

Modélisation de la densité d'électrons de la couche D (NmD) de l'ionosphère lors des activités géomagnétiques calmes à la station de Ouagadougou au minimum de phase du C21

NAKOLEMDA Roger^{1*}, SAWADOGO Gédéon¹ et NANEMA Emmanuel^{1,2}

¹Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace (LAREME) de l'Université Norbert ZONGO BP 376 Koudougou, Burkina Faso.

²Centre National de la Recherche Scientifique et Technologie (CNRST), Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT), 03 BP 7047 Ouagadougou, Burkina Faso.

*rogernakolemda.sea@gmail.com

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 17 juillet 2022

Reçu en format révisé le : 10 septembre 2023

Accepté le : 30 novembre 2023

Mots-Clés : Ionosphère, modèle IRI, densité électronique, cycle solaire, jours calmes, Zénith.

RESUME

Le présent travail porte sur la modélisation de la variabilité de la densité électronique (NmD) de l'ionosphère au cours du minimum de phase du cycle solaire 21 à la station de Ouagadougou. La méthodologie du travail adoptée pour la détermination de NmD repose sur le calcul des moyennes horaires mensuelles de ces variables obtenues à l'aide du modèle IRI au cours des mois qui caractérisent les saisons. Les résultats obtenus pour le paramètre NmD en fonction du temps au cours du minimum de phase du cycle solaire 21 ont été présentés. Les variations saisonnières, l'activité géomagnétique et le temps sont des principaux phénomènes qui sont à l'origine sur les variations du flux solaire incident dans l'atmosphère et qui modifient non seulement le taux de photo ionisation, mais aussi la répartition en altitude et en latitude des constituants atmosphériques. Le modèle IRI nous a permis de décrire l'évolution de la région D au cours du temps et des saisons. Il ressort de cette étude que le paramètre NmD dépend du temps, des saisons et de l'irradiation solaire. Des valeurs maximales de NmD sont obtenues à 12.00TL.

I. INTRODUCTION

La couche D comprise entre 50 et 100 km est la partie la plus complexe de l'ionosphère du point de vue de sa composition (pression élevée, densité de l'air, grand nombre de réactions photochimiques) (J. A. Bittencourt et al., 1994). La population de cette région est majoritairement composée de dioxygène (O₂) et de diazote (N₂) (J.A Bittencourt et al. 1994). La région inférieure de l'ionosphère (D) reste cependant inaccessible à la plupart des techniques s'appliquant à l'ionosphère supérieure (J. wisemberg et al, 1985). Le succès et la richesse de l'utilisation du modèle de l'ionosphère de référence internationale (IRI) pour l'étude de l'ionosphère supérieure conduit à envisager son utilisation pour l'étude de la région D. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir mesurer simultanément plusieurs paramètres comme la densité électronique, la température électronique, la température ionique et la composition ionique dans la plage d'altitude d'environ 50 km à environ 2000 km ; et aussi le contenu électronique (D. Bilitza et al. 1993, 1996, 2014, 2017 ; Sethi and Mahajan, 2002). Il fournit des moyennes mensuelles dans l'ionosphère pour des conditions

magnétiquement calmes et perturbées (D. Bilitza et al. 2014). Les principales sources de données sont le réseau mondial d'ionosonde. Le modèle IRI s'est progressivement amélioré grâce aux nouvelles données acquises, et aussi à l'avènement de meilleures techniques de modélisation (D. Bilitza et al, 2017). C'est un modèle empirique standard de l'ionosphère, créé en 1960 parrainé par le Comité de la Recherche Spatiale (COSPAR) et l'Union Internationale de la Radio Sciences (URSI) (Galkin et al, 2012). Il comprend un programme FORTRAN, un sous-programme (CCIR, URSI), des fichiers indices (D. Bilitza et al. 2014). Il est exécutable sur le site Virtual Ionosphere Thermosphere Mesosphere Observatory (VITMO). Ce travail porte sur la modélisation de la variabilité de la densité électronique de la couche D de l'ionosphère (NmD) en basse latitude lors des activités géomagnétiques calmes au cours du minimum de phase du cycle solaire 21 à la station d'ionosonde de Ouagadougou (Lat: 12,4°N ; Long: 358,5°E) au cours des quatre saisons. Le travail est effectué dans les conditions de jours calmes.

II. METHODOLOGIE

La station de Ouagadougou, située en Afrique de l'Ouest, présente les caractéristiques suivantes : lat = 12.4°N, long = 358.5°E. La modélisation de l'ionosphère à l'aide de l'IRI est basée sur les trois principes fondamentaux suivants (F. Ouattara et al, 2011, 2014, W. E. Sawadogo et al., 2019 ; A. Diabaté et al., 2019 ; Faynot, J.M. and Villa, 1979 ; E. Nanéma et al., 2018c, 2018b, 2018d, Zerbo et al 2012) : (i) Les mois caractéristiques du printemps, de l'été, de l'automne et de l'hiver sont respectivement mars, juin, septembre et décembre ; (ii) Les cinq jours les plus calmes de chaque mois caractéristique ($Aa \leq 20$ nT) sont considérés ; (iii) Le minimum de phase du cycle solaire 21 de l'année 1976 est caractérisé par $Rz < 20$.

Le calcul de la moyenne horaire mensuelle de la densité électronique (NmD) pendant les cinq jours les plus calmes de chaque mois caractéristique est donné par l'Equation (1) définit comme suit :

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

Tableau 1: Cinq jours les plus calmes de chaque mois du cycle solaire 21 (C21)

Phases du CS	Années	jours/Index	Mois			
			Mars	Juin	Septembre	Décembre
C21	Minimum 1976	jours	21 ;22 ;23 ;24 ;2	9 ;14 ;15 ;21 ;22	9 ;10 ;11 ;13 ;16	2 ;3 ;6 ;14 ;15
		Aa	7,6 ;10 ;4,6 ;11;6,1	6,5 ;5,8 ;6,3 ;4,7 ;5,8	11 ;11 ;10 ;11 ;11	5,5 ;6,6 ;6,2 ;4,7 ;3,5
	Maximum 1979	jours	12 ;13 ;14 ;20 ;21	1 ;3 ;5 ;12 ;28	2 ;7 ;9 ;19 ;23	7 ;13 ;21 ;23 ;25
		Aa	7,5 ;6,1 ;2,7 ;9 ;9	9,1 ;8,2 ;9,2 ;9,2 ;6,5	11 ;10 ;12 ;11 ;12	5,5 ;5,5 ;7 ;7,3 ;6,1

Pour une station caractérisée par sa longitude Long, l'heure locale TL est liée au temps universel TU par la Relation :

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

La station de Ouagadougou est caractérisée par Long = 358,5°E. Nous faisons l'approximation suivante Long = 358,5°E ~ 360° ~ 0°.

Ainsi, pour la station de Ouagadougou, nous pouvons écrire : TL ~ TU

Dans cette expression, NmD_h désigne la densité électronique moyenne de la couche D à l'heure h pour le mois caractéristique considéré, $NmD_{h,j}$ est la valeur de la densité électronique à l'heure h pour le jour j. Dans ces conditions, l'indice $h \in [0,24]$, et l'indice $j \in [1,5]$.

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 en calculant la valeur moyenne des paramètres $NmD_{h,j}$ sur les cinq jours les plus calmes pour chaque mois caractéristique.

Le **Tableau 1** présente les cinq jours les plus calmes sélectionnés de chaque mois caractéristique de chaque saison pour le cycle solaire considéré (Sandwidi et al, 2020).

Les valeurs de densité électronique obtenues à partir du fonctionnement du modèle IRI sont exportées dans un fichier Excel et traitées à partir de l'Equation (1).

III. RESULTATS

Les **Figures 1, 2, 3 et 4** ci-dessous, présentent respectivement la variabilité horaire de la densité électronique (NmD) en fonction du temps de chaque saison au minimum de phase du C21 lors des activités géomagnétiques calmes.

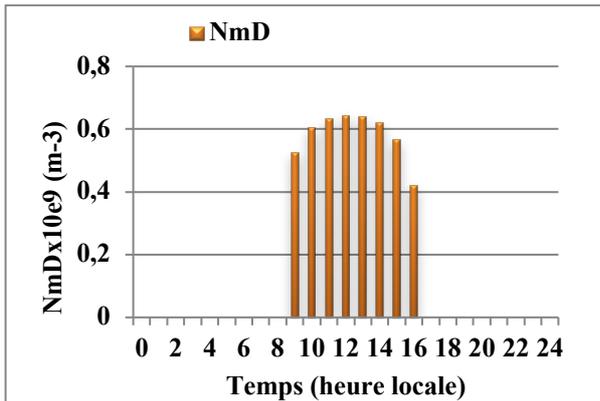


Figure 1 : Variabilité horaire de NmD au printemps

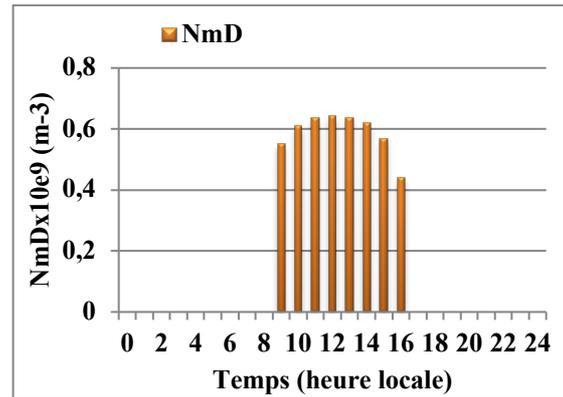


Figure 2 : Variabilité horaire de NmD en été

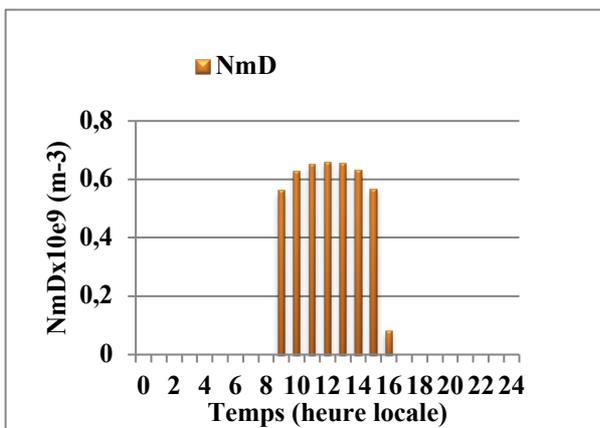


Figure 3 : Variabilité horaire de NmD en automne

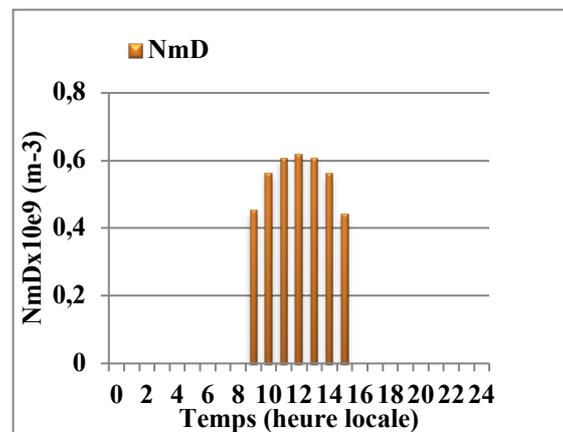


Figure 4 : Variabilité horaire de NmD en hiver

IV. ANALYSE ET DISCUSSION

Les figures 1, 2, 3 et 4 renseignent sur la variabilité temporelle et saisonnière de la densité électronique au cours du minimum du C22 dans la région D. L'analyse de la courbe montre :

Au cours du printemps (figure 1) caractérisé par un ensoleillement plus important, le profil de la densité électronique présente :

- Une zone croissante de 09.00 TL à 12.00 TL, caractérise à une irradiation solaire progressive au cours de cette période ;
- Un maximum à 12.00 TL correspondant à un pic élevé de NmD, en raison de l'intensité de la production électronique ;
- Une zone décroissante de 12.00 TL à 16.00 TL, correspondant à une chute de la densité électronique. Au cours de cette période, l'irradiation solaire est faible entraînant une baisse de production électronique.

Au cours de l'été (saison la plus chaude de l'année) (figure 2), l'étude de la densité électronique montre :

- Une zone croissante de 09.00 TL à 12.00 TL. Le pic de la densité électronique augmente au cours de cette période, en raison de l'intensification de l'irradiation solaire ;
- Un pic à 12.00 TL dû à l'intensité de la production d'électrons ;
- Une chute de la densité électronique de 12.00 TL à 16.00 TL, correspondant à une baisse de l'irradiation solaire.

L'automne (Figure 3) est un mois au cours duquel l'ensoleillement est moins important. Au cours de cette saison, l'ionisation de la région D de l'ionosphère est faible et montre :

- Une production électronique qui croît de 09.00 TL à 12.00 TL, cette zone correspond à l'augmentation progressive de l'intensité solaire ;
- Un pic à 12.00 TL, qui caractérise une production maximale de la densité d'électrons ;
- Une dernière partie de 12.00 TL à 16.00 TL. Au cours de cette période de la journée, l'intensité des radiations solaires décroît au cours du temps.

L'hiver (Figure 4) est la saison la plus froide de l'année et la moins ensoleillée. L'irradiation des rayons solaires est

moins intense. Le profil de la densité électronique au cours de cette période présente :

- Une partie croissante de 09.00 TL à 12.00 TL. Au cours de cette période, le pic de la densité électronique augmente en fonction de l'intensité du rayonnement solaire ;
- Un maximum à 12.00 TL, où nous constatons un ensoleillement intense qui correspond à une production élevée de la densité électronique ;
- Une zone décroissante de 12.00 TL à 15.00 TL correspondant à une faible intensité de l'irradiation solaire qui induit une baisse de la production de la densité d'électrons.

La couche D est ionisée sous l'effet des radiations solaires. La radiation solaire par photo ionisation détachent les électrons des ions et donnent naissance à la couche D. La genèse de cette ionisation relève de la théorie de Chapman dans laquelle la quantité de matériau ionisable (molécules ou atomes) diminue avec la pression, donc l'altitude, tandis que le flux ionisant de provenance solaire diminue avec la profondeur de pénétration dans l'atmosphère, induisant ainsi un pic d'ionisation à une altitude privilégiée (12.00 TL). Entre [00.00 TL ; 09.00 TL] U [16.00 TL ; 24.00 TL] du minimum de phase, les profils de NmD ne présentent pas de valeurs. Pendant ces périodes, la couche D n'existe pas à cause de la disparition des électrons qui a lieu par attachement sur des particules neutres avec formation d'ions négatifs dont la densité est supérieure à celle des électrons. Ce processus est prédominant à cause de la forte densité des particules neutres dans cette couche de l'ionosphère. Cette disparition des électrons est liée également à la vitesse de recombinaison due à la forte densité des molécules présentes dans cette région et l'absence des rayons solaires. La densité électronique (NmD) dépend de la saison, du temps et également de l'irradiation solaire.

V. CONCLUSION

Ce travail reflète une volonté, d'étudier le paramètre NmD en fonction du temps afin de comprendre l'évolution de la production électronique de la région D. Cette étude est menée dans les conditions de jours calmes au cours du minimum de phase de C21. Il ressort dans ce travail que le paramètre ionosphérique dépend du temps, de la saison et de l'irradiation solaire. La concentration électronique dans la couche D est liée à l'intensité du rayonnement solaire qui est elle-même dépendant des saisons. Un pic de NmD a été observé à 12.00TL. Nous pensons comprendre la variabilité de la densité d'électrons dans la couche D au minimum du C21

Remerciements

Les auteurs expriment leur profonde gratitude au Programme scientifique international (ISP) pour son soutien financier.

REFERENCES

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

J. Wisember, *aeronomica acta*, 1985. *Influence des ions négatifs sur la diffusion incohérente d'une onde électromagnétique dans la région D de l'ionosphère terrestre*, INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE Belgique, N° 3 0 2

Bilitza D., Rawer K., Bossy L. and Gulyaeva T., 1993 "International Reference Ionosphere – Past, Present, Future II. Plasma Temperatures, Ion Composition, and Ion Drift", Adv. Space Res. Vol. 13, n°3, pp. 15-23.

Bilitza D. and Rawer K.,1996 "International Reference Ionosphere, , in: *The Upper Atmosphere – Data Analysis and Interpretation*", W. Dieminger, G. Hartmann and R. Leitinger (eds.), *springer-Verlag. Berlin Heidelb*, pp. 735-772.

Bilitza D, Altadill D, Zhang Y, Mertens C, Truhlik V, Richards P, McKinnell LA, Reinisch B, 2014. *The International Reference Ionosphere 2012—a model of international collaboration*. Journal of Space Weather and Space Climate vol. 4, pp. 1-12.,

Faynot, J.M. and Villa, P. (1979) F Region at the Magnetic Equator. *Annales Geophysicae*, 35, 1-9.

J.-L. Zerbo, C. Amory Mazaudier, F. Ouattara, and J. D. Richardson, "Solar wind and geomagnetism: toward a standard classification of geomagnetic activity from 1868 to 2009," *Annals of Geophysics*, vol. 30, no. 2, pp. 421-426, 2012

Sethi NK, Mahajan KK ,2002. *The bottomside parameters B0, B1 obtained from incoherent scatter measurements during a solar maximum and their comparisons with the IRI-2001 model*. pp. 817- 822.

D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch et X. Huang, 2017 *International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions*, *Space Weather*, vol. 15, pp. 418 -429, [doi: 10.1002 / 2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593),

Galkin, I.A., B.W. Reinisch, X. Huang, and D. Bilitza 2012, *Assimilation of GIRO Data into a Real-Time IRI*, *Radio Science*, vol. 47, RS0L07 [Doi:10.1029/2011RS004952](https://doi.org/10.1029/2011RS004952).

Ouattara, F. and Nanéma, E, 2014. *Quiet Time foF2 Variation at Ouagadougou E. Nanéma et al. International Journal of Geosciences Station and Comparison with*

TIEGCM and IRI-2012 Predictions for 1985 and 1990. Physical Science International Journal, vol. 4, pp. 892-902. DOI: [10.4236/ijg.2018.99033](https://doi.org/10.4236/ijg.2018.99033) 578

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, vol. 5, pp. 55-61.

Nanéma, E., Gnabahou, D. A., Zoundi, C., & Ouattara, F., 2018. *Modeling the Ionosphere during Quiet Time Variation at Ouagadougou in West Africa.* International Journal of Astronomy and Astrophysics, vol. 8, pp. 163-170.

Nanéma, E., Konaté, M., Gnabahou, A. D., & Ouattara, F., 2018. *Effects of Height of F2-Layer on Critical Frequency by Use of Data at Ouagadougou Station.* Applied Physics Research, vol. 10, n°5, pp. 57-60.

Nanéma, E., Ouédraogo, I., Zoundi, C., & Ouattara, F., 2018. *Electron bulk Surface Density Effect on Critical*

Frequency in the F2-Layer. International Journal of Geosciences, vol. 9, pp. 572-578.

Sawadogo, W.E., Zerbo, J.-L. and Ouattara, F., 2019. *Diurnal Variation of F2-Layer Critical Frequency under Solar Activity Recurrent Conditions during Solar Cycles 21 and 22 at Ouagadougou Station: Prediction with IRI-2012.* Scientific Research and Essays, vol. 14, pp. 111-118.

Diabaté, A., Zerbo, J.-L. and Ouattara, F., 2019. *Variation of the foF2 Parameter during Fluctuating Activity: Prediction with IRI-2012 Compared to Measured Data from Ouagadougou Ionosonde Station during Solar Cycles 21 and 22.* Vietnam Journal of Earth Sciences, vol. 41, pp. 69-78.

<https://doi.org/10.15625/0866-7187/41/1/13549>

SIBRI A. S, D. A Gnabahou* & Ouattara, F., 2020. *Fof2 prediction with IRI-2016 at Dakar Station during quiet activity over solar cycles 21 and 22.* DOI: 10.5897/IJPS2020.4906,