

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 ($Rz > 100$).

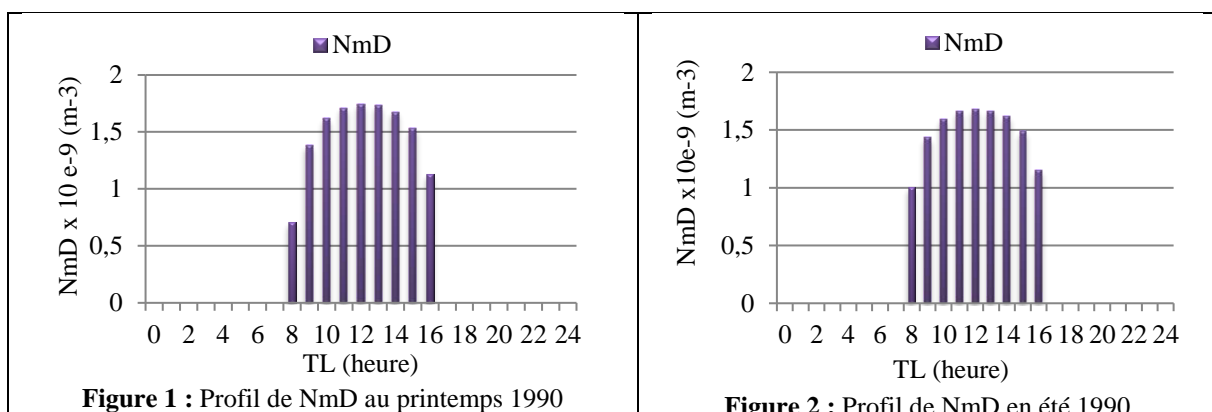
Le tableau suivant présente les cinq jours les plus calmes sélectionnés dans chaque saison sur le maximum solaire.

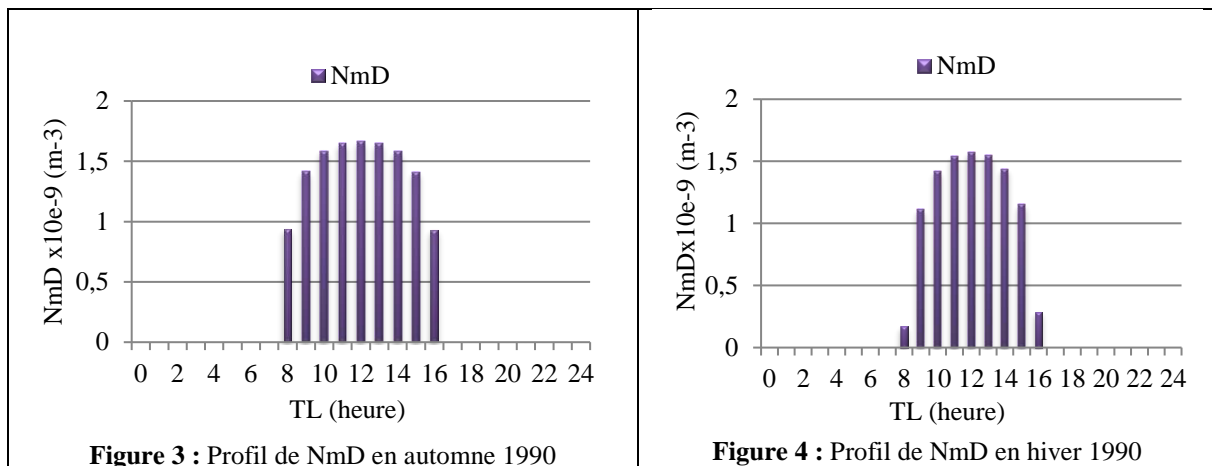
Tableau: Les cinq jours les plus calmes de l'année 1990

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 qui sont la *nuit ionosphérique* et le *jour ionosphérique* dans la couche D. Ces deux phénomènes ont été en liens 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.