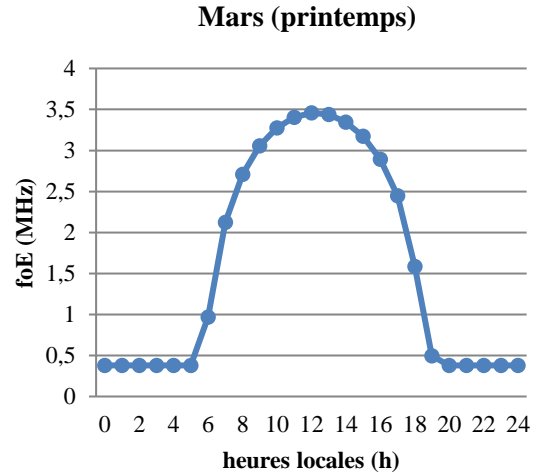


Figure 2 : Profil de foE en mars 1985

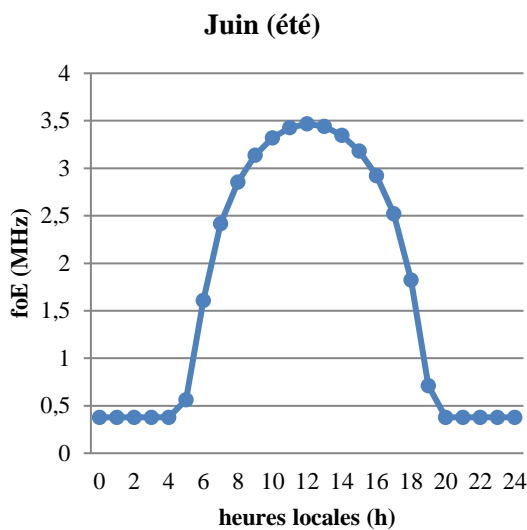


Figure 3 : Profil de foE en juin 1985

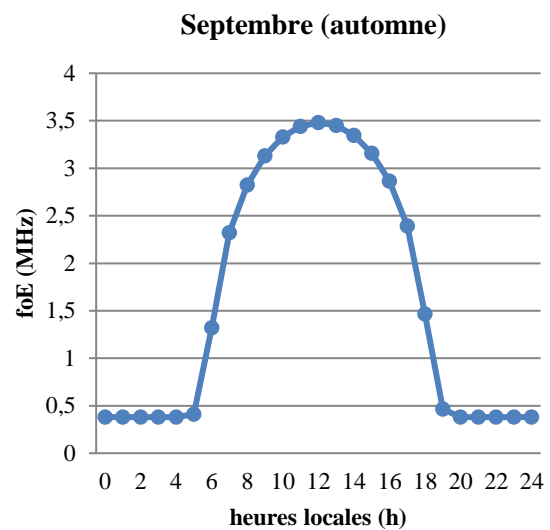


Figure 4 : Profil de foE en septembre 1985

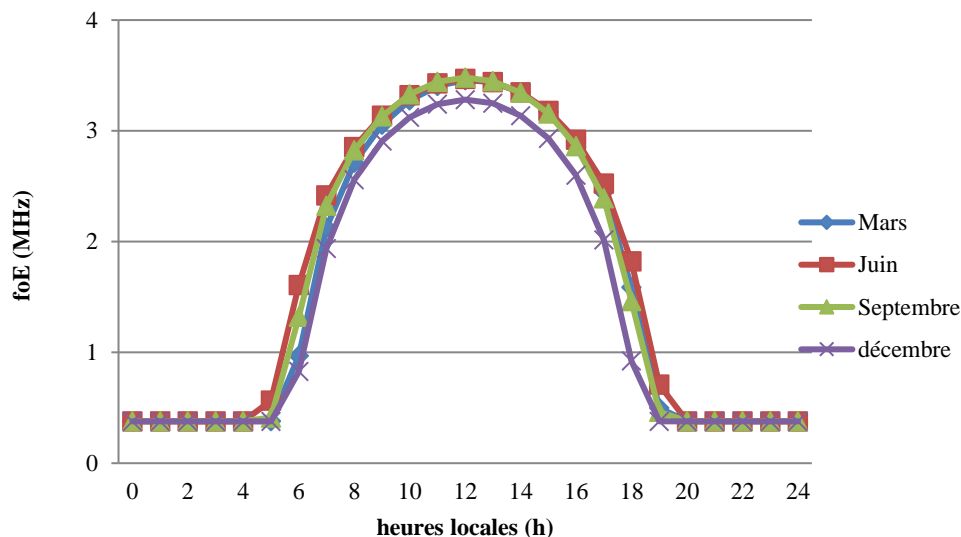


Figure 5 : Variabilité de foE par saison au cours du minimum de phase de C22

Les figures n°1, n°2, n°3, et n°4 présentent la variabilité saisonnière de la fréquence critique au cours du minimum de phase du cycle solaire 22. La figure n°5 présente simultanément les profils de la fréquence critique de la sous couche E pour les quatre saisons de l'année étudiée.

Les profils de la variabilité saisonnière présentés dans les figures 1, 2, 3 et 4 ont les mêmes allures de forme parabolique. Les profils de la variabilité de foE présentent trois parties au cours de la journée : Une partie horizontale de 0h à 5h et de 19h à 24h, une partie croissante de 5h à 12h et enfin, une partie décroissante de 12h à 19h. Le profil présente un maximum à 12h.

Les intervalles [0h, 5h] et [19h, 24h] correspondent à l'aube et au crépuscule. Cela se traduit par l'absence de rayons solaires en basses latitudes. Au cours de ces périodes, l'irradiation solaire est faible, voire nulle. L'ionisation d'origine solaire de la sous couche E de l'ionosphère est faible. Les profils de foE présentent une faible variation. Les valeurs prises par foE sont constantes et très faibles au cours de cette période. Toutefois, elles ne sont pas nulles. Cela montre que la couche E demeure ionisée. Cette ionisation résiduelle a d'autres origines que l'irradiation solaire. L'hypothèse des collisions entre particules de la couche ionosphérique se comportant comme un plasma en mouvement tout en conservant son caractère neutre sur le plan électrique peut être émise. Les faibles valeurs de fréquence critique de la sous couche E au cours de ces périodes montrent que l'obstacle constitué par cette couche est facilement franchi par les ondes de télécommunication. L'hypothèse de l'inexistence de la couche E à l'aube et au crépuscule peut être émise. En conclusion, entre [0h, 5h] et [19h, 24h], la couche E disparaît.

La période comprise dans l'intervalle [5h, 12h] correspond pour la station considérée, à l'apparition des rayons solaires. L'irradiation solaire croît et atteint son maximum à 12h. Le profil de foE croît proportionnellement à cette irradiation et atteint également son maximum à 12h. La variation de foE est proportionnelle à la croissance de l'irradiation solaire. Au cours de cette période, l'ionisation maximale de la sous couche E se situe aux environs de 12h. Le paramètre foE présente des valeurs qui « inhibent » l'ionisation résiduelle. Au cours de cette période, la fréquence critique de la sous couche E présente des valeurs croissantes et atteint son maximum à 12h. Il s'en suit que la sous couche constitue un obstacle pour les ondes de télécommunication émises à partir des stations radio. Au cours de cette période, l'existence de la sous couche E est formelle.

La période comprise dans l'intervalle [12h, 19h] correspond à la baisse croissante des rayons solaires au niveau de la station. L'intensité des rayons solaires baisse progressivement jusqu'à une évanescence totale aux environs de 19h. L'irradiation solaire décroît dans la même proportion. Les valeurs de foE présentées au cours de cette période montrent que la sous couche E demeure existante. Elle se comporte toujours comme un obstacle (dont elle a acquis le caractère depuis 5h).

La figure n°5 est la représentation graphique simultanée des profils de la fréquence critique de la sous couche E de l'ionosphère au cours de chaque saison pendant le minimum de phase du cycle solaire 22. L'examen de cette figure montre qu'en hiver, les valeurs de la fréquence critique de la sous couche E sont plus faibles qu'en été. L'ionisation de la sous couche E est donc plus faible en hiver qu'en été. Le phénomène de *l'anomalie d'hiver* n'est donc pas observé dans cette phase. L'absence de ce phénomène a déjà été observé dans l'étude de la fréquence critique de la sous couche F₂ pendant le minimum de phase.

Conclusion

Cette étude présente la variabilité de la fréquence critique de la sous couche E de l'ionosphère au cours du minimum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou, située dans les basses latitudes. Les profils de la variabilité saisonnière de la fréquence critique ont été présentés. Ils montrent qu'au cours de la nuit, les valeurs de la fréquence critique sont faibles, traduisant l'existence d'une ionisation résiduelle dont l'origine n'est pas liée aux rayons X et ultraviolets provenant du soleil mais plutôt aux collisions entre particules dans leur mouvement à l'intérieur du plasma ionosphérique. La disparition de la sous couche E au cours de la nuit est mise en évidence dans cette étude à l'aide des valeurs presque nulle de la fréquence critique. Cette étude met également en évidence l'absence de *l'anomalie d'hiver* au cours du minimum de phase.

Références bibliographiques

DIABATÉ Abidina, OUATTARA Frédéric and ZERBO Jean Louis, 2018, Annual and Diurnal Variabilities in the Critical Frequency (foF₂) during Geomagnetic Fluctuating Activity over Solar Cycles 21 and 22 at Ouagadougou, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2018, 8, 435-445, <https://doi.org/10.4236/acs.2018.84029>

CHEN Yiding, LIU Libo, and WAN Weixing, 2011, Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009 *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, a04304, [doi:10.1029/2010JA016301](https://doi.org/10.1029/2010JA016301)

NANEMA Emmanuel, OUÉDRAOGO Issaka, ZOUNDI Christian, OUATTARA Frédéric, 2018, Electron Bulk Surface Density Effect on Critical Frequency in the F₂-Layer, *International Journal of Geosciences*, 2018, 9, 572-578, <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.99033>

OUATTARA Frédéric and AMORY-MAZAUDIÉ Christine, 2012, Statistical study of the equatorial F₂ layer critical frequency at Ouagadougou during solar cycles 20, 21 and 22, using Legrand and Simon's classification of geomagnetic activity, *J. Space Weather Space Clim.* 2 (2012) A19DOI: [10.1051/swsc/2012019](https://doi.org/10.1051/swsc/2012019)

- OUATTARA Frédéric, ALI Mahamat Nour, ZOUGMORÉ François, 2015, A comparative study of seasonal and quiet time foF2 diurnal variation at Dakar and Ouagadougou stations during solar minimum and maximum for solar cycles 21-22, *European Scientific Journal* August 2015 edition vol.11, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431,
- ABE O.E., RABIU A.B. and ADENIYINI J.O, 2013, Variability of foE in the equatorial ionosphere with solar activity, *Advances in Space Research* 51 (2013) 69-75-
<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.08.010>
- CHU Yen-Hsyang, WU Kong-Hong and SU Ching-Lun, 2009, A new aspect of ionospheric E region electron density morphology E region, *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, A12314, [doi:10.1029/2008JA014022](https://doi.org/10.1029/2008JA014022)
- MOSTAFA Md Golam, HARALAMBOUS Haris, and OIKONOMOU Christina, 2018, Statistical Ionospheric E Layer Properties Measured with the Cyprus Digisonde and Comparisons with IRI Predictions, *Advances in Space Research* 61(1):337-47.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.029>.
- TITHERIDGE J.E., 2000, Modelling the peak of the ionospheric E-layer, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62 (2000) 93±114, [PII:S13 6 4- 6826\(99\)0010 2- 9](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00102-9)
- WONGCHAROEN P., KENPANKHO P., SUPNITHI P., ISHII M., TSUGAWA T., 2015, Comparison of E layer critical frequency over the Thai station Chumphon with IRI, *Advances in Space Research* 55 (2015) 2131–2138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.01.031>
- ZHOU Q. H., 1999, Incoherent scatter radar study of the impact of the meteoric influx on nocturnal E-region ionization, *Geophysical Research Letters*, vol. 26, no. 13, pages 1833-1836
- ZOLESI B. and CANDLER L. R., 2014, Current and Future Trends in Ionospheric Prediction and Forecasting Ionospheric Prediction and Forecasting, *Geophysics*, [DOI: 10.1007/978-3-642-38430-1_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38430-1_10)
- ZERBO J-L, OUATTARA F, ZOUNDI C, and GYEBRE A (2011), Cycle solaire 23 et activité géomagnétique depuis 1868. *Rev. CAMES-Série A*, 12 (2): 255-262

Modélisation par IRI-2016 de la densité d'électrons de la couche D de l'ionosphère au maximum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou

Roger NAKOLEMDA¹
Emmanuel NANEMA^{1,2}, Frédéric OUATTARA¹

Résumé

L'ionosphère est la couche de l'atmosphère au sein de laquelle les ondes radioélectriques réfléchissent pour la télécommunication. Cette couche se comporte comme un obstacle pour les ondes émises par les stations radio. Elle est située entre 50 km et 2000 km. De nombreux modèles ont été développés pour investiguer cette couche ionosphérique afin de mieux appréhender sa composition particulière (électrons, ions, atomes, molécules). La densité particulière de la couche ionosphérique lui confère sa capacité de réflexion des ondes radioélectriques. Certains modèles sont des simulations mathématiques, tandis que d'autres reposent sur des relevés de mesures fournis par les stations. Dans ce travail, nous présentons une étude de la variation du pic de la densité électronique dans la couche D de l'ionosphère (NmD) à l'aide du modèle International Reference Ionosphere (IRI) sous sa version 2016. L'étude est menée dans les conditions de périodes calmes au cours du cycle solaire 22. Elle est effectuée en basses latitudes, à la station de Ouagadougou, située en Afrique occidentale. Les profils de la densité des électrons dans la couche D en fonction des saisons et du temps ont été présentés. L'étude interprète également l'apparition et la disparition de la couche D au cours du temps en introduisant les notions de *jour ionosphérique* et de *nuit ionosphérique*.

Mots clés : Ionosphère, densité d'électrons, couche D, cycle solaire, jours calmes, modèle IRI.

Modeling electron density in ionosphere D region by IRI-2016 during 22 maximum solar cycle phase at Ouagadougou station

Abstract

Ionosphere region is the site of radio waves reflection for communication. Ionosphere behaves as an obstacle for radio waves emitted by stations. This part of atmosphere lays from 50km up to 2000km. Many models have been developed for ionosphere layer investigation to give a good knowledge of the composition in particles (electrons, ions, atoms and molecules) of this layer. Particles density in this layer gives it the reflectivity to radio waves emitted from stations. Some models are based on mathematical approaches, while others use data provided by stations. This work deals with peak of electron density in D layer of ionosphere region by use of the 2016-version of International Reference Ionosphere (IRI) model. The study uses quiet days of 22 solar cycle phase under low latitudes, at Ouagadougou station, located in West Africa. Seasonal and time profiles of electron density in D layer of ionosphere are extracted by running the model. The study also interprets the disappearance of D layer at nighttime by introducing the concepts of *ionosphere nighttime* and *ionosphere daytime* in D layer.

Key words: Ionosphere, D-layer, electron density, solar cycle, quiet days, IRI model.

Introduction

L'ionosphère est une région de l'atmosphère qui est très riche en particules. Dans cette région, le rayonnement photonique d'origine solaire ionise les particules. Ce phénomène d'ionisation est à l'origine de l'atténuation du rayonnement électromagnétique, de la dissociation moléculaire et atomique, et de l'excitation des composants atmosphériques (LANDMARK, 1973). Toutefois, la couche ionosphérique demeure neutre sur le plan électrique et se comporte comme un plasma en mouvement. L'ionosphère terrestre varie principalement avec l'altitude

¹ Université Norbert ZONGO, Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace (LAREME), Koudougou, Burkina Faso

² Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), Ouagadougou, Burkina Faso

Correspondant : nanema_emmanuel@yahoo.fr

et la latitude. En basses altitudes (< 60 km), où la durée de vie des particules chargées est suffisamment courte, l'équilibre chimique est prépondérant. En hautes altitudes (60 – 800 km), l'ionisation primaire se produit par le rayonnement UV solaire (< 200 nm). A plus haute altitude (> 1000 km), l'ionisation des particules est faible. D'une manière générale, l'ionosphère présente trois couches principales (D, E et F) dont la nature de chacune est liée à son caractère électrique. Les couches D et E se combinent la nuit. Au cours de la journée, sous l'effet de l'intensité des rayons solaires, la couche F se subdivise en deux sous couches F1 et F2 (BAUER et JACKSON, 1962, BAUER *et al*, 1964). L'équilibre entre ionisation et recombinaison dépend fortement du rayonnement solaire. Entre le matin et l'après-midi, l'ionisation dépasse la recombinaison et la densité électronique s'élève. Entre la fin de l'après-midi et le début de soirée, la densité électronique baisse car l'ionisation diminue et devient moins efficace que la recombinaison. Le degré d'ionisation diminue fortement la nuit et peut entraîner la disparition de certaines espèces ionisées. La composition de l'ionosphère en particules permet de déterminer la densité des électrons qui y sont contenus. Des études menées sur la densité d'électrons de la couche F (NmF) ont montrés que le profil de la densité d'électrons varie en fonction de la saison, du cycle solaire, de l'activité géomagnétique et diffère d'une station à l'autre (OUATTARA et NANEMA, 2011, OUATTARA et NANEMA, 2014, NANEMA *et al*, 2018a, NANEMA *et al*, 2018b, NANEMA *et al*, 2018c, NANEMA *et al*, 2018d). Dans ce travail, l'étude de la variabilité de la densité d'électrons de la couche D de l'ionosphère (NmD) au cours du maximum de phase du cycle solaire 22 à la station de Ouagadougou est effectuée. Les profils saisonniers de NmD pour les mois caractéristiques de chaque saison sont déterminés à l'aide du modèle IRI sous sa version 2016. IRI-2016 est un modèle semi-empirique développé par une équipe de chercheurs, et régulièrement mis à jour. Ce modèle est accessible en ligne (www.irimodel.org). L'étude est effectuée au cours du maximum de phase du cycle solaire 22 dans les conditions de jours calmes à la station de Ouagadougou.

I. Matériel et méthodes

La modélisation de l'ionosphère à l'aide du modèle IRI est basée sur les trois principes fondamentaux suivants (NANEMA *et al*, 2018b, NANEMA *et al*, 2018c, NANEMA *et al*, 2018d) : (i) Chaque saison est décrite entièrement par son mois caractéristique. Ainsi, les mois de mars, juin, septembre et décembre caractérisent respectivement le printemps, l'été, l'automne et l'hiver ; (ii) Chaque mois caractéristique d'une saison est entièrement décrit par ses cinq jours les plus calmes. Le jour le plus calme est défini par son index $Aa \leq 20$ nT ; (iii) Le maximum de phase d'un cycle solaire est caractérisé par le nombre de taches solaires défini par son *sunspot number* $Rz > 100$. Ainsi, l'année 1990 correspond au maximum de phase du cycle solaire 22.

Le modèle IRI est mis en fonctionnement avec les paramètres d'entrée suivants : Année = 1990, Longitude = 358,5°E, Latitude = 12,5°N qui sont les caractéristiques géographiques de la station de Ouagadougou, Hauteur = 75, Pas = 1. Avec les paramètres d'entrée ci-dessus, les valeurs de NmD sont obtenues sur « *List Model data* » sous forme matricielle.

La détermination de la densité d'électrons repose sur le calcul de la moyenne horaire mensuelle du paramètre NmD des cinq jours les plus calmes de chaque mois caractéristique.

Ainsi, l'équation (1) définit la densité électronique comme suit :

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

Dans la relation (1), NmD_h désigne la fréquence critique de la couche D à l'heure h pour le mois caractéristique considéré, $NmD_{h,j}$ est la valeur de la fréquence critique à l'heure h pour le jour j . Ainsi, $h \in [0,24]$, et $j \in [1,5]$.

Le modèle IRI permet d'extraire les différentes valeurs de $NmD_{h,j}$. Il devient alors possible de déterminer la valeur de la densité d'électrons à l'heure h , NmD_h , en calculant la valeur moyenne des paramètres $NmD_{h,j}$ sur les cinq jours les plus calmes pour chaque mois caractéristique.

Pour une station caractérisée par sa longitude $Long$, l'heure locale TL est liée au temps universel par la relation (2) comme suit :

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

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

Ainsi, pour la station de Ouagadougou, nous pouvons écrire : $TL \sim TU$.

II. Résultats

En considérant les hypothèses et conditions énoncées précédemment (paragraphe 2), l'année définissant le maximum de phase du cycle solaire 22 est 1990 ($Rz > 100$).

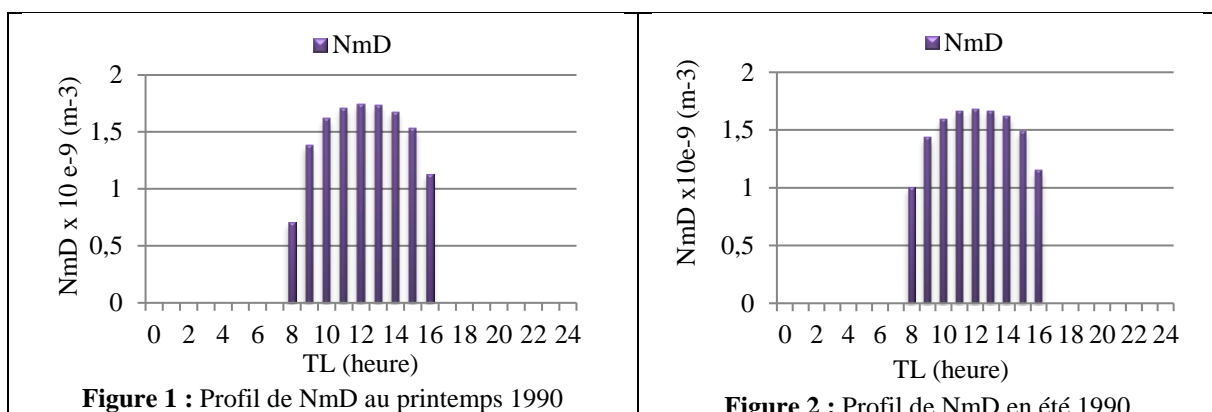
Le tableau suivant présente les cinq jours les plus calmes sélectionnés dans chaque saison sur le maximum solaire.

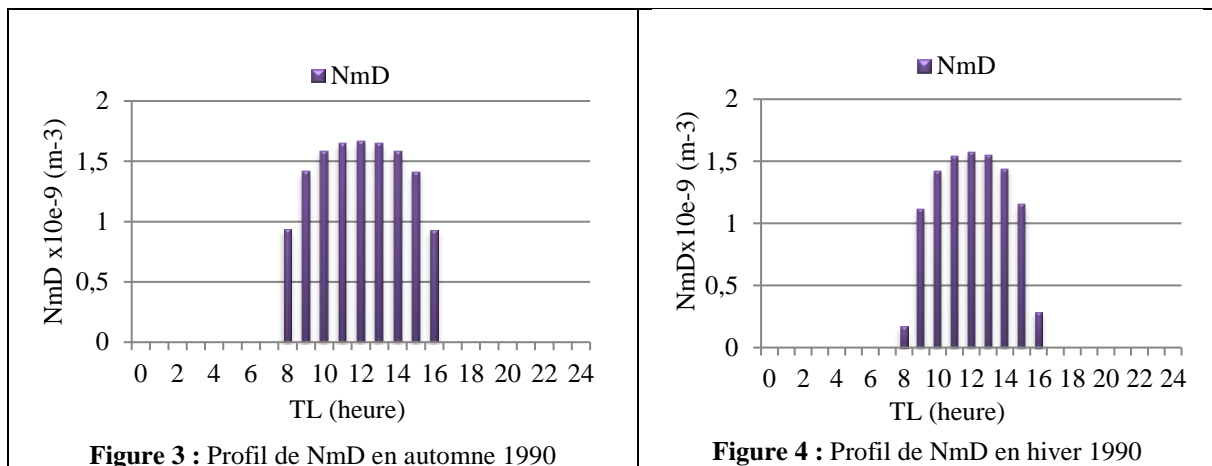
Tableau: Les cinq jours les plus calmes de l'année 1990

Cycle	Phase	Année	Mars	Juin	Septembre	Décembre
22	Maximum	1990	4,10,16,17,31	16,17,20,21,30	2,3,27,29,30	10,11,19,21,29

Les valeurs de densité électronique obtenues à partir du fonctionnement du modèle IRI sont $NmD_{h,j}$. Elles sont exportées dans un fichier Excel et traitées à partir de l'équation (1). Les valeurs des paramètres NmD sont obtenues à l'aide de l'équation (1).

Les figures 1, 2, 3 et 4 présentent les profils de NmD pour les différentes saisons au cours de l'année 1990 à la station de Ouagadougou.





III. Interprétation

Les figures 1, 2, 3 et 4 montrent que le profil de la densité électronique dans la couche D au cours de l'année 1990 dépend de la saison et du temps. En hiver, NmD présente des valeurs faibles. Au cours de cette saison, l'ionisation de la couche D est faible. L'intensité de l'irradiation solaire est faible due à l'obliquité. En effet, l'obliquité est plus faible au cours de l'hiver dans l'hémisphère nord. Dans cette partie du globe terrestre, les rayons solaires qui arrivent sur la terre s'éloignent de l'angle de 90°. Ce phénomène se produit inversement dans l'hémisphère sud. Les variations horaire et saisonnière de NmD ne sont pas uniformes au cours du maximum de phase du cycle solaire. Les profils de NmD en fonction du temps et des saisons présentent une zone croissante de 08.00 TL à 12.00 TL, un maximum à 12.00 TL et une zone décroissante de 12.00 TL à 16.00 TL. Ainsi, lorsque $TL \in [08.00, 16.00]$, la couche D est ionisée sous l'effet des rayons solaires. Le paramètre NmD présente des valeurs significatives. Cette période correspond au « *jour ionosphérique* » dans la couche D. Entre 00.00 TL et 08.00 TL et entre 16.00 TL et 24.00 TL, les profils de NmD ne présentent pas de valeurs significatives pour le paramètre NmD. Ainsi, lorsque $TL \in [00.00, 08.00] \cup [16.00, 24.00]$, l'ionisation de la couche D due aux rayons solaires n'est pas significative. Cette période correspond à la « *nuit ionosphérique* » dans la couche D. L'ionisation de la couche D sous l'effet de l'irradiation des rayons solaires n'est pas mise en évidence pendant la *nuit ionosphérique* dans la couche D. Cette ionisation apparaît au cours du *jour ionosphérique*. La couche D est donc mise en évidence au cours du *jour ionosphérique*.

Au cours du maximum de phase de cycle solaire 22, NmD présente des valeurs plus faibles à une heure donnée pendant l'hiver comparée à l'été. Dans la couche D, l'*anomalie d'hiver* n'est pas observée au cours du maximum de phase. Ce phénomène ne se produit pas.

Conclusion

L'étude de la couche D de l'ionosphère au cours du maximum de phase du cycle solaire 22 à l'aide du modèle IRI montre que la densité électronique de cette couche dépend de la saison et du temps. En hiver, les valeurs de la densité électronique sont plus faibles que pendant les autres saisons. L'étude a permis de mettre en évidence deux phénomènes que sont la *nuit ionosphérique* et le *jour ionosphérique* dans la couche D. Ces deux phénomènes ont été en liés à la densité électronique due à l'ionisation d'origine solaire. Le phénomène de l'*anomalie d'hiver* n'est pas observé dans la couche D au cours du maximum de phase du cycle solaire.

Références bibliographiques

- BAUER, S. J., & JACKSON, J. E. (1962). Rocket measurements of the electron density distribution in the topside ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 67, 1675-1677.
- BAUER, S. J., BLUMBLE, L. J., DONLEY, J. L., FITZENREITER, R. J., & JACKSON, J. E. (1964). Simultaneous rocket and satellite measurements of the topside ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 69, 186-189.
- LANDMARK, B. (1973): *Cosmical Geophysics*, Chapter 5.
- NANÉMA, E., GNABAHOU, D. A., ZOUNDI, C., & OUATTARA, F. (2018a). Modeling the Ionosphere during Quiet Time Variation at Ouagadougou in West Africa. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 8, 163-170.
- NANÉMA, E., KONATE, M., GNABAHOU, A. D., & OUATTARA, F. (2018b). Effects of Height of F2-Layer on Critical Frequency by Use of Data at Ouagadougou Station. *Applied Physics Research*, 10(5), 57-60.
- NANÉMA, E., OUEDRAOGO, I., ZOUNDI, C., & OUATTARA, F. (2018c). Electron bulk Surface Density Effect on Critical Frequency in the F2-Layer. *International Journal of Geosciences*, 9, 572-578.
- NANÉMA, E., ZERBO, J.L., KONATÉ, M. and OUATTARA, F. (2018d) *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5, 62-68.
- OUATTARA, F. and NANÉMA, E. (2014) Quiet Time foF2 Variation at Ouagadougou E. Nanéma et al. DOI: [10.4236/ijg.2018.99033](https://doi.org/10.4236/ijg.2018.99033) 578 *International Journal of Geosciences Station and Comparison with TIEGCM and IRI-2012 Predictions for 1985 and 1990. Physical Science International Journal*, 4, 892-902.
- OUATTARA, F. and NANÉMA, E. (2011) 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, 55-61.