

Modélisation de la fréquence critique de la sous couche F2 de l'ionosphère à l'aide de IRI-2016

Raoul ILBOUDO¹, Emmanuel NANEMA^{1,2*} et Frédéric OUATTARA¹

¹ *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*

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

(Reçu le 15 Mars 2021 ; Accepté le 22 Juillet 2021)

* Correspondance, courriel : nanema_emmanuel@yahoo.fr

Résumé

Le pouvoir réfléchissant de l'ionosphère est utilisé dans les télécommunications pour la transmission des ondes radioélectriques. L'ionosphère se comporte comme un obstacle au passage des ondes. Ainsi les signaux de courtes longueurs d'onde sont réfléchis par la couche F ou encore, la partie supérieure de la couche E tandis que la couche D sera le siège de réflexion des ondes de basse fréquence. La présente étude porte sur la modélisation de la fréquence critique de la sous couche F2 de l'ionosphère à l'aide du modèle International Reference Ionosphere (IRI) sous sa version 2016. Le travail, effectué à la station de Ouagadougou située en Afrique occidentale, consiste en une étude de la variabilité temporelle de la fréquence critique de la sous couche F2 dans les conditions de jours calmes au cours des quatre saisons de l'année du minimum et du maximum de phase du cycle solaire 22. Le modèle IRI 2016 a permis de capturer les données de la fréquence critique des cinq jours les plus calmes des quatre saisons caractéristiques de l'année à savoir le printemps, l'été, l'automne et l'hiver. Le traitement des données à l'aide du logiciel Excel nous a permis d'établir les variabilités saisonnières de foF2 pour les mois caractéristiques de chaque saison. Il ressort de cette étude de la modélisation de foF2 du modèle IRI que le profil de la fréquence critique dépend de la saison, du moment de la journée et de l'activité solaire. Elle prouve que l'irradiation solaire, principale source d'ionisation des particules ionosphériques n'est pas la seule source. En effet les collisions entre les particules dans le cadre du mouvement du plasma ionosphérique pourraient contribuer également à une ionisation partielle de l'ionosphère. L'étude propose également une technique de calibrage des stations d'émission d'ondes radioélectriques en utilisant le profil temporel de la fréquence critique de la sous couche F2. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par la version 2012 de IRI. Elle met également en évidence le phénomène de l'anomalie d'hiver.

Mots-clés : *Ionosphère, sous couche F2, fréquence critique, cycle solaire, jours calmes, modèle IRI.*

Abstract**Modeling critical frequency of ionosphere F2-layer by use of IRI-2016**

The reflective power of the ionosphere is used in telecommunications for the transmission of radio waves. The ionosphere acts as a barrier to waves' propagation. Thus, short wavelength signals are reflected by the F-layer or the upper part of the E-layer, while the D-layer will reflect low frequency waves. The present study focuses on the modeling of the critical frequency of the F2 sublayer of the ionosphere using the International Reference Ionosphere (IRI) model under its 2016 version. The work, carried out at Ouagadougou station located in West Africa, consists in a study of temporal variability of the F2 sub-layer critical frequency under quiet days conditions during the four seasons of the minimum and maximum year of solar cycle 22. The IRI-2016 model calculates the critical frequency values for the five quietest days during the four characteristic seasons of the year that are spring, summer, autumn and winter. Using an Excel spreadsheet, the seasonal variabilities of foF2 for the characteristic months of each season are determined. This study shows that the critical frequency profile is dependent of the season, the time and the solar activity. It proves that solar radiations, the main source of ionization of ionospheric particles, is not the only source. Indeed, collisions between particles in the context of the movement of ionospheric plasma also contribute to a partial ionization of the ionosphere layer. The study also proposes a technique for calibrating radio electric waves transmitting stations using the time profile of the critical frequency of the F2 sublayer. These results are in good agreement with those obtained by the 2012 version. It also highlights the winter anomaly phenomenon.

Keywords : *Ionosphere, F2-layer, critical frequency, solar cycle, quiet days, IRI model.*

1. Introduction

L'ionosphère est la partie de l'atmosphère qui s'étend entre 50 km et 2000 km [1]. Dans l'ionosphère, les rayonnements solaires dans les gammes EUV, UV et X provoquent une ionisation des atomes et molécules présents [2]. La couche ionosphérique reste électriquement neutre et se comporte comme un plasma en mouvement. Les ions ainsi créés suite à ce phénomène d'ionisation sont susceptibles d'interagir avec une onde électromagnétique incidente et d'influer sur sa propagation [3]. Cependant les stations d'émission d'onde radioélectrique ont des difficultés pour calibrer le signal émis. Il se trouve que pour une liaison donnée, le choix de la fréquence de travail s'avère très compliqué: trop élevée, l'onde ne sera pas réfléchié par l'ionosphère mais la traversera et sera perdu dans l'espace ; trop faible, l'absorption dans les basses couches (région D) devient exorbitante pour le bilan de liaison. D'où la nécessité de choisir aux mieux la fréquence de la liaison et surtout de la modifier en fonction de l'état de l'ionosphère [4, 5]. De nombreux modèles ont été développés pour étudier la couche ionosphérique [6, 9]. 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 [10]. En effet la structure et la composition du plasma ionosphérique sont mises en évidence par des différentes techniques d'investigation, qui sont des méthodes de sondages. Les instruments de sondage les plus connus utilisent les phénomènes de réflexion, absorption, diffusion et polarisation pour la détermination de la couche ionosphérique. Des articles ont été réalisés sur la morphologie et le comportement de l'ionosphère à travers l'étude des profils temporels de la fréquence critique de la sous couche F2. C'est le cas de l'ionosphère équatoriale, en particulier celle des stations africaines, qui a fait l'objet de recherches approfondies au cours des dernières années [11 - 22]. Ce document traite de la modélisation de la fréquence critique de la sous couche F2 de l'ionosphère sous la version 2016 du modèle International

Référence Ionosphère 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. Cet article a pour objectif dans un premier temps de mettre en évidence la réponse de la version 2016 du modèle IRI sur la modélisation de la fréquence critique de la sous couche F2 et dans un second temps de proposer une méthode de calibrage des stations d'émission d'ondes radioélectriques.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

L'International Reference Ionosphere (IRI) est le modèle utilisé pour la détermination du paramètre ionosphérique foF2. IRI est un modèle semi-empirique, développé et régulièrement mis à jour (tous les quatre ans en moyenne) 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

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 $Rz \geq 100$; (iii) les valeurs moyennes horaires des fréquences critiques 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. La version 2016 du modèle IRI est retenu pour l'étude. Les conditions d'exécution du modèle appliquées dans ce travail sont : Height = 350 km, Step = 1. Les données acquises sont traités avec le Logiciel Excel pour obtenir d'abord les moyennes horaires mensuelles et ensuite les différents profils d'évolution horaires.

3. Résultats

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'Equation (1)*** comme suit :

$$foF2_h = \frac{\sum_{j=1}^5 foF2_{h,j}}{5} \tag{1}$$

Dans cette expression, foF2_h désigne la fréquence critique moyenne de la sous couche F2 à l'heure h pour le mois caractéristique considéré, foF2_{h,j} est la valeur de la fréquence critique à l'heure h pour le jour j. Dans ces conditions, l'indice h ∈ [0,24], et l'indice j ∈ [1,5].

Le ***Tableau 1*** présente les cinq jours les plus calmes de chaque mois caractéristique de chaque saison pour le cycle solaire considéré.

Tableau 1 : Cinq jours les plus calmes de chaque mois

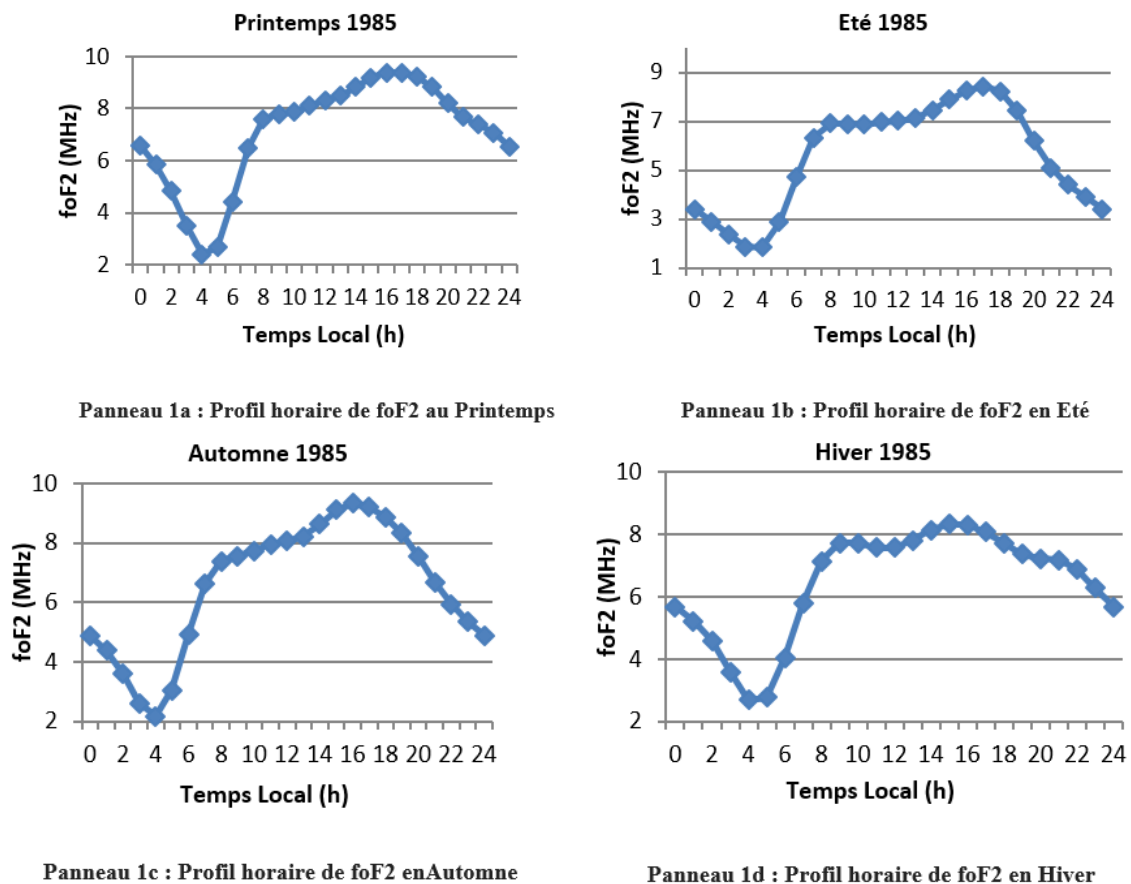
Cycle solaire	Phase	Année	Jours	Mois			
				Mars	Juin	Septembre	Décembre
C22	Minimum	1985	Jours	9,13,21,22,25	3,14,16,18,19	2,3,4,5,29	8,9,21,23,29
	Maximum	1990	Jours	4,10,16,17,31	16,17,20,21,30	2,3,27,29,30	10,11,19,21,29

L'exécution de la version 2016 du modèle IRI permet de générer les valeurs $foF2_{h,i}$ pour une station donnée. L'heure ou le temps 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 de la fréquence critique $foF2$ pendant le minimum et le maximum de phase du cycle solaire 22. Les panneaux 1a, 1b, 1c, 1d sont respectivement les profils horaires de $foF2$ 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 de $foF2$ au printemps, en été, en automne et en hiver au cours du maximum.

**Figure 1 : Variabilité horaire de la fréquence critique $foF2$ au minimum 1985**

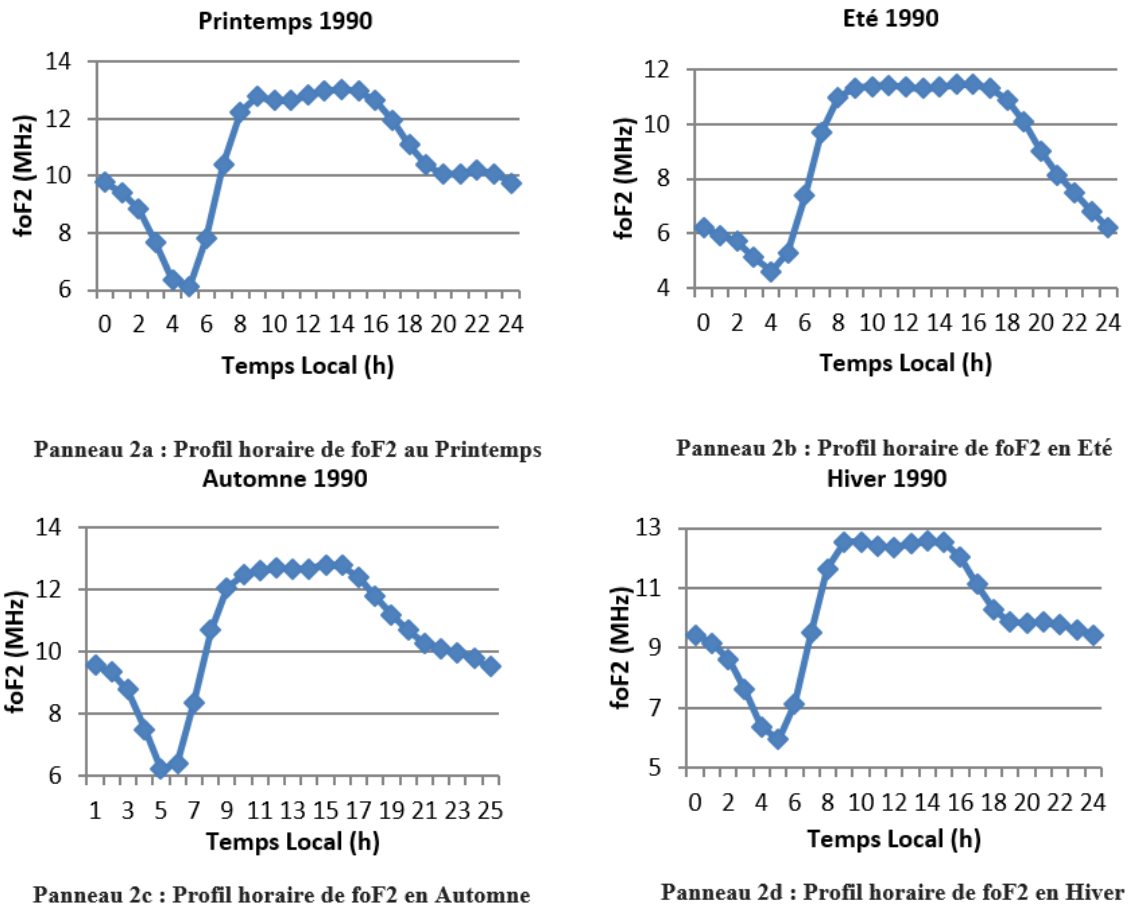


Figure 2 : Variabilité horaire de la fréquence critique foF2 au maximum 1990

4. Discussion

Sur les **Figures 1 et 2**, la fréquence critique de la sous couche F2 est représentée sur l'axe vertical et sur l'axe horizontal est défini le temps local TL pour le graphe de chaque panneau. Pour la station de Ouagadougou, TL = TU. Sur chaque panneau le profil horaire de la fréquence critique de la sous couche F2 comporte trois parties essentielles :

- Une zone décroissante de 00h à 05h et 18h à 24h ;
- Une zone croissante entre 05h et 09h ;
- Une zone croissante marquée par la présence d'une inflexion (autour de 12h) entre 09h et 18h

Les profils horaires de la fréquence critique 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 de la fréquence critique au printemps, en été, en automne et en hiver sont tous de type « Plateau » indiquant la présence d'un faible électrojet au cours de 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 de la sous couche F2 (NmF2) 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^{-3} .

Pendant le minimum de phase, le profil de la fréquence critique décroît entre 00.00 TL et 05.00 TL, augmente au cours de la journée entre 05.00 TL et 18.00 TL et décroît de 18.00 TL à 24.00 TL. Au cours de la journée on assiste à une augmentation de l'irradiation solaire qui entraîne une ionisation des particules présentes dans l'ionosphère et par conséquent une augmentation de la densité électronique. En hiver on remarque un nouveau pic de nuit aux environs de 22.00 TL qui ne saurait être expliqué par l'ionisation des particules car les rayons solaires sont plus faibles en toutes saisons qu'à 12.00 TL en basses latitudes. 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, les fréquences oscillent entre 2,4098 MHz et 9,3772 MHz au printemps, 1,8334 MHz et 8,4246 MHz en été, 2,1724 MHz et 9,3214 MHz en automne et enfin 2,6934 MHz et 8,3224 MHz en hiver. Au cours du maximum de phase du cycle solaire, le profil de la fréquence critique décroît entre 00.00 TL et 05.00 TL, augmente entre 05.00 TL jusqu'aux environs de 10.00 TL, et décroît entre 16.00 TL et 24.00 TL. Entre 10.00 TL et 16.00 TL la variation de la fréquence critique est faible mais reste élevée. La fréquence critique dépend du temps. Elle varie avec l'intensité des rayons solaires. Les valeurs des fréquences oscillent entre 6,1424 MHz et 13,034 MHz au printemps, 4,6216 MHz et 11,461 MHz en été, 6,22 MHz et 12,7986 MHz en automne et 5,957 MHz et 12,5702 MHz en hiver. L'ensoleillement qui provoque l'ionisation des particules ionosphériques est plus important en été qu'en hiver par contre on remarque que le paramètre foF2 présente des valeurs supérieures en hiver qu'en été.

Cela met en évidence le phénomène de *l'anomalie d'hiver* qui a été précédemment observé par d'autres auteurs [23 - 27]. 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 particulières. Toutefois, l'ionosphère conserve sa neutralité électrique. Les **Figures 1 et 2** montrent également que la fréquence critique 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. Entre 00.00 TL et 24.00 TL pour un jour calme donné, une onde émise de fréquence inférieure à la valeur minimale de foF2 sera réfléchiée ou réfractée sur la sous couche F2 tandis qu'une onde émise de fréquence supérieure à la valeur maximale de foF2 traversera la couche F2. Pour toute saison, le profil de la fréquence critique en fonction du temps montre qu'une onde de fréquence comprise entre la valeur minimale de fréquence foF2 (pour la réfraction ou la réflexion) et la valeur maximale de fréquence foF2 (au-delà de laquelle il y'aura une transmission) déterminera la fréquence critique foF2 pour le temps TL correspondant. Ainsi, il devient possible, pour un temps TL donné, de déterminer la fréquence à laquelle une onde émise sera réfléchiée ou réfractée par projection orthogonale sur l'axe vertical. Une station radioélectrique pourra donc être calibrée à partir du graphe de foF2 qui est obtenu avec la version 2016 du modèle IRI.

5. Conclusion

L'étude de la modélisation de la fréquence critique 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 temps, de la saison et de la phase du cycle solaire. Cette étude avait pour objectifs la mise en évidence de la réponse de IRI 2016 à la modélisation de la fréquence critique de la sous couche F2 et de proposer une méthode de calibrage d'une station d'émission d'onde radioélectriques. 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 « Plateau » pour toutes les saisons. Elle met aussi 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. Le phénomène de l'anomalie d'hiver a été mis en évidence dans cette étude. La version 2016 du modèle IRI est également utilisable pour le calibrage des stations d'émission des ondes radioélectriques par projection orthogonale à partir du tracé des profils horaires de la fréquence critique de la sous couche F2.

Références

- [1] - S. BOUTIOUTA, A. H. BELBACHIR and H. DEKKICHE, *Contemporary publishing international*, Ed. Télédétection, 5 (4) (2006) 325 - 338
- [2] - F. OUATTARA and F. ROLLAND, *Scientific Research and Essays*, 6 (2011) 3609 - 3622. <https://doi.org/10.5897/SRE10.1050>
- [3] - E. NANEMA, I. OUEDRAOGO, C. ZOUNDI and F. OUATTARA, *International Journal of Geosciences*, 9 (2018) 572 - 578. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.99033>
- [4] - F. OUATTARA and E. NANEMA, *Archives of Applied Science Research*, 5 (2011) 55 - 61
- [5] - F. OUATTARA and C. AMORY-MAZAUDIER, *J. Space Weather Space Clim*, 2 (2012) A19 DOI: 10.1051/swsc/2012019
- [6] - D. A. GNABAHOU and F. OUATTARA, *Eur. J.Sci. Res*, 73 (2012) 382 - 390
- [7] - W. WANG, M. WILTBERGER, A. G. BURNS, S. C. SOLOMON, T. L. KILLEEN, N. MARUYAMA and J. G. LYON, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66 (1516) (2004) 1425, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.04.008>
- [8] - D. A. GNABAHOU, F. OUATTARA, E. NANEMA and F. ZOUGMORE, *International Journal of Geosciences*, 4 (2013) 1145
- [9] - A. D. RICHMOND, E. C. RIDLEY and R. G. ROBLE, *Geophysics Research Letter*, 19 (1992) 60. <https://doi.org/10.1029/92GL00401>
- [10] - E. NANEMA, D. A. GNABAHOU, C. ZOUNDI and F. OUATTARA, *Int. J. Astron. Astrophys*, 8 (2018) 163
- [11] - E. NANEMA and F. OUATTARA, *Arch. Appl. Sci. Res*, 5 (2013) 55 - 61
- [12] - E. NANEMA, M. KONATE and F. OUATTARA, *J. Mod. Phys*, 10 (2019) 302 - 309
- [13] - F. OUATTARA, *Ann. Geophys*, 52 (2009) 107 - 116
- [14] - F. OUATTARA, *Arch. Phys. Res*, 4 (2013) 12 - 18
- [15] - F. OUATTARA and C. AMORY-MAZAUDIER, *J. Atmospheric Sol.-Terr. Phys*, 71 (2009) 1736 - 1748
- [16] - F. OUATTARA and E. NANEMA, *Physical Science International Journal*, 4 (6) (2014) 892 - 902
- [17] - F. OUATTARA and J.-L. ZERBO, *Int. J. Phys. Sci*, 6 (2011) 4854 - 4860
- [18] - F. OUATTARA, C. AMORY-MAZAUDIER, M. MENVIELLE, P. SIMON and J.-P. LEGRAND, *Ann. Geophys*, 27 (2009) 2045 - 2051

- [19] - F. OUATTARA, S. KABORE, A. M. F. GYEBRE and J.-L. ZERB, *European Journal of Scientific Research*, 130 (2015) 153 - 159
- [20] - F. OUATTARA, J.-L. ZERBO, M. KABORE and R. FLEURY, *Int. J. Phys. Sci*, 12 (2017) 308 - 321
- [21] - N. THIAM, F. OUATTARA, A. D. GNABAHOU, C. AMORY-MAZAUDIER, R. FLEURY and P. L. DUCHESNE, *J. Sci*, 11 (2012) 16 - 20
- [22] - L. QIAN, A. G. BURNS, P. C. CHAMBERLIN and S. C. SOLOMON, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) A09311, doi: 10.1029/2009JA015225
- [23] - H. RISHBETH, I. C. F. MULLER-WODARG, L. ZOU, T. J. FULLER-ROWELL, G. H. MILLWARD, R. J. MOFFETT, D. W. IDENDEN and A. D. AYLWARD, *Annales Geophysical*, 18 (8) (2000) 945 - 956
- [24] - H. RISHBETH and I. C. F. MULLER-WODARG, *Annales Geophysical*, 24 (2006) 3293 - 3311
- [25] - H. RISHBETH and O. K. GARIOTT, *International Geophysics Series*, (1969) 160 - 189
- [26] - T. YONEZAWA and Y. ARIMA, *Journal of Radio Research Laboratories*, 6 (1959) 293 - 309
- [27] - A. H. SHAPLEY and W. J. G. BEYNON, *Nature*, 206 (1965) 1242 - 1243