

UNIVERSITE OUAGA I
Pr Joseph KI-ZERBO

École Doctorale
Sciences et Technologies

Laboratoire de Matériaux et Environnement
(L.A.M.E)



N° d'ordre 428

THÈSE Présentée

Par **Ali Mahamat Nour**

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO

Option : Physique Appliquée

Spécialité : Géophysique externe/Héliophysique

Etude statistique de la fréquence critique de la couche F2 dans les stations de Dakar et de Ouagadougou. Comparaison des données statistiques pour les cycles 21-22.

Soutenue le 21 Mai 2016 devant le Jury composé de :

Président : KOALAGA Zacharie, Professeur Titulaire, Université de Ouaga I Pr Joseph KI-ZRBO

Membres :

ZOUGMORE François, Professeur Titulaire, Université de Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO (Burkina Faso): Directeur de thèse

OUATTARA Frédéric, Professeur Titulaire, Université de Koudougou (Burkina Faso) : Co-directeur de thèse

MADOUGOU Saïdou, Maître de Conférences, Université Abdou Moumouni (Niger): Rapporteur

KIENO P. Florent, Maître de Conférences, Université de Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO (Burkina Faso): Rapporteur

ADOHI Jean-Pierre, Maître de Conférences, Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire): Rapporteur

NAON Bétaboalé, Maître de Conférences, Université Polytechnique de Bobo Dioulasso (Burkina Faso) : Rapporteur

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier toutes les personnes qui de façon très soutenue ou plus ponctuelle ont apporté leur contribution à mes études pendant ces trois dernières années.

J'exprime en premier lieu ma gratitude au Professeur François ZOUGMORE, Professeur Titulaire de physique (Mesures et instrumentations) à l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, Directeur du Laboratoire de Matériaux et Environnement (LAME), Directeur de l'école doctorale Sciences et Technologies, directeur de cette thèse, pour avoir accepté ma candidature et m'a accueilli au sein de son laboratoire. Cette thèse a vu le jour surtout grâce à sa présence, sa grande humanité et ses nombreux conseils. Je lui exprime toute ma reconnaissance et lui dis merci.

Je voudrais également exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur Frédéric OUATTARA, Professeur Titulaire en Héliophysique (physique des relations Terre-Soleil), Vice-président de l'Université de Koudougou, Directeur du Laboratoire de Recherche en Météorologie de l'Espace (LAREME), Co-directeur de thèse qui, tout au long de cette période, m'a guidé et soutenu, faisant preuve d'une grande disponibilité. Ses connaissances dans ce domaine et ses qualités d'encadrement m'ont largement aidé à la réalisation de ce travail. Je vous témoigne également ma profonde gratitude pour votre aide et votre contribution active à l'écriture des articles. Merci Professeur d'avoir accepté de diriger cette thèse.

Je tiens à remercier très chaleureusement le Professeur KOALAGA Zacharie, Professeur Titulaire de l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO pour avoir accepté de présider le Jury de cette thèse. J'exprime ici toute ma gratitude.

Je dis merci au Docteur Saïdou MADOUGOU, Maître de Conférences à l'Université Abdou Moumouni pour avoir accepté d'être Rapporteur de ma thèse. Merci pour l'intérêt porté au travail de recherche.

Je voudrais remercier Docteur Florent P. KIENO, Maître de Conférences de l'Université de Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO et Docteur ADOHI Jean-Pierre, Maître de Conférences de l'Université de Félix Houphouët Boigny pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être rapporteurs.

Que le Maître de Conférences NAON Bétaboalé de l'Université Polytechnique de Bobo Dioulasso soit remercié pour avoir accepté de faire parti du jury de cette thèse mais aussi d'avoir accepté d'être rapporteur de la présente thèse.

Mes remerciements vont aux Docteurs Jean Louis Zerbo, François Ouédraogo, Kebré Marcel, Christian Zoundi, Doua Allain Gnabahou, Emmanuel Nanema et Jean Roger Kouka pour leurs conseils et encouragements.

J'exprime mes remerciements aux Doctorants ci-après : M. Yaya Moussa qui a eu la gentillesse de déposer mon dossier d'inscription; Messieurs Abdallah Hissein et Adoum M'Bodou pour leur aide multiforme ; Messieurs Gyebéré Aristide Marie Frédéric, Salfo Kaboré et Wambi Emmanuel Sawadogo pour leur collaboration. J'exprime mes vifs remerciements à tous mes collègues enseignants de la Faculté de Sciences Exactes et Appliquées de l'Université de N'Djamena.

Mes remerciements vont également à Messieurs Abba Adjil Alifa, Baba Mallaye, Mahamat Izedine Adoum, Mamouth Youssouf pour leur conseil et appui durant mes études supérieures.

Au cours de mes séjours au LAME, j'ai bénéficié d'une atmosphère chaleureuse, merci à tous les collègues du laboratoire sans distinction pour votre amical soutien pendant tout ce temps passé parmi vous.

Le soutien familial a été également un point important sans lequel je n'aurais certainement pas pu réaliser ce travail. Mes pensées et mes profonds remerciements vont alors à mes parents, mes frères, mon épouse et mes fils qui ont toujours su me soutenir et m'encourager tout au long de mes études.

Enfin, je tiens à remercier le Seigneur qui m'a permis de vivre cette expérience.

Table des matières

RESUME.....	8
LISTE DES FIGURES.....	10
LISTE DES TABLEAUX.....	13
LISTE DE QUELQUES SYMBOLES ET ACRONYMES	14
INTRODUCTION GENERALE.....	17
CHAPITRE 1. : IONOSPHERE ET IONOSPHERE EQUATORIALE	20
1.1. Introduction	20
1.2. Formation de l'ionosphère.....	21
1.2.1. Processus chimique dans l'ionosphère	21
1.2.1.1. Mécanismes d'ionisation	21
1.2.1.2. Mécanismes de recombinaison.....	22
1.2.2. Différentes couches ou régions ionosphériques	24
1.2.2.1. Région D.....	25
1.2.2.2. Région E	25
1.2.2.3. Région F	26
1.3. Régions géographiques majeures de l'ionosphère.....	27
1.3.1. Régions de basse latitude	28
1.3.2. Régions de moyenne latitude.....	28
1.3.3. Régions de haute latitude	28
1.4. Perturbations de l'ionosphère	28
1.4.1. Scintillations ionosphériques.....	29
1.4.2. Orages ionosphériques.....	30

1.5. Dynamo ionosphérique.....	31
1.6. Ionosphère équatoriale.....	34
1.6.1. Fontaine équatoriale	34
1.6.1.1. Principe.....	34
1.6.1.2. Rappels des résultats basiques	35
1.6.2. Electrojet équatorial	38
1.7. Conclusion.....	41
CHAPITRE 2. : METHODES ET DONNEES UTILISEES	42
2.1. Introduction	42
2.2. Indices solaires et géomagnétiques.....	42
2.2.1. Indices d'activité solaire.....	43
2.2.1.1. Indice solaire R_z	43
2.2.1.2. Indice de flux radio solaire $F_{10.7}$	44
2.2.2. Indices d'activité géomagnétique	45
2.2.2.1. Indices planétaires	45
2.3. Diagrammes pixel.....	52
2.4. Paramètres ionosphériques et différents types de sondage ionosphérique	54
2.4.1. Fréquence critique d'une couche.....	54
2.4.2. Hauteur virtuelle h'	55
2.4.3. Différents types de sondage.....	56
2.4.3.1. Sondages zénithaux	57
2.4.3.2. Sondage bi statique	58
2.4.3.3. Sondage par rétro diffusion.....	58
2.4.4. Ionogramme.....	59

2.5. Données utilisées	62
2.6. Méthodologie.....	65
2.6.1. Détermination des jours des classes d'activité géomagnétique	66
2.6.1.1. <i>Jours calmes</i>	66
2.6.1.2. <i>Jours récurrents</i>	66
2.6.1.3. <i>Jours de chocs</i>	67
2.6.1.4. <i>Jours fluctuants</i>	67
2.6.2. Détermination des phases du cycle.....	67
2.6.3. Détermination des saisons	68
2.6.4. Evaluation des valeurs de foF2 pour la période d'étude	69
2.6.5. Estimation de l'effet des perturbations.....	70
2.7. Conclusion.....	70
CHAPITRE 3. : ETUDE STATISTIQUE DE LA VARIATION DIURNE DE LA FREQUENCE CRITIQUE foF2 A LA STATION DE DAKAR DE 1971-1996.....	72
3.1. Introduction	72
3.2. Etude saisonnière de la variabilité de foF2.....	73
3.2.1. Profils de variabilité journalière de foF2.....	73
3.2.2. Présentation et analyse des résultats.....	74
3.2.2.1. <i>Variabilité en phase minimum</i>	74
3.2.2.2 <i>Variabilité en phase ascendante</i>	78
3.2.2.3. <i>Variabilité en phase maximum</i>	81
3.2.2.4. <i>Variabilité en phase décroissante</i>	84
3.2.3. Synthèse.....	87
3.3. Impact de l'activité géomagnétique sur la variabilité de foF2	89

3.3.1. Variabilité en phase minimum.....	89
3.3.2. Variabilité en phase ascendante.....	92
3.3.3. Variabilité en phase maximum.....	94
3.3.4. Variabilité en phase décroissante	96
3.3.5. Synthèse.....	98
3.4. Conclusion.....	99
CHAPITRE 4. : ETUDE STATISTIQUE COMPARATIVE DE LA VARIATION DIURNE DE foF2 A LA STATION DE DAKAR ET OUAGADOUGOU	109
4.1. Introduction	109
4.2. Rappel sur l'étude statistique de la variation diurne de foF2 à la station de Ouagadougou pendant les trois cycles solaires (20, 21, 22).....	109
4.2.1. Variabilité de foF2 au minimum solaire.....	110
4.2.2. Variabilité de foF2 au maximum solaire.....	112
4.2.3. Synthèse.....	115
4.3. Etude statistique comparative de la variation diurne de foF2 entre la station de Dakar et celle de Ouagadougou durant les cycles solaires 21 et 22.....	116
4.3.1. Variabilité de foF2 en fonction des phases du cycle solaire.....	117
4.3.1.1. <i>Variabilité en phase minimum</i>	117
4.3.1.2. <i>Variabilité en phase ascendante</i>	121
4.3.1.3. <i>Variabilité en phase maximum</i>	125
4.3.1.4. <i>Variabilité en phase descendante</i>	130
4.3.2. Synthèse.....	134
4.4. Conclusion.....	135
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	147
BIBLIOGRAPHIE	149

RESUME

Ce travail de thèse est consacré à l'étude statistique de la variation diurne du paramètre ionosphérique foF2 issu des données des stations de mesures d'ionosonde de Dakar et de Ouagadougou à travers les activités géomagnétiques lors de différentes saisons durant les phases du cycle solaire. L'étude statistique de foF2 à la station de Dakar de 1971-1996 a montré la variabilité saisonnière et selon les phases du cycle solaire de la fréquence critique de la couche F2. Ainsi, le profil de type pic de matin tendant vers celui de type plateau est généralement observé en hiver ; les graphes d'automne présentent le noon bite out ; le profil de type inverse est globalement observé en été et au printemps à l'exception du maximum solaire où les graphes d'été montrent clairement le profil dôme et ceux du printemps le profil plateau. L'impact de l'activité géomagnétique perturbée sur la variabilité de foF2 fait apparaître des orages positif et négatif. L'étude statistique de ce même paramètre pendant les trois cycles solaires (20, 21, 22) à la station de Ouagadougou montre globalement le profil noon bite out caractérisant l'existence d'un fort électrojet. Durant les phases du cycle solaire et les différentes activités géomagnétiques, les données de foF2 issues de ces deux stations montrent l'asymétrie équinoxiale. L'étude statistique comparative de la variation diurne de foF2 au cours des cycles solaires 21-22 dans les stations de Dakar et de Ouagadougou a révélé une différence significative en terme de profil horaire. Toutefois, les graphes d'automne présentent une similitude de profil à savoir le noon bite out. Par ailleurs, on note un gap important entre les valeurs de foF2 de deux stations entre 10h00-19h00.

Mots clés :

Ionosphère équatoriale, Phases du cycle solaire, Classes d'activité géomagnétique, Variabilité saisonnière, Moyennes statistiques, Orage géomagnétique.

Abstract

This thesis work is devoted to statistical study of the diurnal variation of ionospheric parameter foF2 designed from station data of ionosonde measurement of Dakar and Ouagadougou through geomagnetic activities during the different seasons in the solar cycle phases. The statistical study of foF2 at Dakar station of 1971-1996 showed the seasonal variability and according to solar cycle phases of the critical frequency of F2 layer. So, the morning peaks type profile going to plateau profile is generally observed in winter; the autumn graphs show the noon bite out profile; the reversed profile is globally observed in spring and summer except the solar maximum where the summer graphs show the dome profile and those of spring plateau profile. The impact of geomagnetic activities disturbed on foF2 variability show positive and negative storm. The statistical study of the same parameter during the solar cycles (20, 21, 22) at the station of Ouagadougou globally shows the noon bite out profile characterizing the existence of strength electrojet.

During solar cycle phases and the different geomagnetic activities, foF2 data from these two stations show equinoctial asymmetry. The comparative statistical study of foF2 diurnal variation during solar cycles 21-22 at Dakar and Ouagadougou stations brought out a significant difference in terms of hourly profiles. Whenever, the autumn graphs show a similitude of profile such as noon bite out profile. Otherwise, we remark an important gap between foF2 values of two stations between 10h00 am-7h00 pm.

Key words:

Equatorial Ionosphere, Solar cycle phases, geomagnetic classes of activity, seasonal variability, statistical average, geomagnetic storm.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1. 1 : Variation des concentrations des constituants neutres et ionisés en fonction de l'altitude.	23
Figure 1. 2 : Structure de l'ionosphère selon la phase minimale et maximale.....	24
Figure 1. 3 : Différentes couches ionosphériques et leur évolution au cours de la journée	25
Figure 1. 4 : Régions ionosphériques du monde	27
Figure 1. 5 : Fréquence d'apparition de la scintillation.....	30
Figure 1. 6 : Les marées atmosphériques, sources principales des courants électriques ionosphériques.....	32
Figure 1. 7 : Schéma de synthèse de la dynamo régulière et du système de courants Sq	33
Figure 1. 8 : Schéma descriptif du mécanisme de formation de la fontaine équatoriale	35
Figure 1. 9 : Contour de foF2	36
Figure 1. 10 : L'électrojet équatorial	39
Figure 1. 11 : Champs magnétique et électrique en région F équatoriale.	40

Chapitre 2

Figure 2. 1 : Variation du nombre de taches solaire sur près de 400 ans	43
Figure 2. 2 : Illustration du calcul de l'indice K	46
Figure 2. 3 : Exemple de diagramme pixel : cas de l'année 1981.....	53
Figure 2. 4 : Techniques de sondage en fonction de couches ionosphériques.....	57
Figure 2. 5 : Principe de sondage de l'ionosonde	59

Figure 2. 6 : Réseau mondial d'implantation des stations d'ionosonde.....	60
Figure 2. 7 : Exemple d'ionogramme enregistré à la station de Korhogo	61
Figure 2. 8 : Données de fréquence critique de la couche F2	63
Figure 2. 9 : Exemple de page d'accueil pour l'acquisition des dates de début brusque d'orage SSC	65
Figure 2. 10 : Diagramme pixel de l'année 1993	67

Chapitre 3

Figure 3. 1 : Différents types de profil de la variation de foF2 en région équatoriale	74
Figure 3. 2 : Profils diurnes de foF2 en phase minimum	75
Figure 3. 3 : Profils diurnes de foF2 en phase ascendante	79
Figure 3. 4 : Profils diurnes de foF2 en phase maximum	82
Figure 3.5 : Profils diurnes de foF2 en phase descendante	85
Figure 3. 6 : Profils diurnes de foF2 en phase minimum	90
Figure 3. 7 : Profils diurnes de foF2 en phase montante.....	93
Figure 3. 8 : Profils diurnes de foF2 en phase maximum	95
Figure 3. 9 : Profils diurnes de foF2 en phase décroissante.....	97

Chapitre 4

Figure 4. 1 : Variation diurne de foF2 en phase minimum à la station de Ouagadougou.....	111
Figure 4. 2 : Variation diurne de foF2 en phase maximum à la station de Ouagadougou.	113
Figure 4. 3 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase minimum à la station de Dakar et Ouagadougou en période calme	118

Figure 4. 4 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase minimum à la station de Dakar et Ouagadougou en période de choc et récurrente.....	120
Figure 4. 5 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase croissante durant l'activité fluctuante à la station de Dakar et Ouagadougou	122
Figure 4. 6 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase croissante durant les périodes perturbées à la station de Dakar et Ouagadougou	124
Figure 4. 7 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase maximum durant les jours calmes à la station de Dakar et Ouagadougou.	126
Figure 4. 8 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase maximum durant les jours de choc à la station de Dakar et Ouagadougou.....	128
Figure 4. 9 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase maximum durant les jours récurrents à la station de Dakar et Ouagadougou.....	129
Figure 4. 10 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase décroissante durant les jours calmes à la station de Dakar et Ouagadougou.....	131
Figure 4. 11 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase décroissante durant les jours perturbés à la station de Dakar et Ouagadougou	133

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2. 1: Latitudes géomagnétiques corrigées des observatoires.....	48
Tableau 2. 2 : Liste des observatoires de mesure de l'indice aa	48
Tableau 2. 3 : Différents indices géomagnétiques	49
Tableau 2. 4 : Valeurs des indices tri-horaires aa et Kpa et de la moyenne journalière Aa	64
Tableau 2. 5 : Années de différentes phases des cycles solaires de notre étude	68

LISTE DE QUELQUES SYMBOLES ET ACRONYMES

Symboles/Acronymes	Significations
α	Angle sous incidence normale
σ	Conductivité électrique
σ	Ecart type
σ_1	Conductivité de Pederson
σ_2	Conductivité Hall
σ_3	Conductivité équivalente
ν	Fréquence de radiation
ϵ_0	La permittivité du vide
μ	Indice de réfraction de l'ionosphère
e^-	Electron dans l'ionosphère
aa	Indice d'activité géomagnétique
AIE	Anomalie d'Ionisation Equatoriale
AU	Les indices d'activité aurorales
B	Champ magnétique
CMEs	Coronal Mass Ejections : éjection de masse coronale
D	Région ou couche D
DST	Disturbance Storm Time : indice d'activité magnétique de l'anneau de courant dans la magnétosphère
E	Région ou couche E
E	Champ électrique
EUV	Extrême Rayonnement Ultraviolet
EEJ	Electrojet Equatorial
Ep	Champ électrique de polarisation
Es	Couche E sporadique

F1	Région ou couche F1
F2	Région ou couche F2
F _{10,7}	Indice de flux radio solaire
foE	Fréquence critique de la couche E
foEs	Fréquence critique de la couche E sporadique
foF1	Fréquence critique de la couche F1
foF2	Fréquence critique de la couche F2
GPS	Global Positionning Systems
g	Intensité de la pesanteur
h	Constante de Planck
H	Composante horizontale du champ magnétique
HF	Hautes Fréquences
I	Inclinaison magnétique
1AGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IGY ou AIG	International Geophysical Year ou Année Internationale de Géophysique
IDV	Indice de Variabilité Interdiurnal
IHV	Indice de Variabilité Inter horaire
J	Courant électrique
Jz	Courant électrique vertical
l (N)	Perte en particules
MUF	Fréquence maximum utilisable
m	masse de l'électron
N	Concentration des particules chargées
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Ne	Densité électronique de la couche
Nm	Maximum de densité électronique
NGDC	National Geophysical Data Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

q	Production des particules
Rz ou SSN	Nombre de tache solaire ou Solar Sunspot Number
SPIDR	Space Physics Interactive Data Resource
Sq	Courant équivalent à la variation diurne régulière
S _R	Variation journalière régulière du champ magnétique pour un jour particulier
SIIG	Service International des Indices Géomagnétiques
SSC	Sudden Storm Commencement en Anglais (début brusque d'orage)
t	temps
UV	Rayonnement Ultraviolet
V	Vitesse moyenne
V	Variance
V _n	Vitesse de déplacement des neutres
WDC	World Data Center for geomagnetism
×	Produit vectoriel

INTRODUCTION GENERALE

Dans le souci d'approfondir nos connaissances sur la Terre et son environnement, de chercher à comprendre les différents phénomènes qui affectent cet environnement, et si possible de mettre en place une étude globale du système Soleil- Terre, il s'avère nécessaire d'affiner nos recherches sur le soleil et les relations qui le lient à la Terre. Une intensification des études sur la variabilité de l'ionosphère à travers des mesures ionosphériques devient une étape incontournable.

L'ionosphère est la région ionisée de la haute atmosphère qui s'étend de 50 à 1000 km environ au dessus de la surface de la Terre. Elle a été découverte par Marconi en 1901 au cours d'une liaison radio transatlantique. Les rayonnements ultraviolet et X en provenance du Soleil sont la principale source de cette ionisation.

L'ionosphère joue un rôle important dans la propagation des ondes radio dans certaines gammes de fréquences, aussi bien pour les communications terrestres, que pour les liaisons Terre-satellite qui dépendent généralement de cet espace.

Les différents types et moyens de sondage ont permis de connaître les caractéristiques de l'ionosphère et de ses différentes couches. Dans ses couches d'épaisseurs différentes, l'ionisation varie en fonction de la journée, de la saison, de la latitude, de la longitude et de l'activité solaire.

Depuis les premiers sondages ionosphériques en 1926 par Breit et Tuve, les recherches ne cessent d'apporter leurs contributions sur la variabilité de l'ionosphère et plus particulièrement sur celle de la couche F2. Il importe de noter que cette dernière dépend de différentes phases du cycle de tache solaires, de la saison et des activités géomagnétiques.

La fréquence critique d'une couche (f_o) qui est directement liée à sa densité électronique constitue un paramètre déterminant dans les recherches sur la variabilité de l'ionosphère. Elle correspond à la densité électronique maximale de la couche considérée.

Les recherches effectuées sur la variabilité de la fréquence critique de la couche F2 (foF2) en régions équatoriales africaines montrent une particularité en termes de profil horaire à la station d'ionosonde de Dakar.

Cette particularité qui a été attribuée d'une part, à l'effet longitudinal (Ouattara et al., 2012) et d'autre part, à la position relative de cette station par rapport à l'équateur magnétique (Gnabahou et al., 2013a) mérite d'être investiguée.

Ainsi, l'intitulé de notre travail de thèse « **Etude statistique de la fréquence critique de la couche F2 dans les stations de Dakar et de Ouagadougou. Comparaison des données statistiques pour les cycles 21-22** » trouve sa place.

Les objectifs de notre travail sont :

- 1- Etablir statistiquement les morphologies typiques de la variabilité de foF2.
- 2- Mener une étude statistique comparative de foF2 entre la station de Dakar qui est située aux abords de l'anomalie d'ionisation équatoriale (dépression de la densité électronique aux latitudes équatoriales et pics d'ionisation aux latitudes tropicales) et celle de Ouagadougou qui se trouve au niveau de son creux.
- 3- Contribuer à l'étude de la météorologie de l'espace pour la détermination de la variabilité ionosphérique à travers différents types d'activités géomagnétiques, différentes saisons et lors de différentes phases de cycle solaire.

Ce travail de thèse est composé de quatre chapitres. Le premier présente globalement les éléments nécessaires à la compréhension de l'ionosphère. Une attention particulière est portée sur les différentes couches ionosphériques, les régions géographiques majeures, les perturbations ionosphériques et les deux principales caractéristiques de l'ionosphère équatoriale à savoir l'électrojet équatorial et la fontaine équatoriale.

Le chapitre 2 est consacré aux données ionosphériques et aux différentes méthodes utilisées dans ce travail. Ce chapitre fait aussi un rappel sur les indices géomagnétiques et solaires, une description sur le diagramme pixel, les fréquences critiques d'une couche et les différents types de sondage ionosphérique. L'évaluation de l'impact de différents facteurs de la variabilité sur la fréquence critique et l'estimation de l'effet des perturbations font également l'objet de ce chapitre.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus conformément à la méthodologie exposée au chapitre précédent. En effet, il traite l'étude statistique de la variation diurne de la fréquence critique de la couche F2 (f_oF2) à la station de Dakar de 1971-1996. Il s'agit notamment de l'étude saisonnière de la variabilité de f_oF2 et de l'impact de l'activité géomagnétique sur la variabilité de ce même paramètre en fonction des phases du cycle solaire.

Enfin, le dernier chapitre concerne l'étude statistique comparative de la variation diurne de la fréquence critique f_oF2 durant les cycles solaires 21-22 entre la station d'ionosonde de Dakar et celle de Ouagadougou. Un bref rappel sur l'étude statistique de f_oF2 à la station de Ouagadougou a été exposé dans cette partie.

Une conclusion générale qui récapitulera nos différents résultats et des perspectives de la présente recherche mettra fin à notre travail.

CHAPITRE 1. : IONOSPHERE ET IONOSPHERE EQUATORIALE

1.1. Introduction

L'ionosphère est la partie supérieure de l'atmosphère terrestre, située à des altitudes comprises entre 50 et 1000 km.

L'étude de la variation journalière du champ magnétique mesuré à la surface de la terre, permit à Balfour Stewart (1882) d'émettre l'hypothèse de l'existence d'une couche conductrice dans cette haute atmosphère. Grâce à la capacité de cette dernière à réfléchir les ondes hautes fréquences (HF), Marconi réussit à réaliser la première communication transatlantique en 1901. Kennelly, aux Etats-Unis, et Heaviside, en Angleterre, fournirent indépendamment l'explication en invoquant l'existence d'une couche réfléchissante dans l'atmosphère. Quelques années plus tard, grâce à la technique du sondage par impulsion, Breit et Tuve (1926) prouvèrent les différentes hypothèses émises et confirmèrent de ce fait l'existence des couches ionisées.

Les rayonnements solaires (UV, X, EUV) constituent la principale source d'ionisation de l'ionosphère. A ces rayonnements s'ajoutent deux autres sources à savoir les particules énergétiques d'origine solaire et le rayonnement cosmique. La présence de particules ionisées dans cette haute partie de l'atmosphère confère à cette dernière la particularité de réfracter les ondes radioélectriques qui s'y propagent. Ainsi, la propagation des ondes depuis le sol dans l'atmosphère terrestre, et notamment dans la gamme de fréquence (3-30 MHz), a largement contribué à la compréhension de cette couche. Leur réflexion sur l'ionosphère permet d'atteindre des points éloignés, hors de portée des autres modes de propagation, et trouve donc des applications importantes, notamment en matière de communication à longue distance.

L'ionosphère constitue aussi le siège de courants responsables de certaines variations du champ magnétique terrestre (Gauss, 1839).

Au dessus de l'ionosphère, il y a la présence de la magnétosphère où l'on note une très faible densité des particules ionisées et neutres. Il y a donc peu de collisions et le mouvement des particules est régi par le champ magnétique terrestre.

Dans ce chapitre, nous donnerons les processus de la formation de l'ionosphère et décrirons sa structure. Ensuite nous présenterons les différentes couches (D, E, F1 et F2), les régions

géographiques majeures et les perturbations ionosphériques. Les deux principales caractéristiques de l'ionosphère équatoriale seront également présentées.

1.2. Formation de l'ionosphère

L'ionosphère est une région de l'atmosphère où les ions et les électrons existent de manière permanente.

Les radiations ultraviolet (UV), ultraviolet extrême (EUV) et X provenant du Soleil peuvent dissocier et ioniser les molécules de la haute atmosphère lorsque leurs énergies sont supérieures au seuil d'ionisation de la molécule.

Les premiers travaux portant sur la formation et la structure de l'ionosphère sont dus à Hulburt (1928) et Chapman (1931a, b). Ces deux chercheurs la décrivent comme la zone d'équilibre entre l'ionisation des espèces neutres atmosphériques provoquées par les radiations solaires et la disparition des espèces ionisées par les phénomènes de recombinaison. Le taux de production de l'ionisation qui est le nombre d'électrons ou d'ions créés par unité de volume et de temps est proportionnel à l'intensité du rayonnement et à la concentration des particules neutres susceptibles d'absorber ce rayonnement. Ces deux facteurs varient en sens inverse avec l'altitude.

1.2.1. Processus chimique dans l'ionosphère

1.2.1.1. Mécanismes d'ionisation

Seules les radiations dont la longueur d'onde est inférieure à celle des radiations contenues dans le spectre visible sont suffisamment énergétiques pour provoquer l'ionisation (ultraviolet et rayons X).

Outre les rayonnements solaires, les particules énergétiques d'origine solaire et le rayonnement cosmique doivent être pris en compte, et qui peuvent jouer un rôle important dans certaines régions ou dans certaines circonstances.

- L'équation qui régit l'ionisation due aux rayonnements UV et X est la suivante :

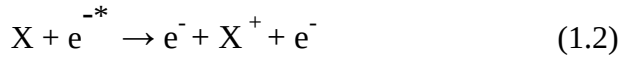


avec $h\nu > P_i$, P_i étant le seuil d'ionisation de l'espèce chimique X, h est la constante de Planck et ν la fréquence de radiation.

- Les particules chargées de haute énergie d'origine solaire et galactique (rayonnement cosmique) ou magnétosphérique (ceinture de radiation) peuvent arriver à des altitudes très

basses et sont susceptibles de provoquer une ionisation importante lorsqu'elles entrent en collision avec les molécules atmosphériques.

L'équation (1.2) illustre la réaction de l'ionisation de ce processus.



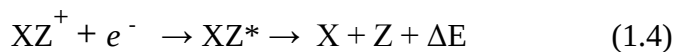
1.2.1.2. Mécanismes de recombinaison

Il s'agit d'un mécanisme qui se traduit par la fixation des électrons sur des particules neutres ou sur des ions positifs existant dans l'atmosphère (recombinaison radiative et dissociative) ou par l'interaction ionique.

- La recombinaison radiative qui se produit avec des ions positifs est surtout efficace dans les plus basses couches de l'ionosphère, où un ion X^{+} capte un électron pour reformer la particule neutre X qui se désexcite en émettant une radiation et s'effectue selon la réaction suivante :



- La recombinaison dissociative a lieu lorsqu'il se produit une collision entre une molécule ionisée et un électron. Ce processus aboutit d'abord à une molécule neutre, mais instable, qui par la suite se dissocie immédiatement avec une libération d'énergie ΔE . La réaction s'effectue de la manière suivante :



- La recombinaison ion-ion a lieu généralement dans les régions denses de l'ionosphère. Elle se fait après l'attachement électronique. On obtient :



Y^{-} réagira à son tour avec un ion positif pour donner la réaction suivante :



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 commence à chuter car l'ionisation diminue et devient moins importante que la recombinaison.

Pour comprendre la formation de l'ionosphère, il faut connaître l'équation dite de continuité qui décrit le mécanisme de variation de la densité d'une espèce chargée donnée, en fonction de trois processus principaux à savoir : la production, la recombinaison et le transport des ions et des électrons. Ce dernier tient compte de la force de gravité, du gradient de pression, de la force électrique et des forces de collisions avec les particules neutres si bien que l'équation ci-dessous représente le taux de variation de la concentration des particules chargées.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - l(N) - \text{div}(N\vec{v}) \quad (1.7)$$

Dans cette équation, q est le terme de production des particules, $l(N)$ celui des pertes par recombinaison, $\text{div}(N\vec{v})$ celui de transport, et $\vec{v}$ la vitesse de l'espèce chargée considérée. Il est important de signaler que les différents termes de cette équation sont fonctions de l'altitude.

La figure (1.1) donne la variation de concentration des différents ions dans l'ionosphère en fonction de l'altitude.

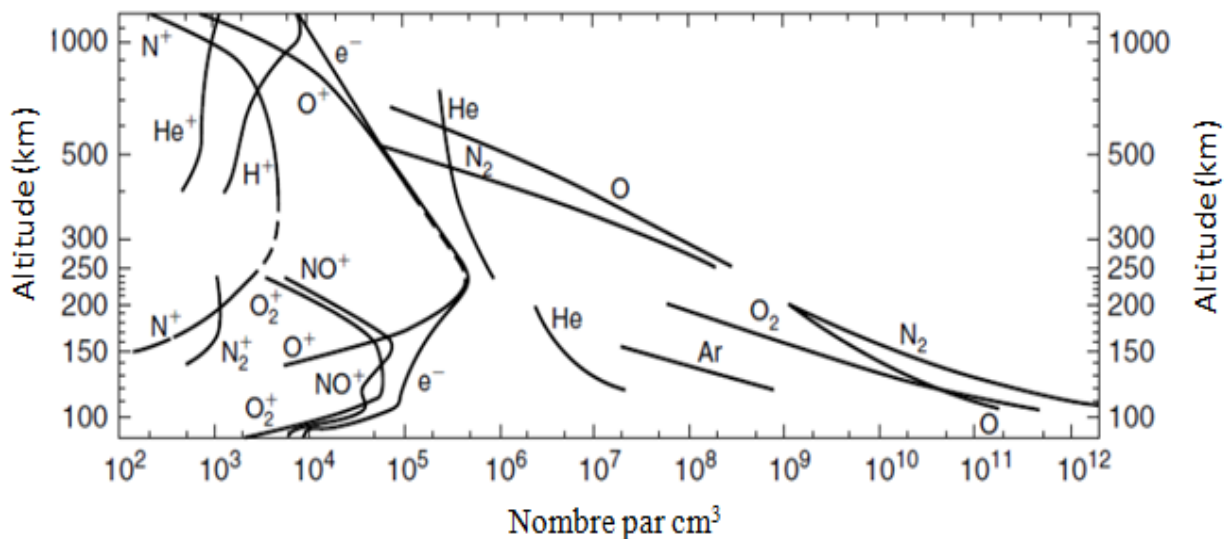


Figure 1. 1 : Variation des concentrations des constituants neutres et ionisés en fonction de l'altitude (Kelley, 2009).

Il ressort de l'analyse de cette figure que, les différentes régions sont composées à la fois d'ions et des particules neutres.

1.2.2. Différentes couches ou régions ionosphériques

L'ionosphère se présente sous forme de régions stratifiées verticalement que l'on désigne par les lettres D, E et F par ordre croissant d'altitude (Davies et al., 1962). La nomenclature de ces couches que l'on appelle aussi régions est due à Appleton en 1947.

La figure 1.2 illustre le profil d'ionisation de jour et de nuit suivant le maximum solaire (courbe continue) et le minimum solaire (courbe discontinue).

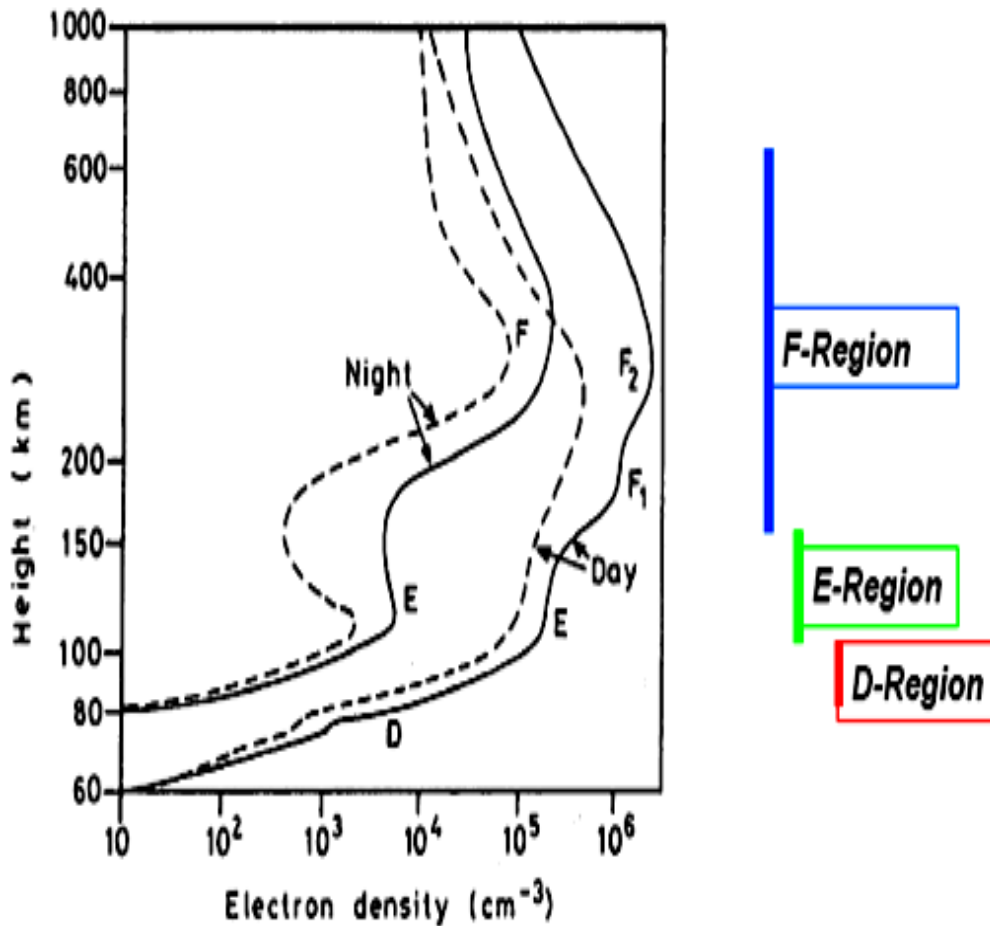


Figure 1. 2 : Structure de l'ionosphère selon la phase minimale et maximale (Watkins, 1998)

La couche D présente le jour, disparaît la nuit. Les couches F1 et F2 disparaissent la nuit pour donner une seule couche F figure (1.2). La figure 1.3 donne l'évolution de différentes couches au cours de la journée et confirme clairement les différentes disparitions.

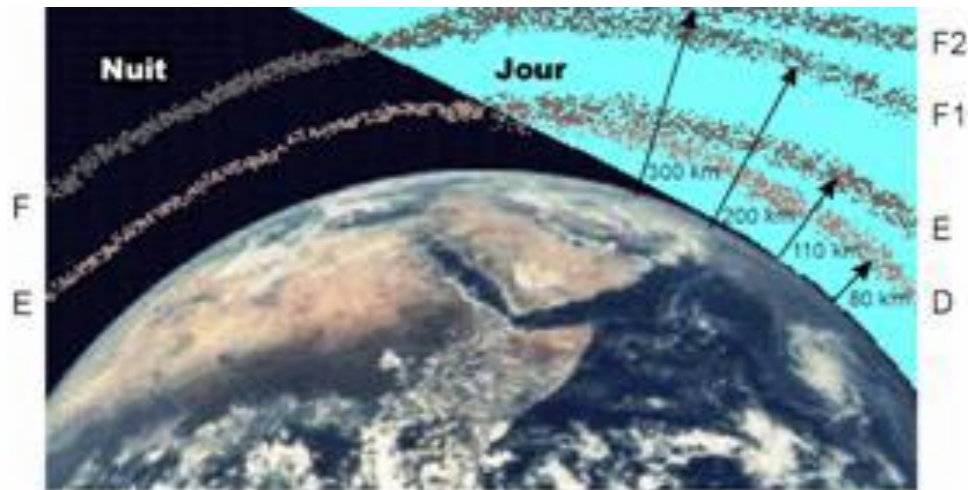


Figure 1. 3 : Différentes couches ionosphériques et leur évolution au cours de la journée (Vallières, 2002)

Dans la suite nous donnerons une description des couches basées sur les travaux de Risbeth et Garriott (1969), Ratcliffe (1970), Tascione (1988), Mc Namara (1991) et Davies (1990).

1.2.2.1. Région D

Cette région la plus basse de l'ionosphère, se situe entre 50 et 90 km. Elle est faiblement ionisée, car peu de rayonnement UV pénètre à des altitudes si peu élevées.

Les sources d'ionisation sont les radiations cosmiques qui sont identiques le jour comme la nuit.

Les composants chimiques présents sont majoritairement des anions et des cations poly atomiques hydratés.

Dans cette région, la pression est de l'ordre de 2 Pa, la température avoisine -76°C , la densité électronique y est très faible et de l'ordre de $10^8 - 10^{10} \text{ e.m}^{-3}$. Celle-ci varie fortement avec le cycle de taches solaires.

Puisque les rayonnements reçus ne sont pas assez importants pendant le jour, cette couche disparaît au coucher du soleil.

Cependant, le jour, grâce aux phénomènes de photo ionisation cette couche réapparaît et elle présente une forte variation diurne.

1.2.2.2. Région E

Cette région qui se trouve au dessus de la couche D, fut la première à être découverte par Appleton en 1925.

Avec une pression de l'ordre de 0,01 Pa et une densité électronique autour de $10^{11} \text{ e}^-/\text{m}^3$, cette couche qui se situe entre 90 et 120 km est indépendante des perturbations externes et existe principalement le jour.

L'évolution de cette couche dépend du niveau de l'activité solaire et de l'angle zénithal solaire.

Les rayons X du soleil constituent la première source d'ionisation et la densité électronique de la couche E varie en fonction du jour, de la saison et de l'activité solaire.

Cette région constitue une zone d'équilibre entre la production d'électrons par ionisation et leur perte par recombinaison dissociative (Biondi, 1964). A cause de l'efficacité de cette recombinaison, la région E s'affaiblit et disparaît presque la nuit partout ailleurs à part les régions de hautes latitudes qui sont les lieux de précipitation des particules ionisantes.

Les ions positifs moléculaires NO^+ et O^+ sont majoritaires dans cette couche au sein de laquelle on trouve quelques minces couches d'ions atomiques (Fe^+ , Ca^+ , Mg^+ , Si^+) qui forment la couche E dite "sporadique" que l'on désigne par Es. Cette couche Es se présente sous forme de bulles d'ionisation de taille et de densité très variables et n'existe que de façon aléatoire et pour des durées limitées.

1.2.2.3. Région F

Cette région se situe au-delà de 120 km et elle possède une très forte ionisation, avec une densité électronique relativement élevée (10^{11} à $10^{12} \text{ e}^-/\text{m}^3$) et une pression de l'ordre de 10^{-4} Pa.

Cette couche dont la température avoisine 1000°C , est constituée d'atomes d'oxygène, d'azote ainsi que d'hydrogène. Elle est très dépendante de l'activité solaire et son altitude fluctue en fonction du rayonnement solaire. Pendant le jour, la couche F se subdivise en deux couches F1 et F2, et se reconstitue pendant la nuit. Toutefois, au maximum d'activité solaire les deux couches peuvent persister pendant la nuit.

L'interface de ces deux couches qui se situe à une altitude d'environ 200 km marque une zone de transition entre les ions atomiques O^+ et ions moléculaires O_2^+ .

Couche F1

Le rayonnement EUV constitue la principale source d'ionisation de la couche F1. Cette couche apparaît peu après le lever du jour et atteint un développement maximum juste après midi. Cette couche qui est beaucoup plus marquée en été qu'en hivers au cours d'un cycle

solaire de faible nombre de tache présente une densité électronique contrôlée par l'angle zénithal solaire.

Couche F2

Cette couche, qui est située au dessus de 200 km d'altitude est la plus importante du point de vue de la propagation des ondes radioélectriques dans la bande haute fréquence (HF).

La région F2 est la plus ionisée de l'ionosphère avec une densité comprise entre 100 et $400 \cdot 10^4 \text{ e}^-/\text{cm}^3$. L'altitude de cette couche peut croître jusqu' à atteindre une certaine valeur appelée hauteur du maximum d'ionisation, située vers 300 km le jour et 450 km la nuit. Au-delà de cette limite, la densité décroît de façon régulière jusqu' à s'annuler dans l'espace libre (vide).

Cette couche est caractérisée par la présence de deux régions de pics de fréquence critique foF2 situées entre les latitudes 20°Nord (+20°) et 20°Sud (-20°). La couche présente une forte perte d'électrons résultant de l'augmentation du nombre d'atomes de l'atmosphère neutre qui est la cause de l'anomalie hivernale et cette dernière ne survient seulement que le jour.

Dans cette couche, l'évolution de la fréquence critique est linéairement dépendante de celle du nombre de taches solaires et on y retrouve les mêmes éléments que dans la couche E, mais l'oxygène atomique devient prépondérant.

1.3. Régions géographiques majeures de l'ionosphère

En latitude, l'ionosphère peut être divisée en trois grandes régions : les régions de haute latitude, moyenne latitude et les régions de basses latitudes contenant la région équatoriale.

La figure 1.4 illustre les différentes régions géographiques majeures du monde.

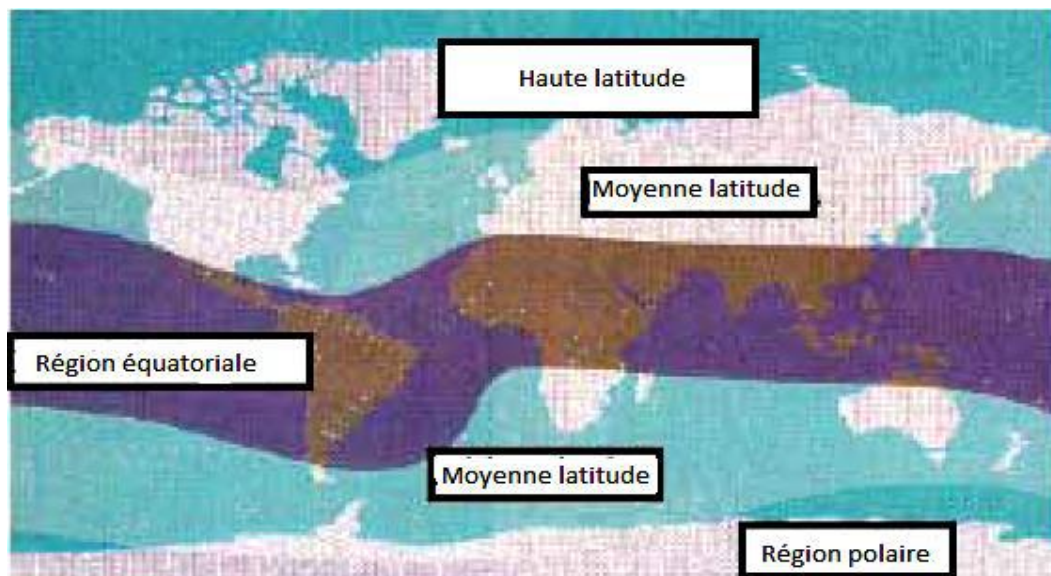


Figure 1. 4 : Régions ionosphériques du monde (Knight et al., 1999)

1.3.1. Régions de basse latitude

Dans cette région, nous avons une forte densité électronique, car le phénomène de photo ionisation est d'autant plus efficace que l'angle zénithal du soleil s'approche de zéro. Le phénomène de scintillation se fait plus marqué dans cette zone.

Sous l'influence des champs électrique et magnétique, les électrons libres formés par photo ionisation à l'équateur s'élèvent et se déplacent le long des lignes de force du champ magnétique qui sont pratiquement horizontales à cette latitude ; ensuite, ces électrons redescendent au niveau de la couche F à des latitudes comprises entre 10° et 20° créant, ainsi, une zone de forte concentration électronique, appelée l'anomalie équatoriale.

1.3.2. Régions de moyenne latitude

Dans cette région, les densités électroniques et les gradients spatio-temporels sont plus faibles. La région de moyenne latitude n'est pas affectée par la géométrie particulière du champ magnétique qui est horizontal en région équatoriale.

Par ailleurs, étant moins perturbée et moins variable, elle constitue la région d'installation de la plupart des instruments de mesures ionosphériques.

1.3.3. Régions de haute latitude

Aux hautes latitudes, les collisions des atomes avec les particules précipitant de la haute atmosphère produisent d'ions qui viennent renforcer l'ionisation due à la photo ionisation du rayonnement solaire.

Dans cette région, les lignes de force du champ magnétique sont presque verticales. Les particules chargées piégées suivent ces lignes et précipitent dans la couche E aux altitudes d'environ 100 km. Elles entrent en collision avec le gaz neutre de l'atmosphère causant une augmentation locale de la concentration électronique. C'est un phénomène qui est associé aux activités aurorales.

1.4. Perturbations de l'ionosphère

Les perturbations ionosphériques peuvent résulter soit des perturbations solaires soit des perturbations du champ géomagnétique. Les perturbations ionosphériques sont associées directement ou indirectement aux événements solaires (cas des éruptions importantes par exemple). En effet, le soleil est généralement le siège d'éruption libérant d'énormes quantités des particules chargées dans l'espace.

Les particules énergétiques éjectées du soleil interagissent avec le champ magnétique terrestre occasionnant des perturbations magnétiques et l'accroissement de l'ionisation dans l'ionosphère de haute latitude. Les particules à haute énergie ont des répercussions sur les satellites en causant des anomalies dans leur fonctionnement ou en détériorant l'équipement. Les ondes radioélectriques utilisées pour les télécommunications par satellite ou la navigation GPS sont affectées par l'augmentation de l'ionisation qui entraîne la défaillance des communications ou des systèmes de navigation.

1.4.1. Scintillations ionosphériques

Une structure non homogène de petite échelle dans le contenu électronique de l'ionosphère peut avoir une dimension de quelques mètres voire quelques kilomètres et peut provoquer un effet de réfraction et de diffraction des ondes électromagnétiques se propageant à travers l'atmosphère. A cause de la diffraction et de la réfraction, ces structures de petite échelle provoquent une augmentation de l'amplitude du signal et une fluctuation de sa phase. De telles fluctuations causées par de petites structures ionosphériques sont appelées scintillations ionosphériques (Wanninger, 1993).

La Figure 1.5 donne la fréquence d'apparition de la scintillation en nombre de jour par an. La région équatoriale correspond aux deux bandes rouges de part et d'autre de l'équateur magnétique.

La région polaire correspond aux zones jaunes proches des pôles.

La scintillation dépend de la fréquence, de la position géographique, de l'heure locale, de la saison et du cycle solaire. Deux zones sont principalement concernées par ce phénomène : La région équatoriale ($\pm 20^\circ$ de latitude géomagnétique) et la région polaire (au dessus de 70°) (Aarons, 1982).

En pratique, les scintillations en amplitude provoquent des pertes de signal lorsque l'intensité de ce dernier tombe en dessous d'une valeur critique.

Au niveau des zones intertropicales, les événements de scintillation se produisent essentiellement la nuit, (entre 19 h et 23 h locales).

Le spectre en fréquence de ces fluctuations se trouve essentiellement dans la gamme de 1 Hz à 10 Hz.

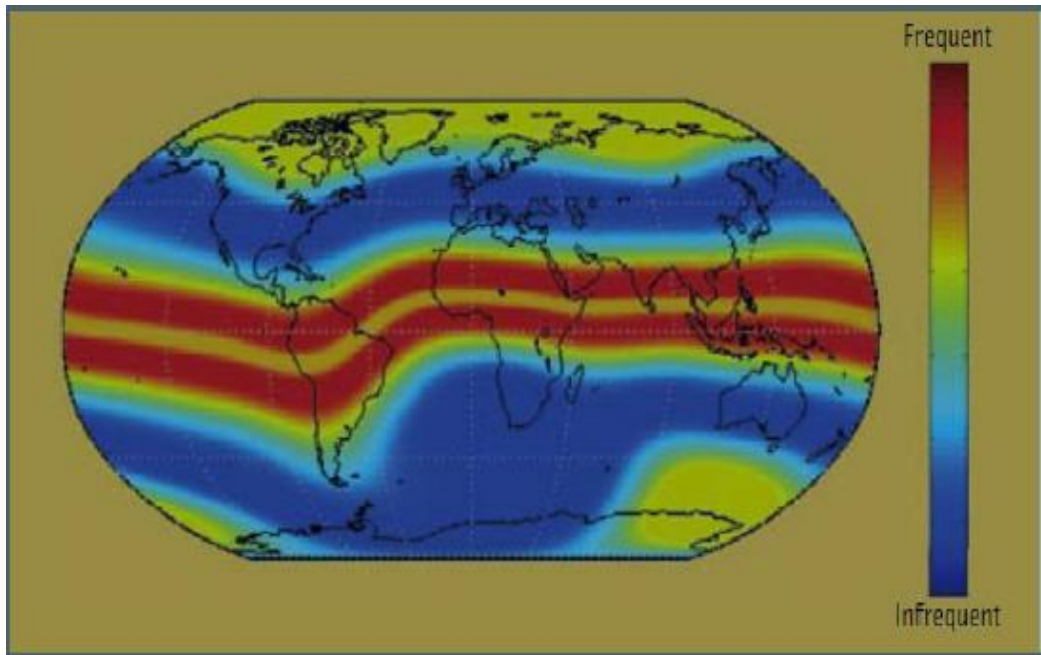


Figure 1. 5 : Fréquence d'apparition de la scintillation. Les deux bandes rouges de scintillation équatoriale où la scintillation survient plus de 100 jours dans l'année (Kinter, 2009)

1.4.2. Orages ionosphériques

Par suite de l'interaction du vent solaire et du champ magnétique terrestre, l'activité solaire peut donner lieu à des perturbations géomagnétiques. Cette interaction modifie le système des courants ionosphériques et magnétosphériques et peut provoquer un orage géomagnétique et indirectement, un orage ionosphérique.

Le déclenchement d'un orage géomagnétique dépend de la position de l'éruption sur le disque solaire et de son énergie, indiquée par des phénomènes qui l'accompagnent : brillance optique, augmentation du rayon X, ...

L'orage géomagnétique constitue une bonne indication de l'existence simultanée d'un orage ionosphérique, c'est-à-dire de perturbations dans l'ionosphère, plus graves que les fluctuations habituelles d'un jour à l'autre.

Les effets les plus importants des orages ionosphériques se manifestent dans la couche F2. Les orages peuvent avoir pour effet, une variation de la fréquence critique f_oF2 .

En plus des orages géomagnétiques causés par les éruptions solaires, il existe une classe d'orages appelés orages récurrents en raison de leur tendance à se répéter après une rotation solaire (27 jours). Ces orages sont liés aux caractéristiques de la couronne solaire connues sous le nom de trous coronaux.

Les effets ionosphériques des orages récurrents semblent, pour l'essentiel, être les mêmes que ceux des orages causées par les éruptions, bien qu'ils aient tendance à être moins graves et à durer plus longtemps (McNamara, 1977a, b).

Les perturbations magnétiques affectent directement les activités qui utilisent le champ magnétique, comme les levés magnétiques, les forages dirigés ou l'utilisation des boussoles.

1.5. Dynamo ionosphérique

Les marées atmosphériques qui constituent les sources principales de la dynamo ionosphérique ont deux origines : une origine thermique (marée solaire) et une origine gravitationnelle (attraction du soleil et de la lune).

Les marées gravitationnelles ont une période semi-diurne de 12h et se produisent entre 12h et 4h.

Les marées thermiques qui sont des oscillations atmosphériques provoquées par l'absorption des UV au niveau de la couche d'ozone et de la vapeur d'eau, ont de périodes variant du jour solaire environ 24h, à des sous-multiples de celui-ci (12h, 8h, 6h), et sont prédominant dans la haute atmosphère.

Le mouvement de la masse d'air par suite de marées s'appelle vent neutre. Ce vent constitue l'élément moteur ou la source de la dynamo ionosphérique.

Aux altitudes inférieures, plus précisément dans la région dynamo (90-150 km), la forte présence de l'atmosphère neutre (vitesse $\vec{V}_n$), entraîne dans son mouvement à travers les lignes de force du champ magnétique terrestre, une partie du fluide ionisé. Ce mouvement de charges crée une circulation de courant électrique appelé le courant dynamo dont la densité est définie par :

$$\vec{J}_d = \sigma (\vec{V}_n \times \vec{B}) \quad (1.8)$$

La charge d'espace créée par ce courant donne naissance à un champ électrique de polarisation $\vec{E}_p$ qui tend à créer un courant opposé à celui qui le génère :

$$\vec{J}_p = \sigma \vec{E}_p \quad (1.9)$$

Ces deux courants vont donner un courant résultant qui s'écrit :

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E}_p + \vec{V}_n \times \vec{B}) \quad (1.10)$$

La figure 1.6 (Evans, 1978) présente le mécanisme de génération des marées atmosphériques.

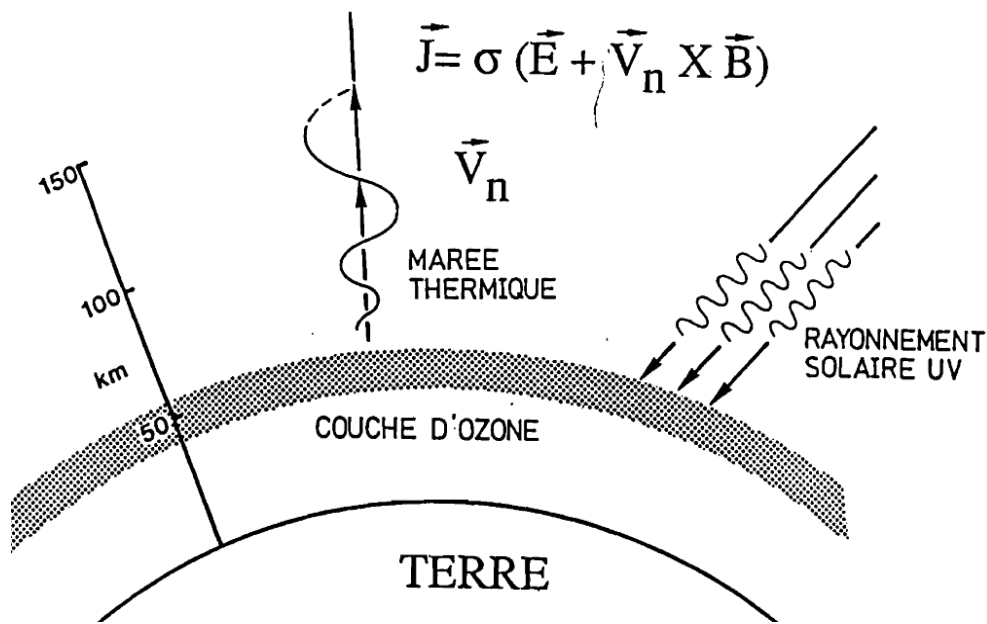


Figure 1. 6 : Les marées atmosphériques, sources principales des courants électriques ionosphériques (Evans, Rev. Geophys. Space Phys., 16, 195, 1978)

Le système de vents neutres produit dans la thermosphère par l'absorption thermique solaire a en première approximation une variation régulière diurne. Cette variation régulière produit un régime de courants par calme magnétique (SR). Il se crée un vortex de courant sur la face éclairée de la planète avec un sens de rotation contraire à celui des aiguilles d'une montre autour d'un foyer aux environs du midi local.

Les variations journalières régulières du champ magnétique terrestre, appelées Sq (solar quiet) ou S_R (Solar regular) observées au sol sont les effets des courants électriques circulant dans cette région (90-150 km) communément appelée dynamo (figure 1.7).

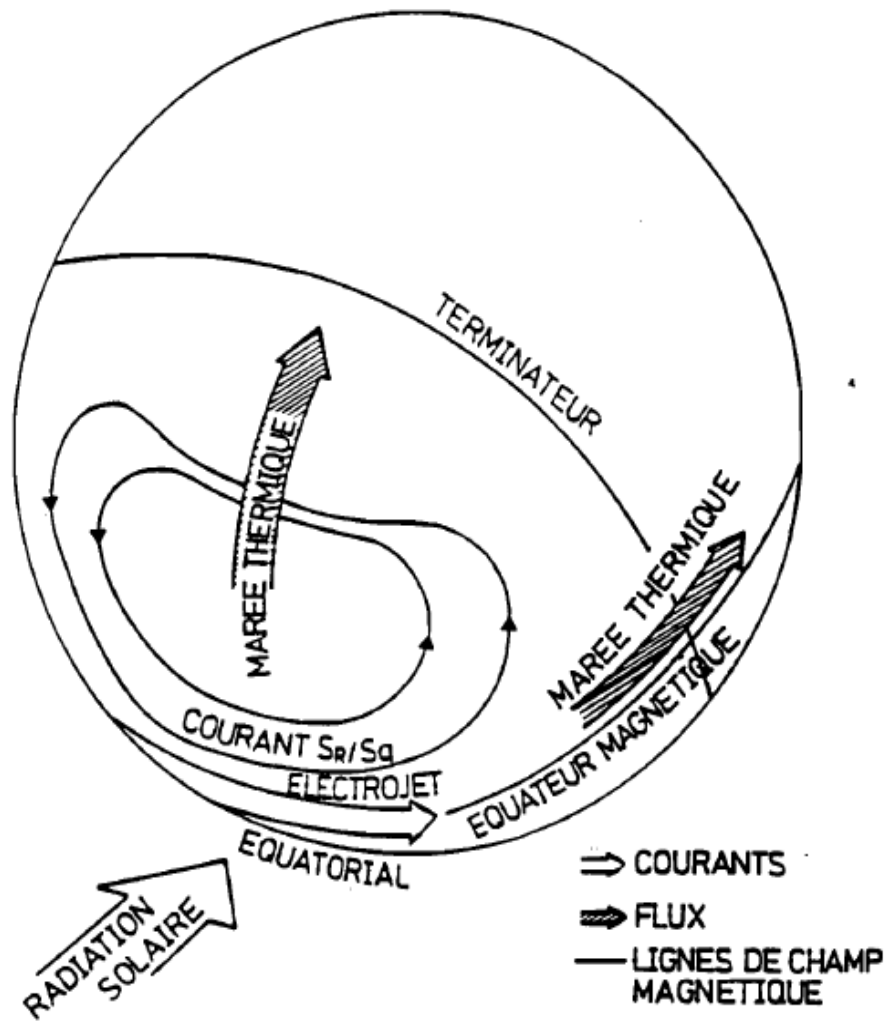


Figure 1. 7 : Schéma de synthèse de la dynamo régulière et du système de courants Sq déduit des composantes H et D du champ magnétique terrestre (les courants électriques qui circulent dans la région dynamo de l'ionosphère engendrent des variations du champ magnétique terrestre observées au sol)

Sur cette figure, nous remarquons la représentation du système de courants réguliers observés sur l'hémisphère Nord où le courant circule dans le sens inverse à celui des aiguilles d'une montre.

Cependant, dans l'hémisphère Sud la circulation du courant s'effectue en sens opposé.

Le courant S_R est déterminé sur la variation d'un jour donné (Mayaud, 1965).

La détermination de S_q se fait en déterminant la moyenne des 5 jours les plus calmes du mois (Chapman and Bartels, 1940).

Aux moyennes latitudes, ces courants réguliers constituent le système Sq et aux basses latitudes, ils forment l'électrojet équatorial.

De nombreux travaux (Richmond, 1979) ont permis une meilleure représentation de la circulation des courants. Les effets de la structure verticale des modes de marée sur la couche conductrice dépendent de leur longueur d'onde (Tarpley, 1970).

1.6. Ionosphère équatoriale

L'ionosphère équatoriale présente des caractéristiques particulières comparée à l'ionosphère des moyennes et hautes latitudes.

A l'équateur magnétique, le profil des densités électroniques de l'ionosphère montre, une allure différente des profils observés aux moyennes latitudes.

Aux basses latitudes, la région F est caractérisée par un creux d'ionisation à l'équateur magnétique avec des crêtes situées entre 10° à 20° de latitude de part et d'autre de l'équateur. On parle alors d'anomalie équatoriale ou anomalie d'Appleton.

Cette anomalie a été l'objet de plusieurs études scientifiques parmi lesquelles on peut citer Moffett (1979) ; Rajaram (1977) et Stening (1992).

La fontaine équatoriale et l'électrojet équatorial constituent les deux principales caractéristiques majeures de la région équatoriale.

1.6.1. Fontaine équatoriale

1.6.1.1. Principe

Dans la région équatoriale, le champ électrique est suivant la direction Ouest Est dans la couche E et le champ magnétique est horizontal et dirigé vers le nord, cette configuration génère une dérive verticale ascendante appelée dérive hall (Bramley et Peart, 1964).

La vitesse de dérive $\vec{V}_Z = \vec{E} \times \vec{B}$ soulève le plasma vers le haut, jusqu'à environ 700 km d'altitude.

A ces altitudes, le plasma rencontre des lignes de champ qui connectent les deux hémisphères Nord et Sud via l'équateur magnétique; le plasma diffuse sous l'influence de la gravité et du gradient des forces de pression, le long des lignes de champ magnétique de part et d'autre de l'équateur magnétique. L'effet conjugué de cette dérive et de la diffusion ambipolaire le long des lignes de force est à l'origine de phénomène de « fontaine équatoriale».

La figure 1.8 représente le schéma descriptif du mécanisme de formation de la fontaine équatoriale.

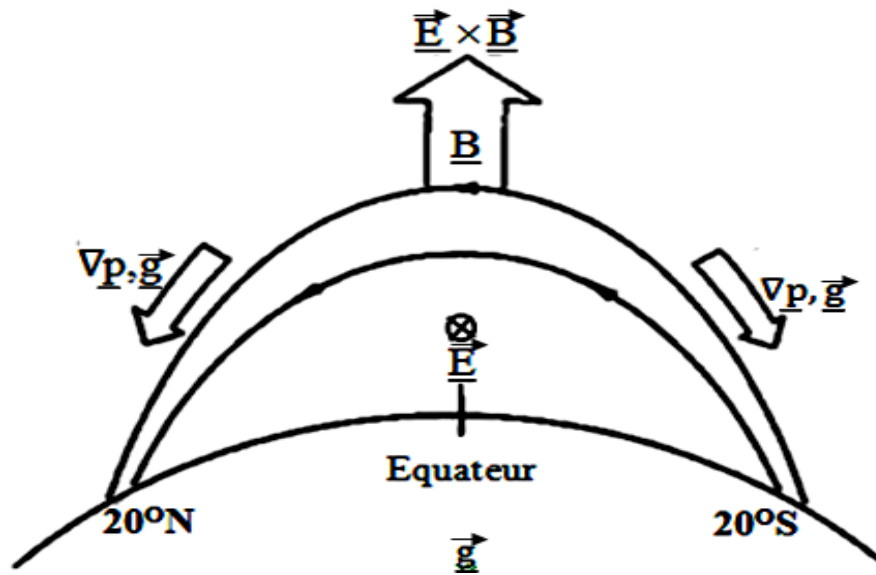


Figure 1. 8 : Schéma descriptif du mécanisme de formation de la fontaine équatoriale (Kelley, 1989)

1.6.1.2. Rappels des résultats basiques

Aux basses latitudes, la couche F2 présente une variation très spectaculaire et surprenante : souvent la densité électronique à minuit dépasse largement celle de midi. Un processus photochimique tenant compte de la variation journalière de la température de l'atmosphère est à l'origine de ce phénomène (Northon et Van Zandt, 1964).

Puisque l'ionisation ne peut passer à travers les lignes de force du champ magnétique, la diffusion verticale est alors négligeable. Cependant, une diffusion le long des lignes de champ est possible surtout à l'équateur (car le champ est horizontal). Ce qui a pour effet d'affecter la distribution latitudinale de l'ionisation.

Hirono et Maeda (1955) ont montré que la dérive électromagnétique peut aussi influencer la variation diurne de la densité électronique.

Les variations en altitude des valeurs de la densité électronique à midi montrent un creux très prononcé centré sur l'équateur magnétique avec des crêtes situées entre 15° et 20° Nord et Sud (Appleton, 1946; Bailey, 1948).

La densité électronique à altitude constante en fonction de la latitude présente un minimum ou creux à l'équateur magnétique et deux maxima ou crêtes qui sont symétriques et situés de part et d'autre en latitude de l'équateur (figure 1.9a). Elles peuvent s'étendre jusqu'à 30° de part et

d'autre de l'équateur (Rajaram, 1977). Le creux se situe en dessous (Croom et al, 1959) et au dessus (King et al, 1964) du pic F2.

Les recherches menées par Balan et Bailey (1995) ont montré que le vent neutre produit une asymétrie avec un important flux de plasma vers l'hémisphère à fort vent et une forte anomalie (théorie de Chapman sur la formation des couches) de crête dans l'hémisphère opposée (figure 1.9b).

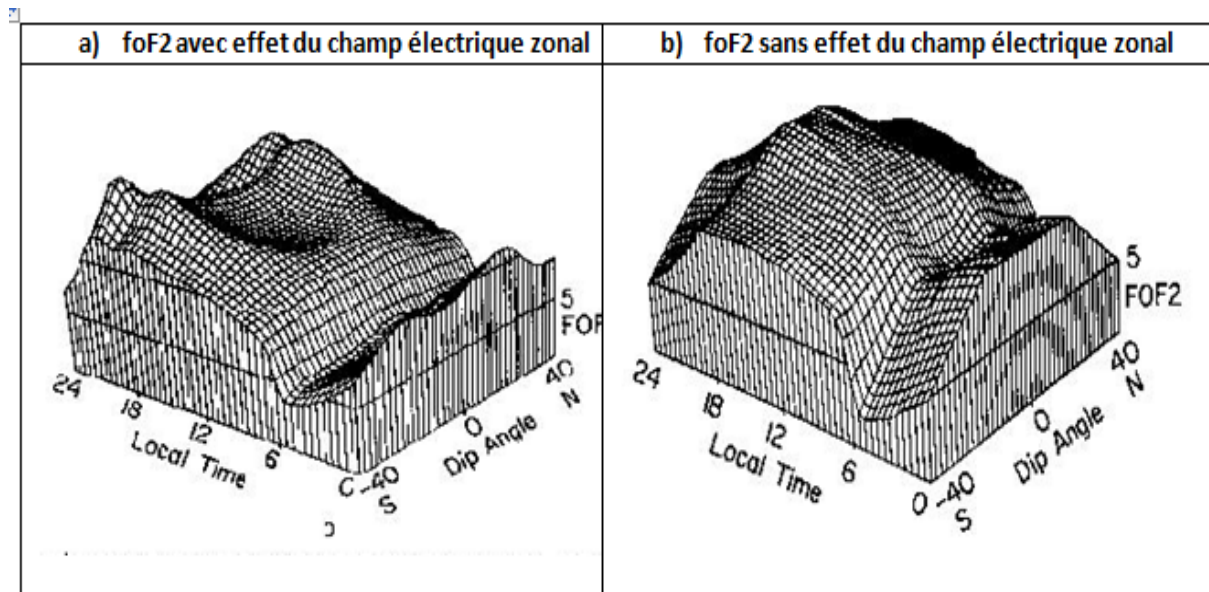


Figure 1. 9 : Contour de foF2 (Kelley, 1989)

En dehors des périodes proches des équinoxes, le creux équatorial montre une asymétrie par rapport à l'équateur dont les valeurs sont plus élevées que celles dues à la variation de l'angle solaire zénithal. Les travaux effectués par Hanson et Moffett (1966) ont montré qu'un vent horizontal soufflant à travers le creux avec une valeur d'environ 50 m/s est à l'origine de cette asymétrie.

Pour expliquer l'anomalie équatoriale ou creux équatorial, plusieurs hypothèses ont été émises :

Selon Mitra (1946), l'anomalie résulte d'une ionisation qui s'éloigne de l'équateur et provoque une accumulation d'électron au Nord et au Sud.

Martyn (1947) et Ducan (1960) proposèrent une théorie alternative d'explication de cette anomalie. Leur théorie repose sur la dérive électromagnétique basée sur l'existence d'un champ électrique de direction Est au cours de la journée en région équatoriale entraînant une dérive ascendante du plasma qui suit, par diffusion, les lignes de force du champ en

s'éloignant de l'équateur. La combinaison de la dérive électromagnétique ($\perp \vec{B}$) et de la diffusion ($\parallel \vec{B}$) entraînent le mouvement de plasma agissant comme une fontaine d'où l'anomalie d'Appleton.

Dans la théorie de Mitra (1946), bien que le taux de production de l'ionisation soit très faible les crêtes de l'anomalie s'élèvent très loin au dessus de l'équateur.

Les travaux de Martyn (1947), montrent un taux de production de l'ionisation très élevé avec des crêtes s'élevant à une hauteur voisine du pic F2. Cette théorie paraît être la plus plausible pourvu que les champs nécessaires existent. Hirono et Maeda (1955) ont formulé l'existence d'un tel champ par effet dynamo dans la basse ionosphère avec une vitesse de dérive journalière voisine de 10 m/s.

Selon des observations faites par les auteurs ci-après, Bramley et Peart (1965) et Hanson et Moffett (1966), un équilibre de l'équation de continuité tenant compte de la diffusion et de la dérive montre qu'une telle dérive de plasma est suffisante pour un creux équatorial.

Balan et Bailey (1965) prouvent que la création d'une couche additionnelle G se trouvant à 10° de latitude de part et d'autre de l'équateur magnétique durant les heures avant midi est due à la convergence de plasma et ceci a lieu avec de très grandes vitesses de dérives.

Ces mêmes auteurs montrent qu'à l'équateur magnétique, lorsque la dérive tend vers sa phase de décroissance juste avant midi, la concentration de plasma due à la couche G est plus grande que celle de la couche F et ceci pour une courte période.

Surtout le soir, peu de temps après le coucher de soleil, la vitesse de dérive, en sens opposé entraîne un effet de fontaine inverse qui supplée à l'ionisation des deux hémisphères en dehors de la zone de fontaine. La fontaine inverse agit comme la principale source de l'augmentation de l'ionisation nocturne dans les latitudes de l'anomalie équatoriale avec quelques contributions provenant du renforcement en phase pré inverse de l'avant de la fontaine (Balan et Bailey, 1995).

Le processus actuel permettant d'expliquer la formation de l'anomalie se repose sur un transport ascendant de l'ionisation due à la force $\vec{E} \times \vec{B}$ au delà de l'équateur, suivi d'une diffusion descendante le long des lignes de force du champ magnétique depuis les hautes latitudes. Dans ce cas, il faut préciser que, $\vec{B}$ représente le champ magnétique terrestre et le champ électrique $\vec{E}$ est dirigé vers l'Est (Sterling et al., 1969).

La composante méridionale du vent neutre constitue la principale cause de l'asymétrie de la position des crêtes tant en latitude et en magnitude (Rishbeth, 1972).

1.6.2. Electrojet équatorial

Dans le but d'améliorer les observations du champ magnétique terrestre, plusieurs stations virent le jour à travers le monde. Ainsi, il fut installé à Huancayo au Pérou, une station magnétique près de l'équateur magnétique en 1922. L'analyse de la composante horizontale H du champ magnétique terrestre enregistrée à cette station, révéla en 1931, une augmentation de son amplitude d'un facteur de deux fois et demi par rapport à celle des stations de moyennes latitudes. Cette caractéristique particulière de H fut attribuée à l'existence d'un courant intense circulant dans la bande d'altitude de 90-130 km, au-dessus de l'équateur magnétique. Ce courant qui doit son existence à l'augmentation de la conductivité électrique à l'équateur magnétique due à la configuration spéciale du champ magnétique dirigé vers le Nord et du champ électrique dirigé vers l'Est fut nommé électrojet équatorial (EEJ) par Sydney Chapman en 1951.

Des mesures in situ confirment l'existence de ce courant intense avec une demi-épaisseur d'environ 15 km en altitude et localisé aux environs ou au dessus du pic de densité électronique de la couche E (Davis et al., 1967).

La circulation d'un tel courant au niveau de la haute atmosphère résulte de la composition de deux effets agissant sur les particules chargées, ions et électrons à savoir :

- Un effet d'entraînement par les vents horizontaux produits en majorité par les marées atmosphériques, ces marées mettent en mouvement les atomes et les molécules de l'atmosphère qui entraînent par collisions les particules chargées.
- Un effet du champ magnétique terrestre agissant sur ces particules. La vitesse d'équilibre résultant de ces deux effets est, en général différente pour les électrons et les ions positifs. Cette différence de vitesse donne donc naissance à un courant électrique.

Compte tenu de l'accumulation de charges à la suite de la mise en mouvement des ions et des électrons, le processus réel d'une telle circulation de courant devient plus complexe et provoquerait la production d'un champ électrique supplémentaire dit champ électrique de polarisation. Ce champ agit différemment sur les ions et les électrons, modifiant ainsi leur circulation.

La figure 1.10 représente l'électrojet équatorial.

L'électrojet équatorial se déplace le long de l'équateur magnétique (le champ magnétique est alors horizontal, et l'inclinaison I nulle) (Jadhav et al, 2002; Luhr et al., 2004). Comme une

partie de la conductivité est liée à l'ensoleillement de l'ionosphère, il est maximum à midi et se dissipe le soir (Ivers et al, 2003).

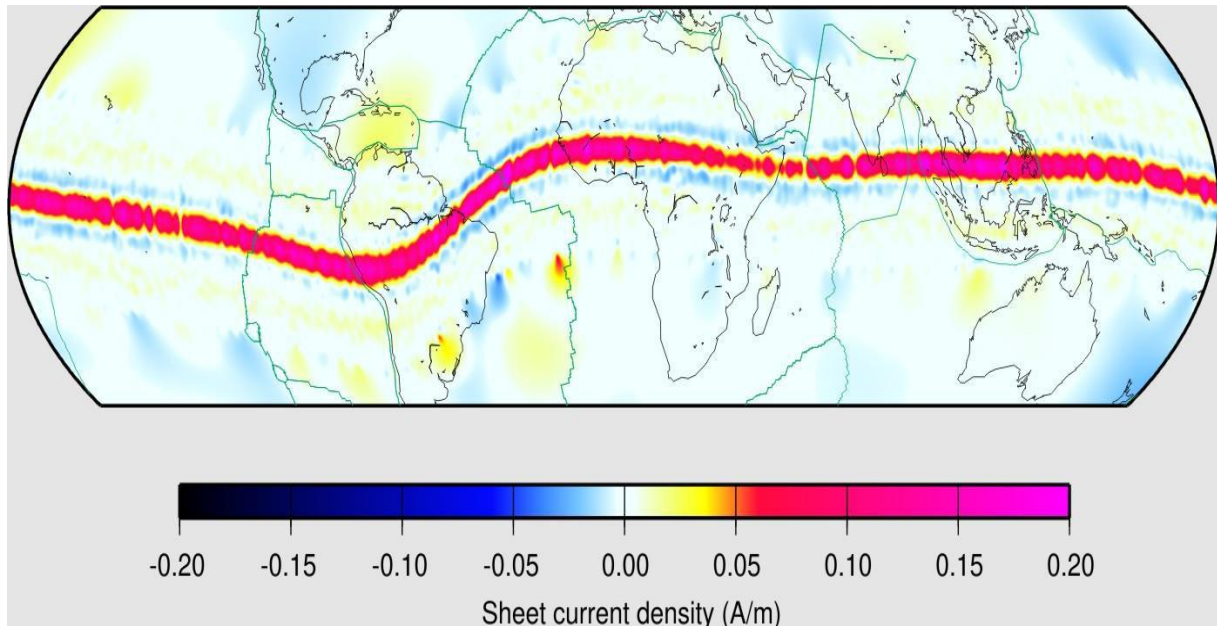


Figure 1. 10 : L'électrojet équatorial (NOAA, NGDC)

La présence des couches moins conductrices au dessus et en dessous de la région dynamo (90 – 150 km) a permis à Cowling (1932), Martyn (1948) et Baker and Martyn (1953) de montrer que l'affaiblissement de la circulation du courant Hall dû à ces couches renforce la conductivité ionosphérique Est-Ouest près de l'équateur magnétique.

C'est l'intensification de cette conductivité Est-Ouest qui entraîne l'électrojet équatorial avec l'amplification du courant équivalent S_q observé dans la ceinture équatoriale.

Cette polarisation se produit à toutes les latitudes. Toutefois, c'est près de l'équateur magnétique où le champ $\vec{B}$ est horizontal et où les charges de polarisation ne peuvent pas s'échapper le long des lignes de force du champ magnétique qu'il a lieu. Souvent, l'après midi, et rarement le matin, un phénomène particulier se produit à l'équateur magnétique. En effet, on peut observer soit une diminution de l'amplitude de la composante H, soit une inversion de celle-ci (Reddy, 1989). C'est le phénomène du contre électrojet.

Expression du courant de l'électrojet équatorial

Parmi toutes les couches ionosphériques, seule la couche E présente une conductivité importante pour rendre possible la circulation des courants.

En région équatoriale, les directions connues du champ électrique et du champ magnétique (figure 1.11) créent un courant de Hall vertical $\sigma_2 \vec{E}$ qui accumule des charges à la frontière supérieure de la zone E. L'existence du champ supplémentaire $\vec{E}_p$ de polarisation verticale donnerait un courant $\sigma_1 \vec{E}_p$.

Le courant résultant $\vec{j}_z$ vertical serait la somme des deux courants

$$\vec{j}_z = \sigma_2 \vec{E} + \sigma_1 \vec{E}_p, \text{ avec } \sigma_1 \vec{E}_p \text{ le courant de PEDERSEN} \quad (1.11)$$

L'équilibre sera atteint quand le champ annulera le courant $\vec{j}_z$. Le champ provoque un courant de Hall dans la direction Est-ouest: $-\sigma_2 \vec{E}_p$ on a alors :

$$\vec{j} = \sigma_1 \vec{E} + -\sigma_2 \vec{E}_p \quad (1.12)$$

La condition d'équilibre permet d'écrire :

$$\vec{j} = \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \right) \vec{E} = \sigma_3 \vec{E} \quad (1.13)$$

La conductivité σ_3 dans la direction Est-Ouest est appelée conductivité de Cowling. Cette conductivité qui permet de décrire l'intensification des courants dans la direction Est-Ouest caractérise l'existence de l'électrojet équatorial à 100 km d'altitude environ.

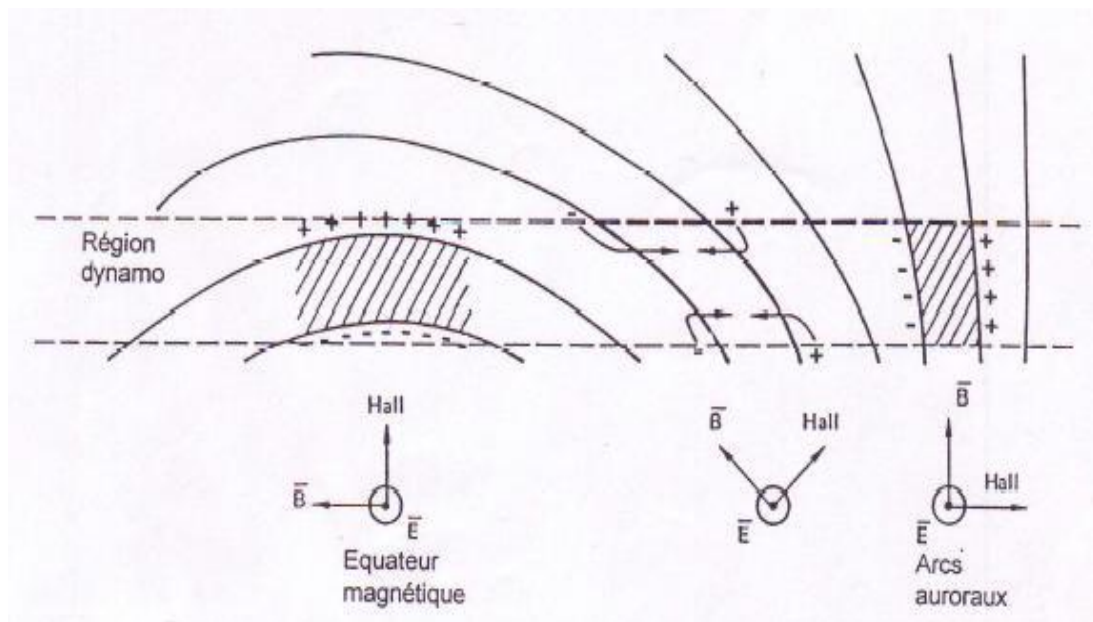


Figure 1. 11 : Champs magnétique et électrique en région F équatoriale.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit de manière succincte les différentes couches ou régions ionosphériques en passant par la formation et la structure de ces couches.

Les régions géographiques majeures de cette haute atmosphère (haute latitude, moyenne latitude et basse latitude) ont été présentées ainsi que les perturbations ionosphériques (scintillations, et orages ionosphériques). L'étude sur la dynamo ionosphérique a aussi été abordée.

Les deux principales caractéristiques de l'ionosphère équatoriale à savoir la fontaine équatoriale et l'électrojet équatorial ont été également expliqués dans ce chapitre car l'ionosphère équatoriale constitue notre région d'étude.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différents indices solaires et géomagnétiques, le diagramme pixel, les fréquences critiques et les méthodes utilisées.

CHAPITRE 2. : METHODES ET DONNEES UTILISEES

2.1. Introduction

Dans le but de comprendre les différents phénomènes physiques impliqués dans les relations Soleil-Terre, les effets des particules solaires affectant l'environnement terrestre et le climat, et pour des études ionosphériques, il est nécessaire de passer par les indices géomagnétiques et solaires et les paramètres ionosphériques obtenus par différents types et techniques de sondage.

Grace à la disponibilité depuis 1868 de l'indice d'activité géomagnétique aa établi par Mayaud (1971 ; 1973), Legrand et Simon (1989 ; 1990) et Simon et Legrand (1989) ont réussi à faire une classification de l'activité géomagnétique en fonction de leurs sources solaires.

Grâce aux fréquences critiques des couches, plusieurs études ionosphériques ont été menées à travers le monde et plus particulièrement dans le secteur équatorial africain.

Plusieurs observatoires à travers le monde fournissent des données relatives à l'étude de l'atmosphère terrestre et plus particulièrement celle de l'ionosphère.

Les sites Web suivants parmi tant d'autres permettent d'obtenir respectivement les valeurs de certains paramètres (indices d'activité géomagnétique, les indices solaires, les dates des SSC (Sudden Storm Commencement), etc....) :

- <http://www.cetp.jpsl.fr/>;
- <http://www.ngdc.noaa.gov/>;
- <http://www.ngdc.gov/wdc/>;
- <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>

Dans ce chapitre, seront présentées les données ionosphériques nécessaires pour notre étude et les différentes méthodes utilisées. Il s'agit notamment des indices géomagnétiques et solaires, le diagramme pixel, les fréquences critiques d'une couche, les différents types de sondage ionosphérique ainsi que les outils statistiques utilisés.

2.2. Indices solaires et géomagnétiques

Les indices géomagnétiques décrivent à l'échelle planétaire l'activité du champ magnétique terrestre, ou de quelques une de ses composantes. Les indices solaires permettent de définir l'intensité de l'activité solaire, ou l'occurrence des aurores.

2.2.1. Indices d'activité solaire

2.2.1.1. Indice solaire R_z

Historiquement, les taches solaires sont observées depuis plus de 2000 ans, mais du point de vue scientifique, Galilée fut le premier à les avoir observées en détail à l'aide d'une lunette astronomique en avril 1612. Après cette découverte, les observations vers notre « machine » étoile le Soleil ont été intensifiées. Ce qui a permis à l'astronome suisse H. Wolf de découvrir le phénomène de la tache solaire en 1749 à Zurich. Il a été décidé que le nombre de taches observées s'appellerait le nombre de Wolf ou SunSpot Number ou SSN. Ce savant établit une méthode d'estimation quotidienne de l'activité solaire et parvient à calculer le nombre de taches solaires grâce à la formule suivante :

$$R_z = k (S + 10g) \quad (2.1)$$

où S est le nombre total des taches, g représente le groupe des taches et K un facteur d'échelle dépendant de l'observateur et permettant la conversion des données dans l'échelle originale établie par Wolf ($K \leq 1$).

La figure 2.1 montre l'évolution du nombre de taches solaires sur 400 ans environ.

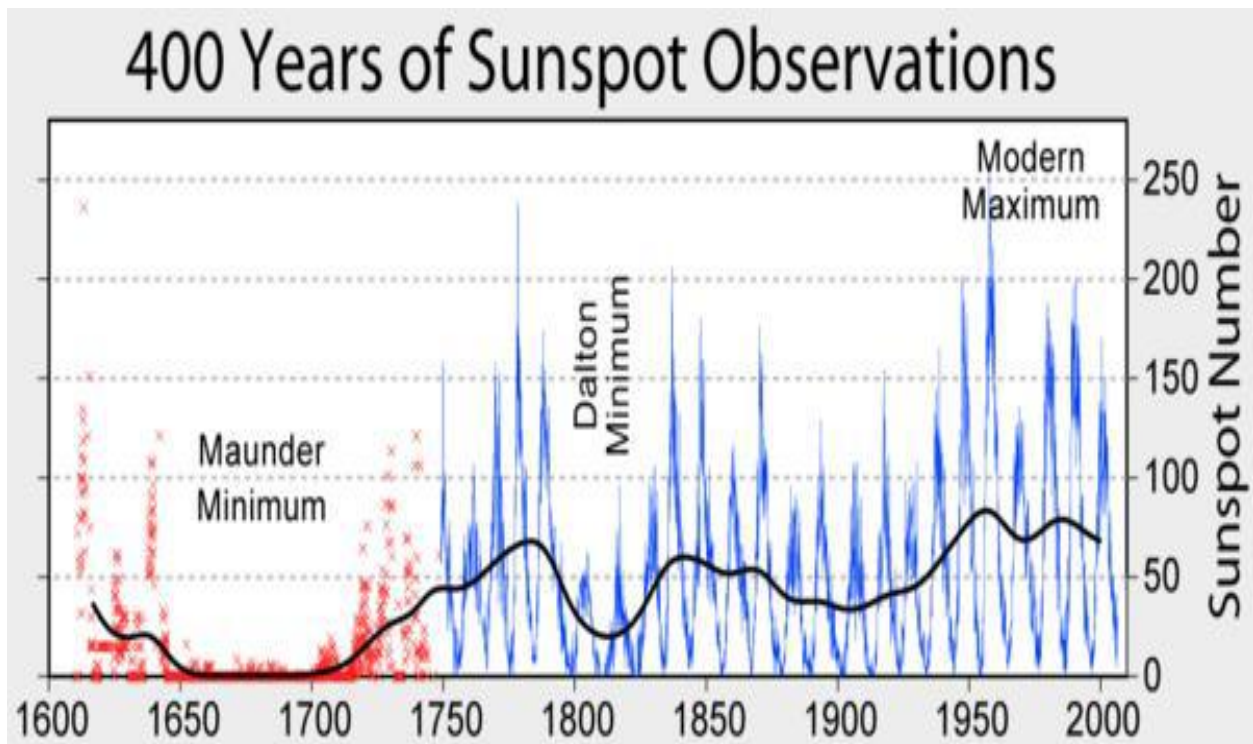


Figure 2. 1 : Variation du nombre de taches solaire sur près de 400 ans (NASA)

Depuis cette date on comptabilise tous les jours le nombre de taches pour en calculer des valeurs moyennes mensuelle et annuelle.

Un cycle solaire est une période pendant laquelle l'activité du soleil varie en reproduisant à peu près les mêmes phénomènes que pendant la période de même durée précédente. Un cycle solaire évolue suivant une période de 11,12 ans en moyenne, mais cette durée peut varier entre 8 et 15 ans.

Le cycle de 11 ans a été déterminé pour la première fois par l'astronome allemand Heinrich Schwabe vers 1843.

Le cycle solaire total est en fait d'environ 22 ans, et s'appelle cycle de Hale et y inclut celui du dipôle solaire.

La première période à savoir le cycle 1 a été observé en 1755 et le cycle 24 a commencé début 2008.

Malgré son imprécision le nombre de Wolf a l'intérêt d'exister depuis 250 ans car l'observation scientifique avec des moyens modernes n'a que quelques cycles dans ses bases de données.

Grâce aux mesures faites par des satellites, une compilation des bases des données permettant d'explorer le soleil et le phénomène lié à ses activités a été mise à la disposition de tous les chercheurs impliqués dans l'étude des relations Soleil-Terre. Le site suivant permet d'accéder à ces données : <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

2.2.1.2. Indice de flux radio solaire $F_{10.7}$

L'activité du Soleil gouverne l'apport d'énergie dans l'environnement ionisé de la Terre.

L'indice de flux radio peut donc se révéler très utile pour les études magnétosphérique et météorologique de l'espace, et il est indispensable comme paramètre d'entrée à certains modèles de la haute atmosphère terrestre.

La mesure du flux radioélectrique solaire se fait par la mesure de l'amplitude du rayonnement solaire sur 2800 MHz soit une longueur d'onde de 10,7 cm. L'unité de mesure du flux solaire est le Watt/m²/ Hz ou en sfu (solar flux unit). 1sfu = 10⁻²² W/m²/Hz.

Il existe une relation entre le nombre de Wolf et le flux solaire :

$$\text{Flux Solaire} \approx 67 + (0,88 \times \text{Nombre de Wolf}) \quad (2.2)$$

Le flux solaire varie de 50 à 300 sfu. Un flux solaire important signifie de bonnes conditions de propagation.

Une valeur élevée du flux solaire (supérieure à 150 sfu) indique que les couches atmosphériques sont abondamment ionisées, on peut donc espérer de bonnes conditions de propagation en HF. Il faut cependant que ces valeurs restent élevées durant 2 ou 3 jours consécutifs pour constater une amélioration notable des conditions.

Puisque l'indice $F_{10.7}$ est disponible seulement depuis 1947, le nombre R_z demeure l'une des plus longues séries d'observation du Soleil.

Les niveaux d'intensité radio sont mesurés en sélectionnant trois sources : (1) une zone non perturbée de la surface solaire; (2) une région active se développant et (3) une région plus intense que le niveau journalier mais de courte vie.

La station de mesure du flux radio solaire est située près d'Ottawa où une mesure est faite quotidiennement à midi local.

L'indice de Flux Radio Solaire Décimétrique est disponible sur le site ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/.

2.2.2. Indices d'activité géomagnétique

Dans le but de rendre plus commode l'analyse des variations du magnétisme terrestre, les scientifiques ont réussi à élaborer de nombreux indices dont le seul objectif est de décrire la signature des événements solaires dans l'environnement inter planétaire et par conséquent que ces indices puissent donner des informations résumées et pertinentes sur l'évolution d'un phénomène plus ou moins complexe.

Un indice est constitué d'une suite de valeurs discrètes dont chacune caractérise le phénomène dans un intervalle de temps convenablement choisi (Mayaud, 1980).

Les indices d'activité géomagnétiques répertoriés sont : K, Kp, aa, am, et IDV.

2.2.2.1. Indices planétaires

Indice K

L'indice K caractérise les effets des activités solaires sur le champ géomagnétique.

Cet indice permet de classer le degré de perturbation de la composante horizontale du champ magnétique terrestre par intervalle de temps de trois heures ou tri-horaire.

La figure 2.2 illustre le calcul de K.

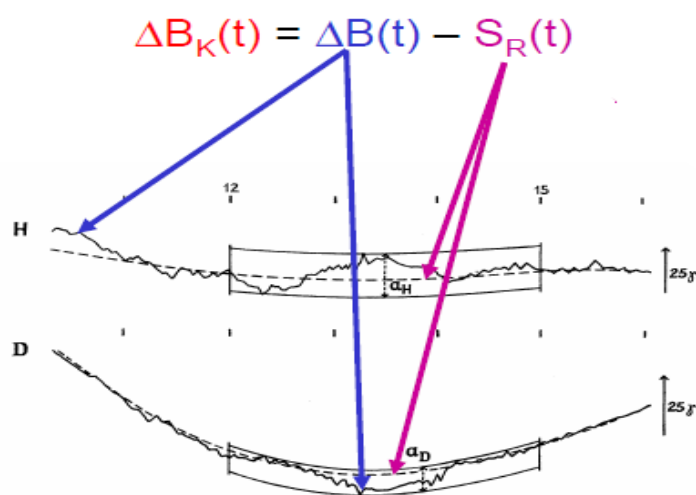


Figure 2. 2 : Illustration du calcul de l'indice K (Menvielle, 2008)

ΔB_K et K sont liés par l'échelle suivante :

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nT0	5	10	20	40	70	120	200	330	500	

Les indices d'activité magnétique a_m , a_a et K_p sont basés sur les indices K mesurés aux stations de réseaux planétaires d'observation et fournissent donc une description planétaire avec une résolution trihoraire.

L'indice K est déduit de l'intervalle crête à crête des variations irrégulières durant l'intervalle tri horaire correspondant. La différence observée entre les valeurs extrêmes après l'élimination de la variation régulière du champ magnétique terrestre S_R correspond à cet indice.

Afin de supprimer les effets des variations avec le temps universel et la saison sur l'activité magnétique, les indices K (Bartels et al., 1939) de chacune des stations ont été standardisés à l'aide de tables établies par Bartels à partir d'un échantillon de référence.

Les indices K sont définis manuellement à partir des magnéto grammes par les observateurs ayant l'expérience requise ou par un calculateur utilisant un des quatre algorithmes approuvés par IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) (Menvielle et al., 2008).

Indice K_p

Cet indice caractérise les effets du vent solaire sur le champ géomagnétique. Il est établi sur la base de mesures faites dans 13 observatoires réparties sur des latitudes sub-aurorales, 11 dans l'hémisphère Nord et 2 dans l'hémisphère Sud. A cause des conditions géopolitiques qui

prévalurent lors de la création de cet indice (guerre froide), les stations sont inégalement réparties à la surface du globe.

La valeur de l'indice K_p est obtenue en faisant la moyenne arithmétique des indices K standardisés. C'est une valeur logarithmique qui varie de 0 à 9 avec une résolution de 1/3.

Pour les valeurs non entières, les symboles + et - sont utilisés. Ainsi 5- correspond à 4 et 2/3.

Les indices mesurés toutes les trois heures permettent de différencier les véritables perturbations du champ géomagnétique des variations produites par les courants ionosphériques.

Les valeurs tri-horaires de K_p sont publiées régulièrement dans le bulletin mensuel du SIIG (Service International des Indices Géomagnétiques) et également disponibles sur le site ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/ du NGDC (National Geophysical Data Center). Ces valeurs sont rangées par intervalles de rotations solaires de 27 jours, comptées depuis le 08 février 1832.

Indice am

L'indice planétaire d'activité magnétique a_m caractérise l'activité aux latitudes sub-aurorales des hémisphères Nord et Sud. Ils intègrent à la fois les effets des électrojets auroraux et ceux du courant annulaire et fournit ainsi une bonne estimation du niveau planétaire moyen de l'activité magnétique d'origine magnétosphérique.

L'indice a_m , qui regroupe les indices hémisphériques a_n et a_s , a été introduit en 1968 par Mayaud. Cet indice est calculé à partir des indices K en un réseau de 21 stations dont 12 dans l'hémisphère Nord et 9 dans l'hémisphère Sud.

Les indices a_m , a_n et a_s sont exprimés en nT; les indices K_m , K_n et K_s correspondent respectivement aux indices a_m , a_n et a_s et sont exprimés sur une échelle allant de 0 à 9.

Les indices d'activité hémisphérique a_n (hémisphère Nord) et a_s (hémisphère Sud) sont les moyennes pondérées des activités en chaque secteur de l'hémisphère correspondant, en utilisant comme coefficient de pondération l'extension en longitude du secteur.

$$a_n = \sum_{i=1}^5 \lambda_{Gi} a_{Gi} \quad a_s = \sum_{i=6}^9 \lambda_{Gi} a_{Gi} \quad a_m = \frac{a_n + a_s}{2} \quad (2.3)$$

L'indice a_m est un indice planétaire qui tient compte de l'état énergétique de la magnétosphère durant l'intervalle tri-horaire sur lequel il est mesuré (Svalgaard, 1977).

La valeur A_m représente la moyenne journalière de huit indices a_m .

Le tableau 2.1 résume les latitudes géomagnétiques corrigées des observatoires.

Tableau 2. 1: Latitudes géomagnétiques corrigées des observatoires (Mayaud, 1967)

Hémisphère Nord				Hémisphère Sud			
Observatoire		Corr.Geom. Lat.		Observatoire		Corr. Geom. Lat.	
G1	MGD	Magadan	53.8°	G6	EYR	Eyrewell	50.2°
	PET	Petropavlosk	46.4°		CAN	Canberra	45.2°
	MMB	Memambetsu	37.4°				
G2	POD	Podkamenskaya	57.2°	G7	GNA	Gnangara	44.1°
	SVD	Sverdlovsk	52.2°		AMS	Amsterdam	48.3°
G3	HAD	Hartland	50.0°	G8	PAF	Kerguelen	58.8°
	NGK	Niemegk	48.8°		CZT	Crozet	52.4°
					HER	Hermanus	41.1°
G4	OTT	Ottawa	58.9°	G9	AIA	Argentine Isl.	49.7°
	FRD	Frederiksborg	51.8°		TRW	Trelew	27.8°
G5	NEW	Newport	55.2°				
	VIC	Victoria	53.9°				
	TUC	Tucson	39.7°				

Indice aa

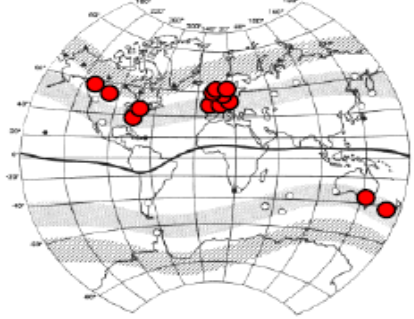
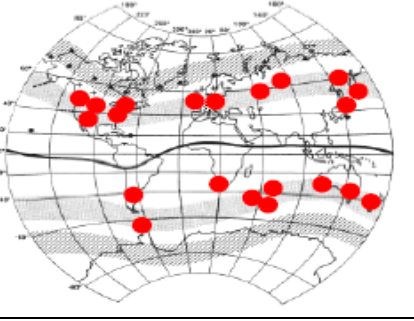
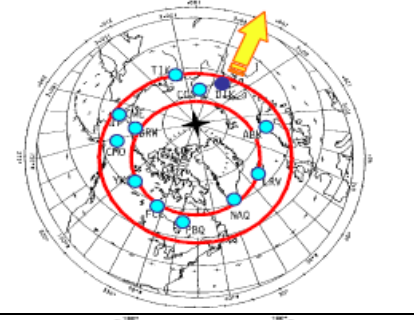
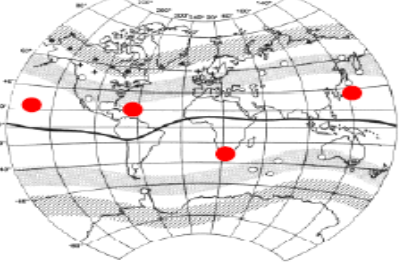
L'obtention de cet indice se fait grâce aux indices K mesurés en deux observatoires antipodaux, à savoir Hartland en Angleterre et Canberra en Australie.

Le tableau 2.2 donne les observatoires des indices géomagnétiques aa avec les coefficients de pondération et le tableau 2.3 résume quelques indices d'activité géomagnétiques.

Tableau 2. 2 : Liste des observatoires de mesure de l'indice aa (Source : http://isgi.latmos.ipsl.fr/des_aa.htm)

Hémisphère Nord		
Période	Observatoire	Latitude géomagnétique corrigée
1868-1925	Greenwich (1,007)	50°
1926-1956	Abinger (0,934)	
1957-.....	Hartland (1,059)	
Hémisphère Sud		
Période	Observatoire	Latitude géomagnétique corrigée
1968-1919	Melbourne	45,2°
1920-1979	Toolangui	
1980-	Camberra	

Tableau 2. 3 : Différents indices géomagnétiques (Zerbo, 2012)

Indices magnétiques	Observatoires magnétiques utilisés	Echelle de résolution	Utilisation
Kp et Ap 11 observatoires dans l'hémisphère Nord 2 observatoires dans l'hémisphère sud		3 heures	Connaitre le niveau principal de l'activité magnétique
Km et Am 12 observatoires dans l'hémisphère Nord 9 observatoires dans l'hémisphère sud		3 heures	Connaitre le niveau principal de l'activité magnétique
Aa	2 observatoires antipodaux	3 heures	Comprendre l'impact de l'activité solaire sur le géomagnétisme
AU et AL 13 observatoires autour de l'ovale auroral l'hémisphère nord		Minute	Etudier les courants annulaires AU : électrojet EST AL : électrojet OUEST
DST 4 observatoires aux basses latitudes		1 heure	Etudier les courants magnétosphériques Courant de Chapman Ferraro

A fin de tenir compte de la différence en latitude des deux stations, la valeur de aa s'obtient en prenant la moyenne pondérée des deux valeurs. Il s'avère aussi important de faire une

conversion en amplitude sur les indices K obtenus toutes les trois heures avant de procéder à cette dernière opération.

La valeur Aa représente la moyenne arithmétique des valeurs tri horaires de aa.

Indice DST (Disturbance Storm Time):

L'indice Dst introduit par Sugiura et Poros en 1969 traduit l'effet des courants quasi symétriques circulant à haute altitude et vers l'ouest provoquant la "phase principale" de la dépression mondiale dans la composante horizontale du champ durant les grandes tempêtes magnétiques.

Le courant annulaire présent dans la magnétosphère (Baumjohann et Nakamura, 2007) produit un champ magnétique capable de faire varier significativement la composante H du champ magnétique mesuré à de basses et moyennes latitudes. L'indice Dst permet de quantifier cette action. Les valeurs de Dst s'expriment en nano Teslas. Il est calculé sur la base de mesures faites en quatre observatoires présents aux basses latitudes (Hermanus en Afrique du Sud ; Kakioka au Japon ; Honolulu à Hawaï ; San Juan à Porto Rico). On peut trouver les valeurs de cet indice sur le site WDC Kyoto (World data center for geomagnetism, Kyoto, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

En utilisant les données de ces quatre stations, Sugiura et Kamei (1991) ont récemment calculé une série homogène de valeurs horaires du Dst pour les années 1957-1986. Ces valeurs sont publiées dans l'IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) Bulletin N° 40. Il existe également des valeurs horaires du Dst basées sur les données de huit stations et qui ont été publiées dans le volume 35 des annales of the IGY (International Geophysical Year).

Indices d'activité aurorale AU, AL et AE

Les indices AU (Auroral Upper), AE (Auroral Electrojet) et AL (Auroral Lower) caractérisent les courants électriques circulant dans l'ionosphère à des régions de haute latitude.

L'indice AL désigne la valeur minimale des mesures prises dans l'hémisphère nord (dizaine de stations) autour de l'ovale auroral et AU correspond à la valeur maximale.

La différence algébrique entre ces deux grandeurs donne l'indice AE.

$$AE = AU - AL$$

Un changement important de valeur de l'indice AE indique un changement du système de courant de l'électrojet auroral et donc une injection de particules dans les zones aurorales.

Ces indices ont été définis par Davis et Saguira (1966) et sont exprimés en nano Tesla.

Nous venons de passer en revue les différents indices géomagnétiques précédés des indices solaires. L'indice aa, qui existe depuis longtemps a permis à Legrand et Simon (1989) de faire une classification de l'activité géomagnétique. Cet indice considéré comme un indice ancien ne peut rester sans subir des dérives. En effet, Svaalgard et Clivers (2005), Svaalgard et Clivers (2007) ont réussi à montrer une diminution de précision en utilisant ces indices pour déterminer l'activité géomagnétique. Les recherches menées par ces deux savants ont abouti à de nouveaux indices géomagnétiques tels que l'indice de Variabilité interdiurnale (IDV) et l'indice de variabilité inter horaire (IHV).

Indice IHV

Dans le cadre de recherches à long terme sur la variabilité du système vent solaire-magnétosphère, il a été introduit un nouveau indice géomagnétique IHV. Cet indice permet de reconstruire avec succès les moyennes annuelles des indices am, aa et ap pour les années où les données de ces indices sont inexistantes.

L'indice IHV ou l'indice de la variabilité inter horaire est défini comme étant la somme des différences (sans tenir compte du signe) entre les valeurs horaires adjacentes de la composante horizontale du champ géomagnétique pour un intervalle de 6 heures autour de minuit local où l'activité solaire est absente ou minimale.

$$\text{IHV (jour)} = \frac{1}{6} \left[\sum_{h=h_1}^{h=h_2} \text{abs}(H_h - H_{h+1}) \right] \quad (2.4)$$

Il existe une très bonne corrélation linéaire entre les valeurs moyennes annuelles des anciens indices géomagnétiques avec celles du nouvel indice IHV (Cliver et Svalgaard, 2004).

Les équations ci-dessous expriment ces relations pour la période de 1959-2000. Il importe de signaler que l'indice IHV est issu de la station de Fredericksburg.

$$\begin{aligned} \text{am} &= 5,6131 * \text{IHV} - 4,4941 \quad \text{avec } R^2 = 0,94 \\ \text{ap} &= 4,5322 * \text{IHV} - 5,9911 \quad \text{avec } R^2 = 0,926 \\ \text{aa} &= 4,8304 * \text{IHV} - 1,7267 \quad \text{avec } R^2 = 0,923 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Où R est le coefficient de corrélation entre les deux variables obtenues par la méthode des moindres carrés.

Ces équations permettent de reconstruire les anciens indices géomagnétiques.

Il faut signaler qu'à la différence des autres indices qui sont gratuits, IHV est payant.

Indice IDV

Cet indice qui possède une très bonne corrélation avec le champ magnétique interplanétaire B_n n'est pas affecté par la vitesse de vent solaire.

L'indice IDV est la différence absolue de la valeur moyenne d'une composante géomagnétique mesurée à la première heure après minuit local pour deux jours consécutifs donnés. Il est à noter que cet indice est également payant.

Il faut préciser que tous les indices subissent des dérives et qu'en fonction de leur spécificité, chaque indice peut être utilisé. D'ailleurs, pour valider les nouveaux indices, Svalgaard et Cliver (2004) ont bien montré qu'il y a corrélation avec les indices existants.

2.3. Diagrammes pixel

L'activité géomagnétique ou variation transitoire du champ magnétique terrestre résulte des courants électriques circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère (respectivement à l'équateur et dans les régions aurorales) selon Legrand et Simon (1989).

En se basant sur un diagramme construit à partir des données d'indices géomagnétiques calculées par Mayaud (1973), Legrand et Simon (1989) ont réussi à déterminer les quatre classes d'activité géomagnétique (activité calme, fluctuante, choc et Récurrente) pour la période de 1868 à 1978. A la suite, cette méthode a été vérifiée par Ouattara et Amory Mazaudier (2009) avec des mesures in situ du vent solaire. Ces deux auteurs ont utilisé ce diagramme pour classer cette activité de 1979 à nos jours et de 1868 à nos jours.

Le diagramme pixel représente les données géomagnétiques comme fonction de l'activité solaire pour chaque rotation de Bartels (27 jours). Les valeurs de l'indice Aa sont disposées sous forme de tableau de 27 colonnes où chaque ligne représente une rotation solaire.

C'est un diagramme coloré qui possède 31 colonnes correspondant au maximum des jours d'un mois. Pour sa construction, les quatre premières colonnes sont répétées à la fin du tableau de telle sorte à avoir 31 colonnes. La lecture commence à partir de la troisième colonne et s'arrête à la vingt-neuvième colonne.

Pour la détermination des jours de chocs, les dates de débuts brusques d'orage ou SSC (Sudden Storm Commencement) en anglais sont indiqués par un cercle, sans tenir compte de nombre multiple de SSC observés dans une même journée.

Le diagramme est ensuite coloré en fonction de la valeur de l'indice Aa et ceci selon un code de couleur développé par Legrand et Simon (1989) et adopté par Ouattara et Amory Mazaudier (2009).

La Figure 2.3 représente un exemple de diagramme pixel de l'année 1981.

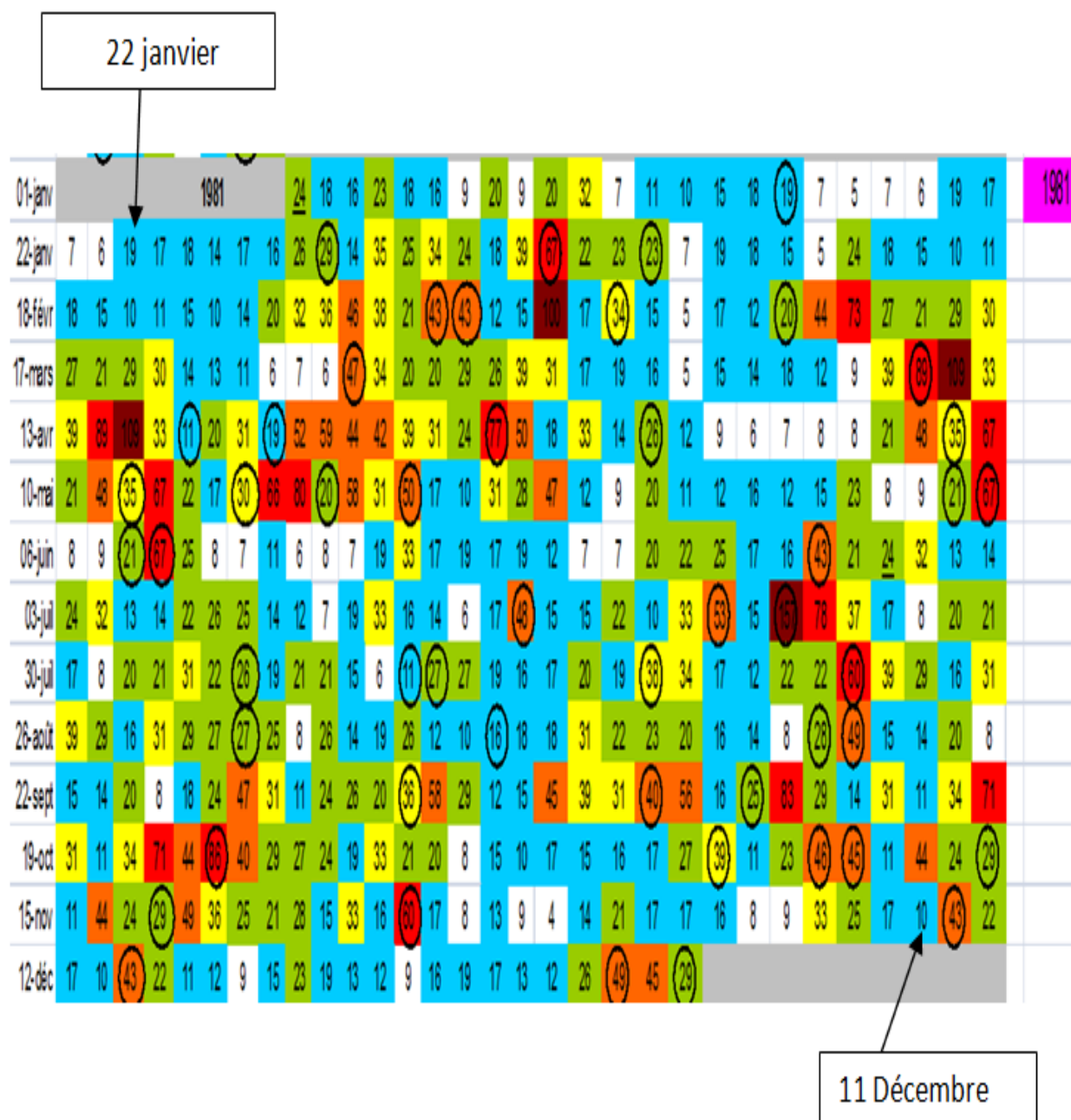


Figure 2. 3 : Exemple de diagramme pixel : cas de l'année 1981

La répartition de différentes couleurs se présente comme suit:

- les intervalles $aa < 10$ nT et $10 \leq aa < 20$ correspondent respectivement à la couleur blanche, et à la couleur bleue. Ces deux zones de couleurs définissent une plage correspondant à une période de faible niveau d'activité magnétique qui représente l'activité calme;
- les intervalles $20 \leq aa < 30$, $30 \leq aa < 40$, et $40 \leq aa < 60$, $60 \leq aa < 100$, et $aa \geq 100$ nT définissent respectivement des zones de couleur verte, jaune, orange, rouge et rouge foncée. Les plages ainsi constituées matérialisent les périodes perturbées.

Les dates sont indiquées à gauche du diagramme et les années aux deux extrémités de la première ligne.

Le diagramme ainsi obtenu est similaire à celui construit par Bartels pour mettre en évidence les orages récurrents qui se produisent en fin de cycle solaire.

2.4. Paramètres ionosphériques et différents types de sondage ionosphérique

L'influence de l'ionosphère sur les télécommunications a été découverte dès le début de la télégraphie sans fil.

Marconi en 1901 montra qu'il était possible de propager une onde radio au dessus de l'Atlantique. Heaviside et Kennelly ont émis l'hypothèse de l'existence d'une couche permanente conductrice dans la haute atmosphère.

Peu de temps après, grâce aux moyens radiotechniques de sondage, Breit et Tuve (1926) réussirent à donner des explications sur les différentes couches de l'ionosphère.

Les différentes propriétés des ondes électromagnétiques à savoir : la réflexion, l'absorption, la diffusion et la polarisation ont été mises en valeur à partir des différents instruments de sondage.

Dans cette section, nous présenterons les paramètres déterminés à partir d'un ionogramme et les différents types de sondage.

2.4.1. Fréquence critique d'une couche

La couche F2 est la couche la plus importante de l'ionosphère du point de vue de la propagation des ondes radioélectriques dans la bande HF. La fréquence critique de cette couche (f_oF2) constitue un important paramètre d'information par voie ionosphérique.

Les fréquences critiques des couches E, F1 et F2, notées f_oE , f_oF1 et f_oF2 respectivement, sont les fréquences du plasma à l'altitude du maximum de densité électronique de ces couches. Tout signal émis à une de ces fréquences est réfléchi à cette altitude et réceptionné sur la terre. Au-delà de cette fréquence, le signal se propage aux altitudes supérieures.

En effet, lorsqu'un signal radioélectrique de fréquence f de quelques MHz, est émis verticalement, il se réfléchit quand la fréquence de l'onde est égale à la fréquence plasma f_p (Rishbeth et Garriott, 1969). Cette fréquence appelée fréquence critique (f_c) est donnée par l'expression suivante :

$$f_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}} = 8,98 \sqrt{N_e} \quad (2.6)$$

avec N_e , la densité électronique, e et m_e , la charge et la masse de l'électron et ϵ_0 la permittivité du vide. Elle correspond à la densité électronique maximale de la couche considérée. L'expression 2.6 est valable pour un signal émis verticalement. En effet, pour une incidence oblique, la fréquence augmente proportionnellement à $1/\cos\alpha$ avec α l'angle d'incidence par rapport à la normale.

Expérimentalement, les fréquences critiques sont obtenues grâce aux techniques par sondage vertical et cette technique ne permet pas de sonder l'ionosphère au-dessus du maximum de densité de la couche à partir du sol. Compte tenu de l'anisotropie du plasma ionosphérique rendu possible grâce au champ magnétique terrestre, l'onde se divise en deux ondes de polarisation différentes lorsqu'elle pénètre dans l'ionosphère. Ces deux ondes se réfléchissent indépendamment donnant deux traces : une première dite « ordinaire » et une seconde de mode dite « extraordinaire » sur l'enregistrement photographique du sondage (ionogramme). Par conséquent, nous remarquons le dédoublement d'une trace en altitude pour la couche F2. Les caractéristiques internationales sont définies à partir de la composante ordinaire.

L'écart entre les deux fréquences dans la couche F2 donne approximativement la demi-gyrofréquence.

A partir d'un ionogramme on peut déterminer la fréquence des couches. Ainsi f_oE qui est la fréquence de la couche E se mesure à partir de l'estimation de l'asymptote verticale de la pente de retard de la trace correspondante. Cependant f_oEs (fréquence critique de la couche E sporadique) se détermine par l'extrémité d'une trace horizontale. Pendant le jour, cette extrémité se raccorde à celle de la couche E.

2.4.2. Hauteur virtuelle h'

Dans l'ionosphère, la densité électronique N_e est fonction de l'altitude. Les fréquences critiques qui sont obtenues grâce aux techniques par sondage vertical dépendent de cette

grandeur. La relation entre les différents paramètres (altitude, fréquence critique, densité électronique) est à la base de la technique du sondage ionosphérique vertical. Le processus expérimental de cette technique est le suivant :

- une station au sol qui envoie des fréquences variant de 1 MHz à 30 MHz, avec une incidence normale sur l'ionosphère ;
- un récepteur au sol qui capte l'onde réfléchie et mesure ainsi le temps de parcours t , correspondant à une hauteur virtuelle h' , définie par :

$$h' = \frac{ct}{2} \quad (2.7)$$

La hauteur virtuelle h' est l'altitude à laquelle le signal émis par la station au niveau de sol aurait été réfléchi si la propagation se faisait à la vitesse de la lumière. Or nous constatons que la vitesse de propagation est variable et inférieure à C . Donc la hauteur réelle de réflexion h est inférieure à h' et est donnée par :

$$h' = h_0 + \int_{h_0}^h \mu dh \quad (2.8)$$

Où h_0 désigne l'altitude de la base de l'ionosphère, h la hauteur réelle, μ l'indice de réfraction de l'ionosphère.

2.4.3. Différents types de sondage

Pour le sondage de la région ionisée de l'atmosphère terrestre on utilise les moyens radiotechniques.

Ces instruments de sondage peuvent être réalisés soit à partir du sol ou soit à partir des satellites. Ces instruments utilisent particulièrement trois types de sondages :

- les sondages zénithaux ;
- le sondage bi statique ;
- les sondages par rétrodiffusion.

La figure 2.4 donne les différents instruments de sondage.

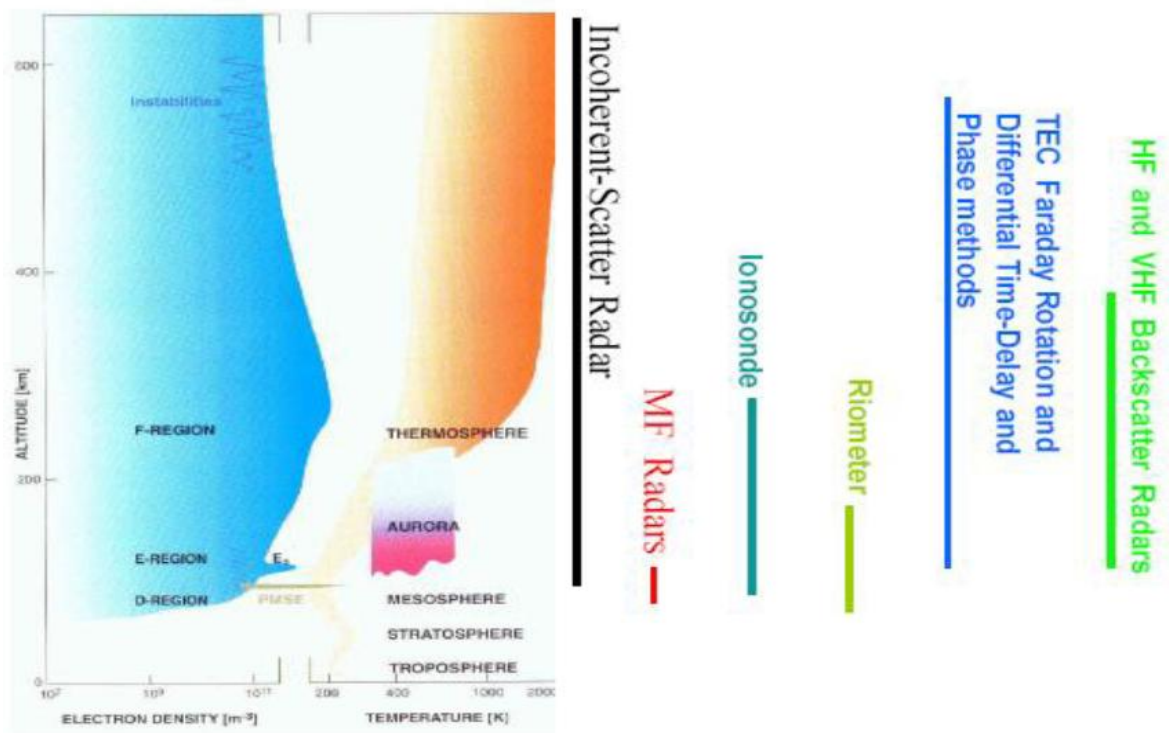


Figure 2.4 : Techniques de sondage en fonction de couches ionosphériques (Watkins, 1998)

2.4.3.1. Sondages zénithaux

La méthode par sondages zénithaux consiste à appliquer la technique du radar à l'ionosphère. Cette dernière constitue la cible de la réflexion.

Cette méthode permet la mesure directe du temps de propagation de groupe.

La hauteur virtuelle de réflexion du signal en fonction de la fréquence d'émission f est appelée ionogramme zénithal. Une lecture directe sur l'ionogramme permet de déterminer les fréquences critiques des couches.

La pénétration de l'impulsion dans l'ionosphère varie en fonction de la fréquence du signal. Une étude de l'exploration des régions ionisées permet de découvrir la fréquence critique de chaque région.

Le sondeur zénithal constitue actuellement le système de prospection le plus répandu, car il constitue un moyen simple et précis et son automatisation est aisée. L'inconvénient de ce sondage est qu'il est limité par l'étude du domaine ionosphérique situé à la verticale de la station.

2.4.3.2. Sondage bi statique

La méthode par sondage bi statique consiste à mesurer le temps de propagation de groupe d'une impulsion HF entre deux stations pouvant être éloignées de plusieurs milliers de kilomètres.

Ce sondage utilise deux stations : l'émetteur (E) et le récepteur (R).

L'émetteur E émet une onde avec une élévation θ dans l'azimut du récepteur R. Lorsque l'onde pénètre dans l'ionosphère, elle est déviée de sa trajectoire rectiligne grâce aux réfractions multiples. Dans cette situation la loi de Descartes s'impose pour la réflexion de l'onde.

La mise en œuvre de ce type de sondage est plus difficile que celle du sondeur zénithal, car il nécessite une synchronisation parfaite de l'émetteur et de récepteur en l'absence de GPS (Global Positionning Systems). Cependant l'avantage de ce sondage est qu'il permet de sonder l'ionosphère à des points d'implantation situés, à des distances avoisinant des milliers de kilomètre, le long du trajet émetteur- récepteur.

2.4.3.3. Sondage par rétro diffusion

Ce type de sondage met l'émetteur et le récepteur sur un seul site. Il est basé sur le principe de radars et le sol joue le rôle de cible par rétro diffusion.

L'enregistrement du temps de propagation en fonction de la fréquence d'émission s'appelle ionogramme de rétrodiffusion.

Grace à ce sondage, on peut obtenir une signature au sol et les régions ionosphériques traversées. Après avoir subi la réfraction ionosphérique, les impulsions émises retournent au sol.

Puisque le sol est non homogène dans son ensemble, une petite partie de l'énergie de l'onde est retro diffusé dans la direction d'incidence et retourne au sondeur en suivant presque le même chemin qu'à l'aller.

Un sondeur à rétrodiffusion, équipé d'une antenne orientable, permet l'investigation de l'ionosphère dans toutes les directions et dans une vaste zone géographique autour de sondeur (sur des distances atteignant autour de 3000 km). Néanmoins, jusqu'à présent, son utilisation a été très limitée à cause de deux points suivants :

- La diffusion introduit un affaiblissement considérable, ce qui conduit dans les systèmes classiques à utiliser des puissances supérieures à 100 kW afin d'obtenir un rapport signal/bruit convenable.

- Il importe de noter que, l'ionogramme de rétrodiffusion ne donne pas la distance de bond permettant de lire directement la Fréquence Maximum Utilisable (MUF), mais plutôt il donne le temps de propagation qui n'est pas relié de façon simple à la distance atteinte.

Toutes ces difficultés prouvent à suffisance que cette méthode ne soit pas régulièrement utilisée par la mesure systématique des paramètres ionosphériques.

2.4.4. Ionogramme

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à une vieille mesure de sondage ionosphérique qui est l'ionosonde et qui reste jusqu'à présent la méthode couramment utilisée.

La figure 2.5 montre le principe de fonctionnement de l'ionosonde et la figure 2.6 indique l'ensemble du réseau mondial d'implantation des stations d'ionosondes.

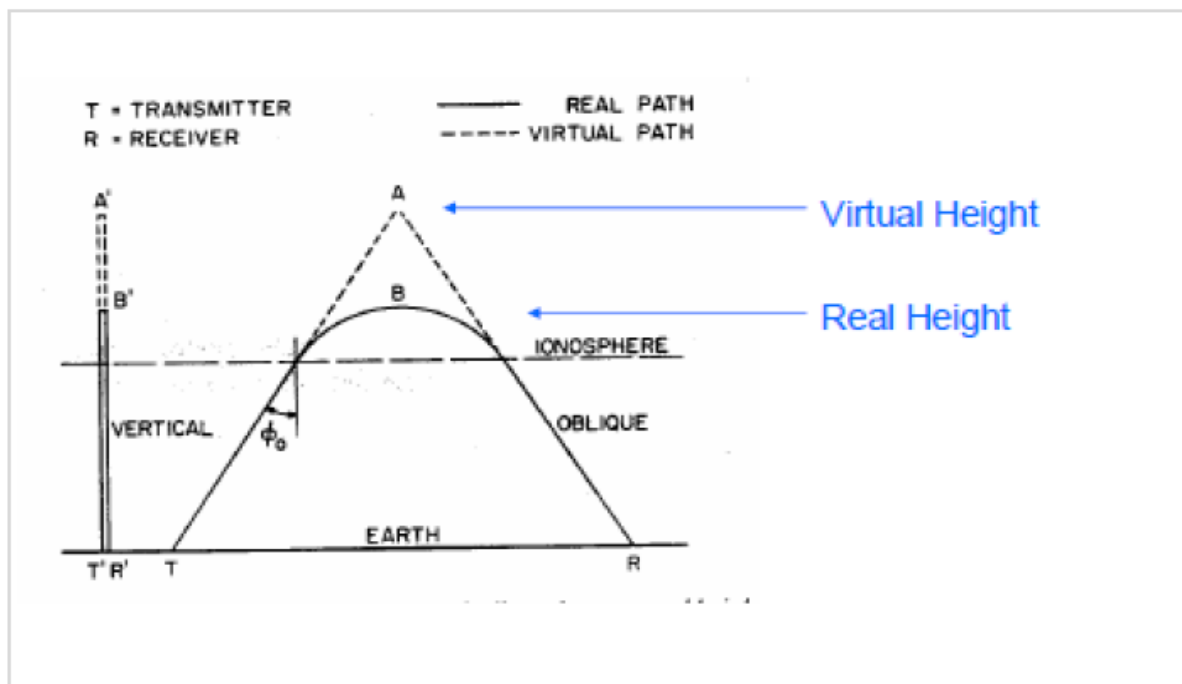


Figure 2. 5 : Principe de sondage de l'ionosonde (Watkins, 1998)

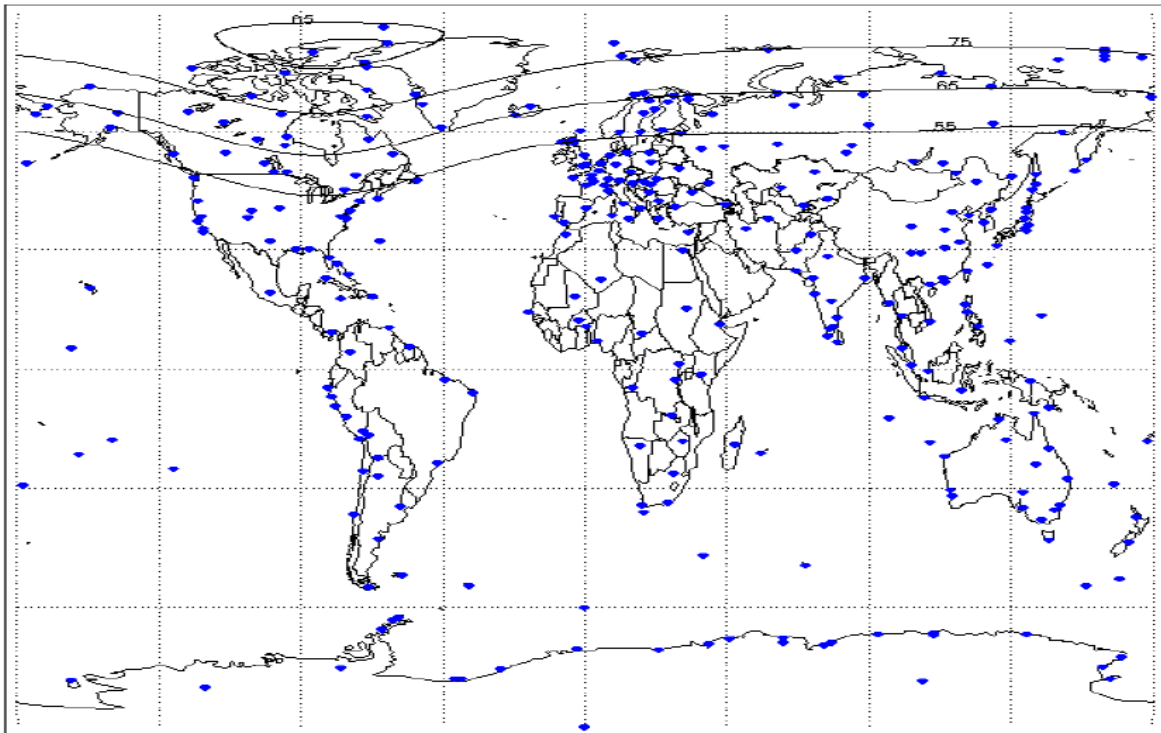


Figure 2. 6 : Réseau mondial d'implantation des stations d'ionosonde.

(www.ukssdc.ac.uk/cgi-bin/iono_dl.conf)

Une ionosonde est en fait un radar émettant des impulsions de près de 10 Kilowatts couvrant les fréquences de 0,5 à 30 Mégahertz via une antenne large bande ayant une ouverture de 90° ou en alternance via une antenne log-périodique à destination du backscatter. Un ensemble de 7 antennes croisées permettent la mesure de la polarisation et de l'angle d'arrivée des échos ainsi reçus. Ces différentes mesures enregistrées sur bandes magnétiques permettent une lecture en continu de l'évolution de l'ionosphère liée à l'influence du soleil.

Les données d'ionosonde peuvent être obtenues sur le site de SPIDR dont l'URL est le suivant : <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>.

Dans le passé, en Afrique au Sud du Sahara, nous notons seulement cinq stations d'ionosondes: Djibouti (lat: 11,5° N; long: 42,8° E), Dakar (lat: 14,8° N; long: 342,6° E), Ouagadougou (lat: 12,4° N; long: 358,5° E), Tamanrasset (lat: 22,80° N; long: 354,5° E), Ibadan (lat: 7,43°N; long: 356,10° E). Actuellement on peut noter qu'il y a en plus les stations de Korhogo (lat: 9,3°N; long: 354,62° E), de Hermanus (lat : 34,4°S; long : 19,25°E), de Madimbo (lat : 22,18°S; long : 30,52° E), de Louisvale (lat :28,5°S ; long : 21,2°E), d'Accra (lat :5,6°N; long: 0,2° O), d'Addis Abeba (lat :9,1°N; long :38,7°E), de Bangui (lat :4,6°N; long : 18,6°E), etc

Un ionogramme (mesures d'ionosonde) donne les variations de la hauteur virtuelle h' des couches de l'ionosphère en fonction de la fréquence de l'onde incidente.

L'ionogramme est l'enregistrement photographique du sondage. Il permet d'obtenir les détails de la structure de l'ionosphère (sa stratification), et donne l'évolution du trajet parcouru par les ondes émises en fonction des fréquences radio.

Sur l'ionogramme de la figure 2.7 apparaît clairement les différentes couches (E, F1, F2), la date de sondage (02 Juin 1995) et l'heure à laquelle l'enregistrement a été opéré (11h 15 mn). Les fréquences sont représentées en abscisse et les hauteurs virtuelles en ordonnées.

Les avantages de l'utilisation d'une ionosonde sont :

- Sa relative simplicité ;
- son faible coût ;
- sa mise en opération facile ;
- L'existence de réseaux mondiaux d'ionosondes.

Il présente cependant des inconvénients à savoir :

- la restriction du sondage à des hauteurs inférieures ou égales au pic de la couche F2 ;
- l'obtention d'un seul point de mesure.

Le dernier inconvénient est contraignant si l'ionosphère est hautement stratifiée.

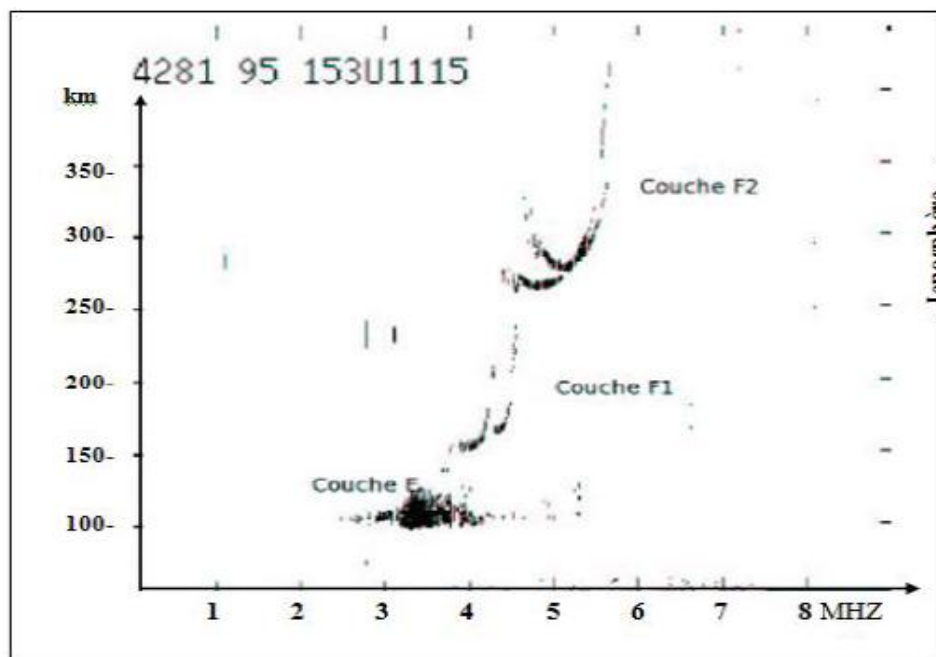


Figure 2. 7 : Exemple d'ionogramme enregistré à la station de Korhogo (Obrou, 2008)

2.5. Données utilisées

Pour nous permettre d'atteindre nos objectifs dans ces travaux, nous avons utilisé comme base des données 1) la fréquence critique de la couche F2 (foF2) des stations ci-après :

- station de Ouagadougou (lat : 12,4° N; long : 358,5 °E; dip:+1,45), située au creux d'ionisation de la région F2 et près de l'équateur magnétique. Elle a fonctionné de juin 1966 à Février 1998 soit environ trois cycles solaires (20, 21, 22). Les données ont été fournies par l'Ecole Nationale de Télécommunication de Bretagne (ENST-Bretagne). Elles permettent l'accès direct aux données annuelle, mensuelle et horaire de foF2.
- station de Dakar (lat: 14,8 °N; long: 342,6 °E; dip: +5,53), située sur la phase ascendante nord du profil d'ionisation de la région F2. Elle a fonctionné de 1950 à 1993 durant quatre cycles solaire (cycles 19, 20, 21, 22). Les données de la base de données de l'ENST correspondent à la période 1971-1996.

L'archivage des données de foF2 se présente sous la forme donnée par la figure 2.8. Cette figure montre une codification du type MMJJHHDD. Avec MM le mois de l'année, JJ le jour du mois, HH l'heure de jour et DD la valeur numérique du paramètre foF2.

Sur la première ligne nous lisons clairement 11,2 MHz comme valeur de la fréquence critique à 03H00 à la date du 1^{er} Janvier.

2) les données Aa utilisées sont archivées sous forme de diagrammes pixel. Ces diagrammes sont fournis par le Laboratoire de Recherche en Métrologie de l'Espace (LAREME) de l'université de Koudougou partenaire du LAME (Laboratoire des Matériaux et Environnement) de l'Université de Ouagadougou grâce au Professeur Frédéric Ouattara.

3) les dates de début brusque d'orages (SSC) qui traduisent les variations rapides du champ géomagnétique dues aux éjections de masses coronales. Ces dates sont fournies par <http://isgi.latmos.ipsl.fr/>. Le tableau 2.4 et la figure 2.9 fournissent les captures d'écran du processus d'acquisition respectivement des valeurs de Aa et des dates SSC issues du site précédent.

Mois	Jours	Heures	foF2
01	01	03	11.2
01	01	04	9.5
01	01	07	2.6
01	01	08	6.4
01	01	09	8.7
01	01	10	12.8
01	01	11	13.8
01	01	12	11.2
01	01	13	10.8
01	01	14	10.4
01	01	15	11.3
01	01	16	11.8
01	01	17	12.5
01	01	18	12.9
01	01	19	12.9
01	01	20	13.0
01	01	21	12.6
01	01	23	12.9
01	02	02	10.8
01	02	08	6.8
01	02	09	9.5
01	02	10	12.5
01	02	11	13.0
01	02	12	13.4
01	02	13	12.9
01	02	14	12.9
01	02	15	12.3
01	02	16	12.3
01	02	17	11.6
01	02	18	11.4
01	02	19	11.1
01	02	20	10.8
01	02	21	10.6
01	02	22	11.2
01	02	23	11.4
01	03	00	10.8
01	03	01	10.6
01	03	02	10.9
01	03	06	7.7
01	03	07	5.7
01	03	08	7.2
01	03	09	9.7
01	03	10	11.5
01	03	11	12.9
01	03	12	12.7
01	03	13	12.9
01	03	14	12.7
01	03	15	12.8
01	03	16	12.9
01	03	17	12.9
01	03	18	12.5
01	03	19	12.1
01	03	21	10.6

Figure 2. 8 : Données de fréquence critique de la couche F2 du 01-03 janvier 1993 de 00h à 24h

Tableau 2. 4 : Valeurs des indices tri-horaires aa et Kpa et de la moyenne journalière Aa de la période du 01-16 Janvier 1990 (site http://isgi.latmos.ipsl.fr/des_aa.htm)

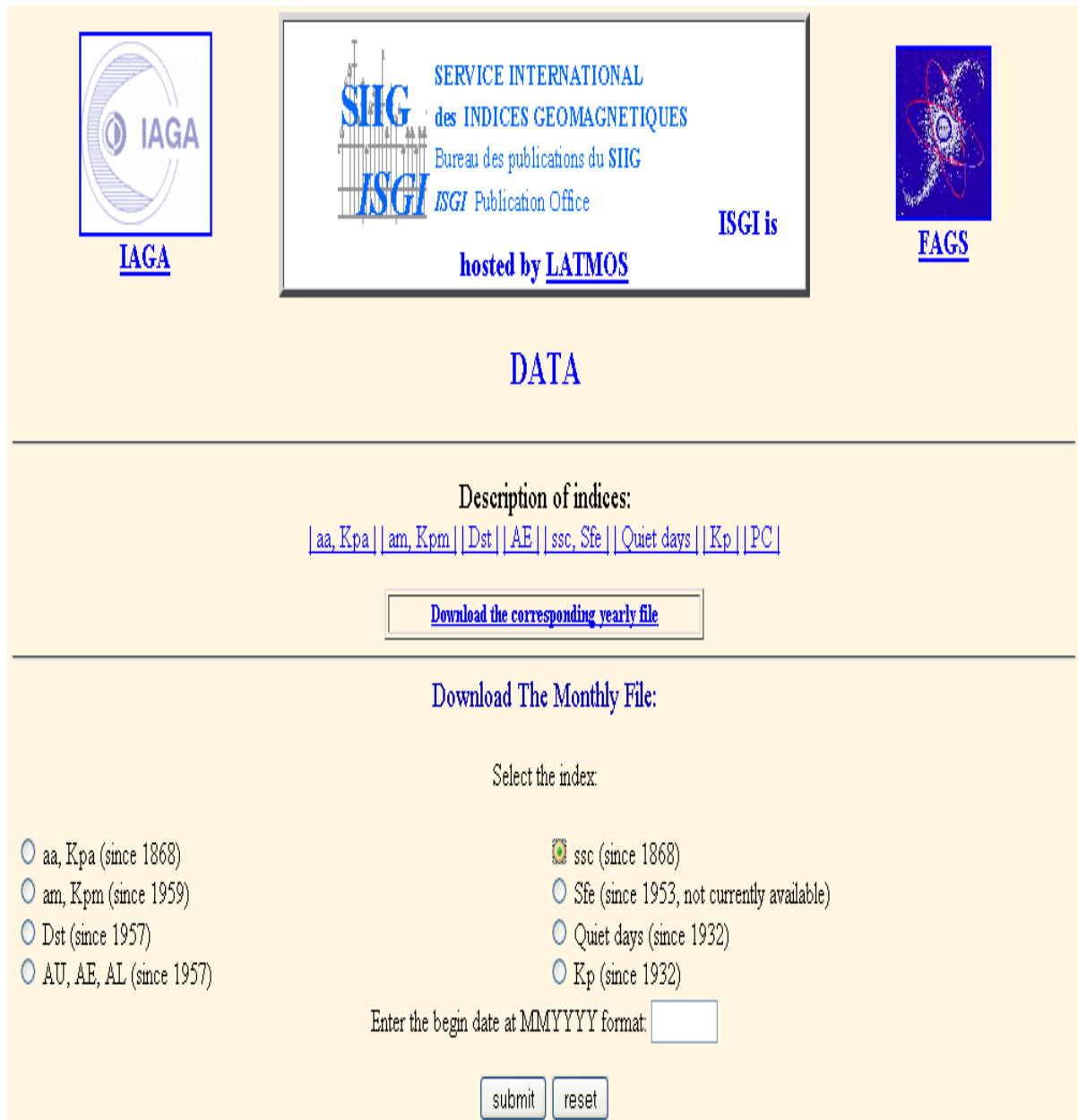
aa, Kpa INDICES

The format presently used is one line for each day, as following:

Date :	Day/Month
--------	-----------

January 1990

Date	Q.D.		aa_3h_ind								Aa	Kpa_3h_ind							
01/01			16	24	24	32	32	32	59	32	31	2+	3o	3o	3+	3+	3+	5-	3+
02/01			45	20	24	24	24	32	32	67	33	4o	3-	3o	3o	3o	3+	3+	5-
03/01			67	24	16	12	24	32	24	12	26	5-	3o	2+	2o	3o	3+	3o	2o
04/01			24	16	9	16	32	12	16	59	23	3o	2+	1+	2+	3+	2o	2+	5-
05/01			32	16	24	24	24	32	59	45	32	3+	2+	3o	3o	3o	3+	5-	4o
06/01		*	37	16	16	12	16	8	16	20	17	4-	2+	2+	2o	2+	1+	2+	3-
07/01	C	C	*	20	16	24	8	12	5	2	8	3-	2+	3o	1+	2o	1-	0o	1+
08/01			8	12	12	8	24	59	59	32	26	1+	2o	2o	1+	3o	5-	5-	3+
09/01			59	32	16	16	32	16	8	37	27	5-	3+	2+	2+	3+	2+	1+	4-
10/01			45	16	46	32	24	32	32	46	34	4o	2+	4o	3+	3o	3+	3+	4o
11/01			24	24	46	46	32	32	45	32	35	3o	3o	4o	4o	3+	3+	4o	3+
12/01			32	32	32	32	24	32	37	16	29	3+	3+	3+	3+	3o	3+	4-	2+
13/01			32	16	24	16	16	12	12	12	17	3+	2+	3o	2+	2+	2o	2o	2o
14/01			20	8	12	12	32	16	8	12	15	3-	1+	2o	2o	3+	2+	1+	2o
15/01			16	16	16	12	32	32	16	8	18	2+	2+	2+	2o	3+	3+	2+	1+
16/01			12	24	12	24	12	24	45	32	23	2o	3o	2o	3o	2o	3o	4o	3+



The screenshot shows the ISGI website interface. At the top, there are three logos: IAGA on the left, the ISGI logo in the center (which includes the text 'SERVICE INTERNATIONAL des INDICES GEOMAGNETIQUES', 'Bureau des publications du SIIG', 'ISGI Publication Office', and 'hosted by LATMOS'), and FACS on the right. Below the logos is the word 'DATA'. A horizontal line separates this header from the main content area. The main content area has a title 'Description of indices:' followed by a row of links: [aa, Kpa](#), [am, Kpm](#), [Dst](#), [AE](#), [ssc, Sfe](#), [Quiet days](#), [Kp](#), and [PC](#). Below these links is a button labeled 'Download the corresponding yearly file'. Another horizontal line separates this from the next section, 'Download The Monthly File:'. This section contains the text 'Select the index:' followed by two columns of radio button options. The left column includes: ☐ aa, Kpa (since 1868), ☐ am, Kpm (since 1959), ☐ Dst (since 1957), and ☐ AU, AE, AL (since 1957). The right column includes: ☐ ssc (since 1868), ☐ Sfe (since 1953, not currently available), ☐ Quiet days (since 1932), and ☐ Kp (since 1932). Below these options is a text input field with the label 'Enter the begin date at MMYYYY format:'. At the bottom of this section are two buttons: 'submit' and 'reset'.

Figure 2. 9 : Exemple de page d'accueil pour l'acquisition des dates de début brusque d'orage SSC (site http://isgi.latmos.ipsl.fr/des_aa.htm)

2.6. Méthodologie

Nous nous sommes basés sur la classification de l'activité géomagnétique définie et classée par Legrand et Simon (1989), Simon et Legrand (1989) telle que consignée dans les diagrammes pixel (figure 2.10) pour déterminer les jours correspondants aux différentes activités.

Nous rappelons que ces deux auteurs ont élaboré leur classification géomagnétique en tenant compte de deux faits essentiels :

1) La contribution de l'onde de choc à l'activité géomagnétique connue sous le nom d'activité de choc.

2) La très bonne corrélation entre les valeurs de l'indice géomagnétique aa calculé par (Mayaud, 1971, 1972, 1973, 1980) et le vent solaire établi par Svalgaard en 1977. Cette corrélation permet de classer le vent solaire en trois types : les vents lents, les vents fluctuants et les vents rapides en fonction de leur origine solaire.

Chaque type de vent est responsable d'une classe d'activité géomagnétique. Ainsi nous obtenons : l'activité des jours calmes, l'activité récurrente, l'activité de choc et l'activité fluctuante.

Cette classification a été validée par Ouattara et al., 2009; Ouattara et Amory Mazaudier, 2009; et utilisée par Zerbo et al., 2011. Des auteurs comme Richardson et al. (2000); Richardson et Cane (2002), dans leur classification de l'activité géomagnétique aboutissent aux mêmes classes.

Ces quatre activités géomagnétiques citées ci-dessus ont les origines solaires suivantes : (1) l'activité de jours calmes est causée par les vents solaires lents qui proviennent de l'héliosheet, (2) l'activité récurrente est produite par les vents solaires rapides provenant des trous coronaux, (3) l'activité fluctuante engendrée par des vents fluctuants résultant de la fluctuation de la lame neutre et (4) l'activité de choc due aux éjections de masse coronale.

Pour la détermination des valeurs de foF2 qui dépendent de l'activité géomagnétique, du cycle de tache et de la saison, nous allons dans la suite indiquer comment procéder à la détermination de ces variables.

2.6.1. Détermination des jours des classes d'activité géomagnétique

2.6.1.1. Jours calmes

Les jours calmes correspondent aux jours d'indices aa < 20 nT avec une vitesse des vents solaires inférieure à 450 km/s.

2.6.1.2. Jours récurrents

Ces jours correspondent aux valeurs Aa supérieures à 40 nT et sont issus de l'activité récurrente. Cette activité est provoquée par les vents solaires rapides issus des trous coronaux solaires et s'étendant sur une ou plusieurs rotations de Bartels. Elle est caractérisée par l'absence de SSC (orage) en phase principale.

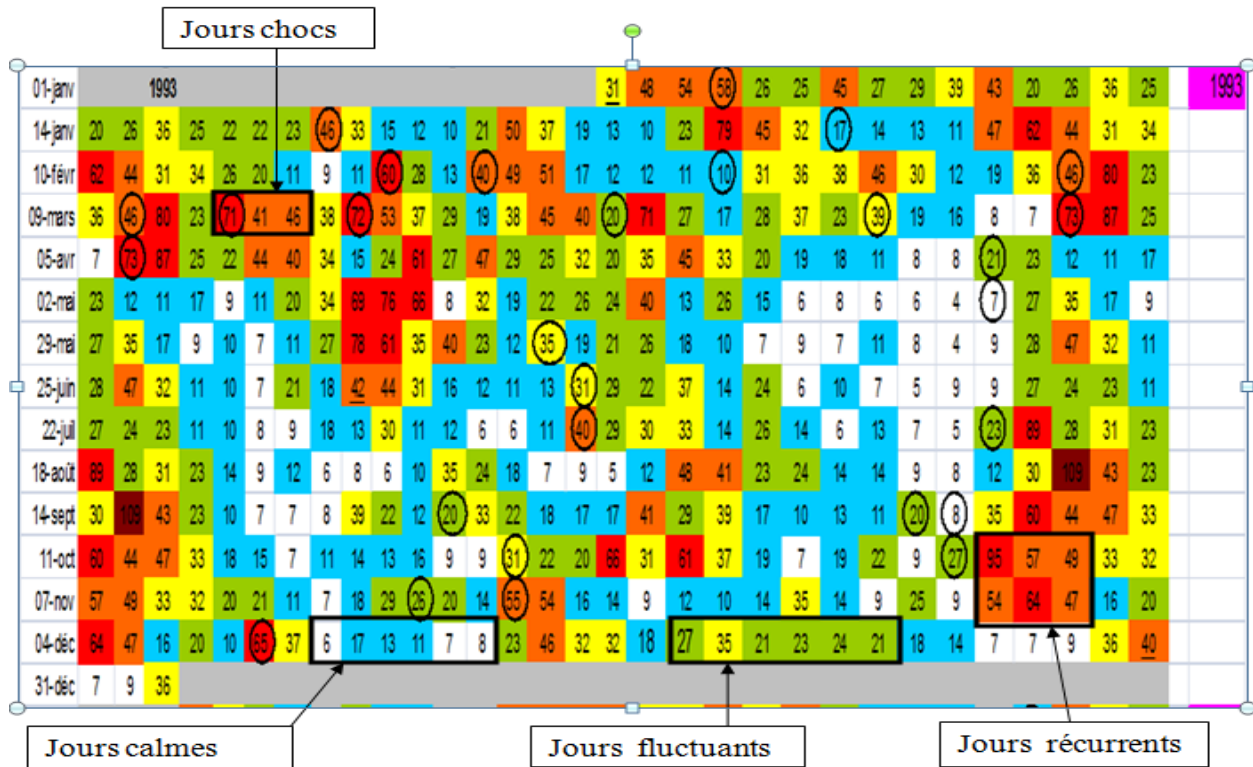


Figure 2. 10 : Diagramme pixel de l'année 1993 indiquant les jours des différentes classes d'activité géomagnétique

2.6.1.3. Jours de chocs

Les jours de chocs sont déterminés à partir des dates des SSCs (Sudden Storm commencement) pour lesquels les valeurs de Aa restent supérieures à 40 nT sur un, deux ou trois jours.

2.6.1.4. Jours fluctuants

Tous les jours avec les valeurs de Aa supérieures à 20 nT et qui ne sont pas dans les trois premières classes appartiennent aux jours fluctuants.

2.6.2. Détermination des phases du cycle

Dans ce travail, nous tenons compte des critères de Ouattara (2011), Zerbo et al. (2011) ; Gnahou et al. (2012) pour décrire les différentes phases à savoir les phases minimum, ascendante, maximum et descendante du cycle de taches solaire (données par l'évolution de R_z).

La phase minimum est obtenue pour $R_z < 20$; la phase ascendante est fournie par $20 \leq R_z \leq 100$. Il importe de noter que R_z du cycle suivant est plus grand que celui du précédent; la phase maximum est donnée par $R_z > 100$ lorsque le maxima est important. Pour des cycles de

maxima faibles, le critère pour la phase maximum est donné par $R_z > 0,8 \cdot R_z \text{ max}$; et en fin la phase descendante est caractérisée par $100 \geq R_z \geq 20$ avec R_z du cycle suivant plus petit que celui du précédent.

A partir de ces différents intervalles de R_z , nous déterminons facilement les années appartenant à chaque phase du cycle.

Les années de différentes phases pour les différents cycles de taches solaires sont résumées au tableau 2.5. Nous avons considéré uniquement les cycles correspondants à notre période d'étude.

Tableau 2. 5 : Années de différentes phases des cycles solaires de notre étude (Ouattara et Amory, 2012)

Phases du cycle solaire	Intervalles R_z	Années de chaque phase du cycle solaire	Cycles solaires
Minimum	$R_z < 20$	1964	20
Ascendante	$20 \leq R_z \leq 100$	1966-1967	
Maximum	$R_z > 100$	1968-1970	
Descendante	$100 \geq R_z \geq 20$	1971-1975	
Minimum	$R_z < 20$	1976	21
Ascendante	$20 \leq R_z \leq 100$	1977-1978	
Maximum	$R_z > 100$	1979-1982	
Descendante	$100 \geq R_z \geq 20$	1983-1985	
Minimum	$R_z < 20$	1986	22
Ascendante	$20 \leq R_z \leq 100$	1987-1988	
Maximum	$R_z > 100$	1989-1991	
Descendante	$100 \geq R_z \geq 20$	1992-1995	
Minimum	$R_z < 20$	1996	23

2.6.3. Détermination des saisons

Dans cette partie, nous considérons le découpage des mois fait par Ouattara et Amory-Mazaudier (2012), Gnahou et Ouattara (2012) pour déterminer les saisons. Ainsi nous

obtenons les saisons suivantes : l'hiver (Décembre, Janvier et Février) ; le printemps (Mars, Avril, Mai) ; l'été (Juin, Juillet et Août) et l'automne (Septembre, Octobre et Novembre).

2.6.4. Evaluation des valeurs de foF2 pour la période d'étude

Les méthodes de Ouattara et Amory Mazaudier (2012) ont été utilisées pour la détermination des valeurs moyennes horaires de foF2. L'évaluation de l'impact de différents facteurs de la variabilité sur la fréquence critique est faite comme suit :

Evaluation de l'impact des activités géomagnétiques

Les valeurs horaires de foF2 pour une période donnée sont déterminées en utilisant l'équation ci-dessous :

$$foF2_{\text{geomagnetique}}^{\text{heure}} = \frac{\sum_{i=1}^{Nc} foF2_{\text{cycle}}^{\text{Heure}}}{Nc} \quad (2.9)$$

où $foF2_{\text{cycle}}^{\text{Heure}}$ est la valeur horaire moyenne de foF2 pour la phase de cycle solaire considéré et Nc est le nombre de phase de cycle solaire considéré dans la période d'analyse concernée.

Dans le tableau 2.5, on peut voir le nombre de phases pour notre période d'étude.

D'après l'équation (2.9), nous déterminons les valeurs horaires moyennes pour chaque type de classes d'activité géomagnétique en considérant le nombre total des jours des années enregistrées. Les jours de différentes classes d'activité sont obtenus en utilisant le diagramme pixel.

Evaluation de l'impact de cycle solaire

Pour l'évaluation de l'impact de cycle solaire, la valeur horaire moyenne de foF2 de la phase d'un cycle solaire ($foF2_{\text{cycle}}^{\text{Heure}}$) est calculée en utilisant l'équation (2.10) :

$$foF2_{\text{cycle}}^{\text{Heure}} = \frac{\sum_{j=1}^{Ny} foF2_{\text{Année}}^{\text{Heure}}}{Ny} \quad (2.10)$$

où $foF2_{\text{Année}}^{\text{Heure}}$ correspond à la valeur horaire moyenne de foF2 de l'année considérée et Ny le nombre d'années enregistré dans la phase du cycle solaire concerné.

Le nombre d'année par phase de cycle peut être obtenu en comptant le nombre d'année dans chaque phase du cycle voir tableau 2.5.

Pour la détermination de la valeur horaire moyenne d'une année ($foF2_{Année}^{Heure}$) on utilise l'équation (2.11) :

$$foF2_{Année}^{Heure} = \frac{\sum_{k=1}^{Nm} foF2_{Mois}^{Heure}}{Nm} \quad (2.11)$$

Dans cette équation $foF2_{Mois}^{Heure}$ correspond à la valeur horaire moyenne de foF2 de mois et Nm est le nombre de mois disponible impliqué dans l'année considérée.

Evaluation de l'impact de la saison

Dans le cas de l'étude saisonnière, la valeur moyenne horaire par mois de foF2 s'obtient :

$$foF2_{Mois}^{Heure} = \frac{\sum_{l=1}^{Nd} foF2_{Jours}^{Heure}}{Nd} \quad (2.12)$$

$foF2_{Jours}^{Heure}$ est la valeur journalière d'une classe d'activité géomagnétique et Nd représente le nombre de jours de la classe géomagnétique enregistré dans le mois considéré.

2.6.5. Estimation de l'effet des perturbations

Les barres d'erreur traduisant l'écart type entre les deux types de valeurs sont généralement portées sur les profils des jours calmes et permettent d'apprécier les effets des activités perturbées (récurrente, choc et fluctuante).

$$\sigma = \sqrt{V} \quad \text{avec } V = \frac{\sum_{i=1}^N (foF2_i - \overline{foF2})^2}{N} \quad (\text{avec } V \text{ la variance}) \quad (2.13)$$

Dans cette équation $\overline{foF2}$ est la valeur moyenne des différentes valeurs de foF2 et N représente le nombre de valeurs de foF2, et σ représente l'écart type.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les différents indices géomagnétiques et solaires ont été largement exposés et une description du diagramme pixel a été faite.

Les différents types de sondage ionosphérique ainsi que les paramètres ionosphériques plus particulièrement la fréquence critique de la couche F2 ont été présentés.

Les procédures de la détermination des jours des classes d'activité géomagnétique, des phases du cycle solaire, des saisons ont été clairement expliquées.

Les méthodes permettant d'étudier l'évaluation de l'impact de différents facteurs de la variabilité sur la fréquence critique foF2 occupent une place importante dans cette partie.

Les barres d'erreurs permettant de connaître l'estimation de l'effet des perturbations ont été également abordées.

Le chapitre 3 sera consacré à l'étude statistique de la variation diurne de la fréquence critique foF2 de la station de Dakar obtenue à partir des données de l'ENST, couvrant la période de 1971-1996.

CHAPITRE 3. : ETUDE STATISTIQUE DE LA VARIATION DIURNE DE LA FREQUENCE CRITIQUE foF2 A LA STATION DE DAKAR DE 1971-1996

3.1. Introduction

Depuis le succès de Marconi en 1901, suivi du premier sondage d'ionosonde par Breit et Tuve en 1925, les études sur la haute atmosphère (surtout sur l'ionosphère équatoriale) ont été intensifiées à travers le monde et plus particulièrement en Afrique durant les deux dernières décennies.

On note aujourd'hui plusieurs résultats de recherches dans les différents secteurs du globe. Nous pouvons citer entre autres les travaux de :

- Huang et Cheng (1996) ; Le Huy et al. (2007) ; Acharya et al. (2010); Pham Thi Thu et al. (2011), Zang et al. (2011) ; Chuo, Y.J et al. (2008) ; Sethi et al. (2008) dans le secteur asiatique;
- Rishbeth and Mendillo (2001); Pancheva et al. (2002); Batista et al. (2004); Batista and Abdu (2004); Lee et al. (2008); Yizengaw et al. (2014) dans le secteur américain;
- Kouris et al. (1994); Bremer (1998); Kouris (1998); Fotiadis et al. (2004); Özgüç et al. (2008); Bremer (2008); Ataç et al. (2009) pour le secteur européen ;
- Adeniyi and Adimula (1995); Sambou et al. (1998) ; Bilitza et al. (2004); Obrou et al. (2005); Ouattara et al. (2009); Obrou et al. (2009); Ouattara and Zerbo (2011); Ouattara and Amory Mazaudier (2012); Thiam et al. (2012); Gnabahou and Ouattara (2012); Ouattara (2013); Gnabahou et al. (2013) pour le secteur africain.

Les objectifs recherchés par ces auteurs scientifiques étaient clairs et sont entre autres :

- 1- d'analyser la variabilité ionosphérique lors de différentes phases de cycle solaire et au cours de différentes saisons (Kouris et al.,1994; Huang and Cheng, 1996; Sambou et al.,1998 ; Bilitza, 2004; Özgüç et al.,2008; Chuo et al.,2008 ; Ouattara et al.,2012; Thiam et al.,2012; et Gnabahou and Ouattara, 2012).
- 2- d'étudier les paramètres ionosphériques (Adeniyi and Adimula, 1995; Souza et al.,1996; Zou et al.,2000; Batista et al.,2004; Bilitza et al.,2004; Fotiadis et al.,2004; Batista and Abdu, 2004; Ouattara et al.,2012.

3- d'étudier l'effet des orages magnétiques sur l'ionosphère (Jones,1971; Jones and Risbeth, 1971; Lal,1992; Arauje-Pradere,1997; Lal, 1998; Obrou et al., 2005; Le Huy et al.,2007; Zhang et al., 2011; et Ouattara and Fleury, 2011).

Nous commencerons ce chapitre en rappelant les différents profils de foF2 obtenus dans la région équatoriale de l'Afrique. Ensuite nous présenterons et analyserons l'étude saisonnière de la variabilité de foF2 en utilisant les moyennes statistiques. Cette étude se fera en fonctions des quatre phases du cycle solaire à savoir (minimum, ascendante, maximum et descendante).

Nous terminerons cette partie par l'étude de l'impact de l'activité géomagnétique sur la variabilité de foF2.

3.2. Etude saisonnière de la variabilité de foF2

Après la première étude statistique de la variation diurne de foF2 de la station de l'Anomalie d'ionisation Equatoriale (EIA) de Ouagadougou (lat: 12,4° N; long: 358,5 ° E; dip: 5,9°) du secteur de l'Afrique réalisée par Ouattara et Amory Mazaudier (2012), la présente étude constitue la deuxième qui se focalise sur l'étude statistique de ce paramètre, mais au niveau de la station de Dakar située entre la crête et le creux d'EIA du secteur des régions africaines. Il importe de rappeler que la station de Dakar a fonctionné de Janvier 1950 jusqu'à Décembre 1996 soit sur quatre cycle solaires (19, 20, 21, 22). Mais, les données pour la présente étude ne couvrent que les cycles solaires (20, 21 et 22).

3.2.1. Profils de variabilité journalière de foF2

Fayot et Vila (1979) ont classé les profils de foF2 dans la région équatoriale de l'Afrique. Ces deux auteurs distinguent cinq types de profils de foF2: (1) profil « noon bite out » caractérisé par un double pic matin et soir avec un creux autour de 12h00; (2) le profil « pic du matin »; (3) le profil « inverse »; (4) le profil « plateau » et (5) le profil « dôme ».

Ces différents profils caractérisent la présence ou non de l'électrojet ou de contre électrojet (Fayot and Vila, 1979). Ainsi, le profil de type « noon bite out » montre la présence d'un fort électrojet, le profil « pic du matin » caractérise la présence d'un électrojet moyen; le profil « inverse » témoigne la présence d'un fort contre électrojet ; et enfin les profils de type « plateau » et « dôme » montrent totalement l'absence de ce courant.

Se basant sur le fait que les variations du champ magnétique terrestre sont les signatures des courants électriques dans la couche E, [Dunford (1967) ; Vassal (1982a) ; Vassal (1982b)]. Ces auteurs ont estimé qu'il existe un lien entre les variabilités de foF2 et la signature du champ géomagnétique terrestre. Acharya (2010), et Acharya (2011) ont pu par simulation montrer qu'un tel lien existe.

L'analyse des profils de foF2 se fera à la lumière de ces 5 profils de Fayot et Vila (1979).

La figure 3.1 donne les différents types de profils de la variation de foF2 en région équatoriale.

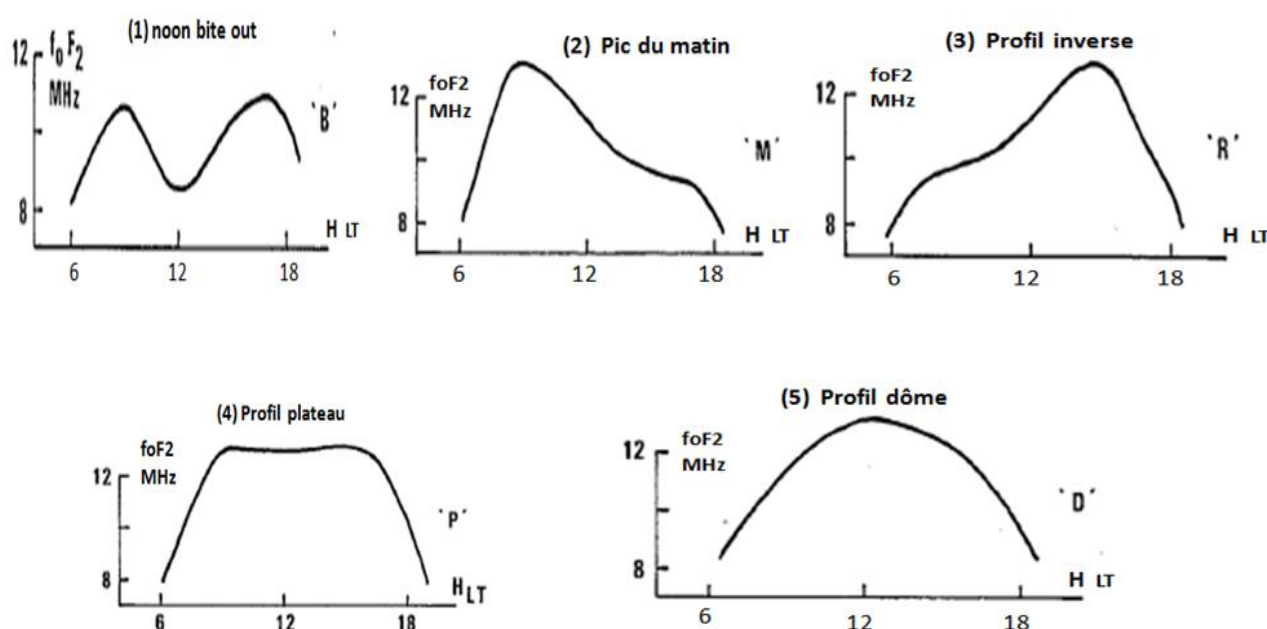


Figure 3. 1 : Différents types de profil de la variation de foF2 en région équatoriale (Vassal, 1982)

3.2.2. Présentation et analyse des résultats

Dans cette section, nous allons présenter et analyser les profils saisonniers de foF2 à la station de Dakar (lat : 12,4° N; long : 342,6°E ; dip : +5,53). Cette étude se fera pour une phase donnée et pour une activité géomagnétique donnée.

3.2.2.1. Variabilité en phase minimum

La figure 3.2 montre la variation diurne de foF2 pendant la phase minimum.

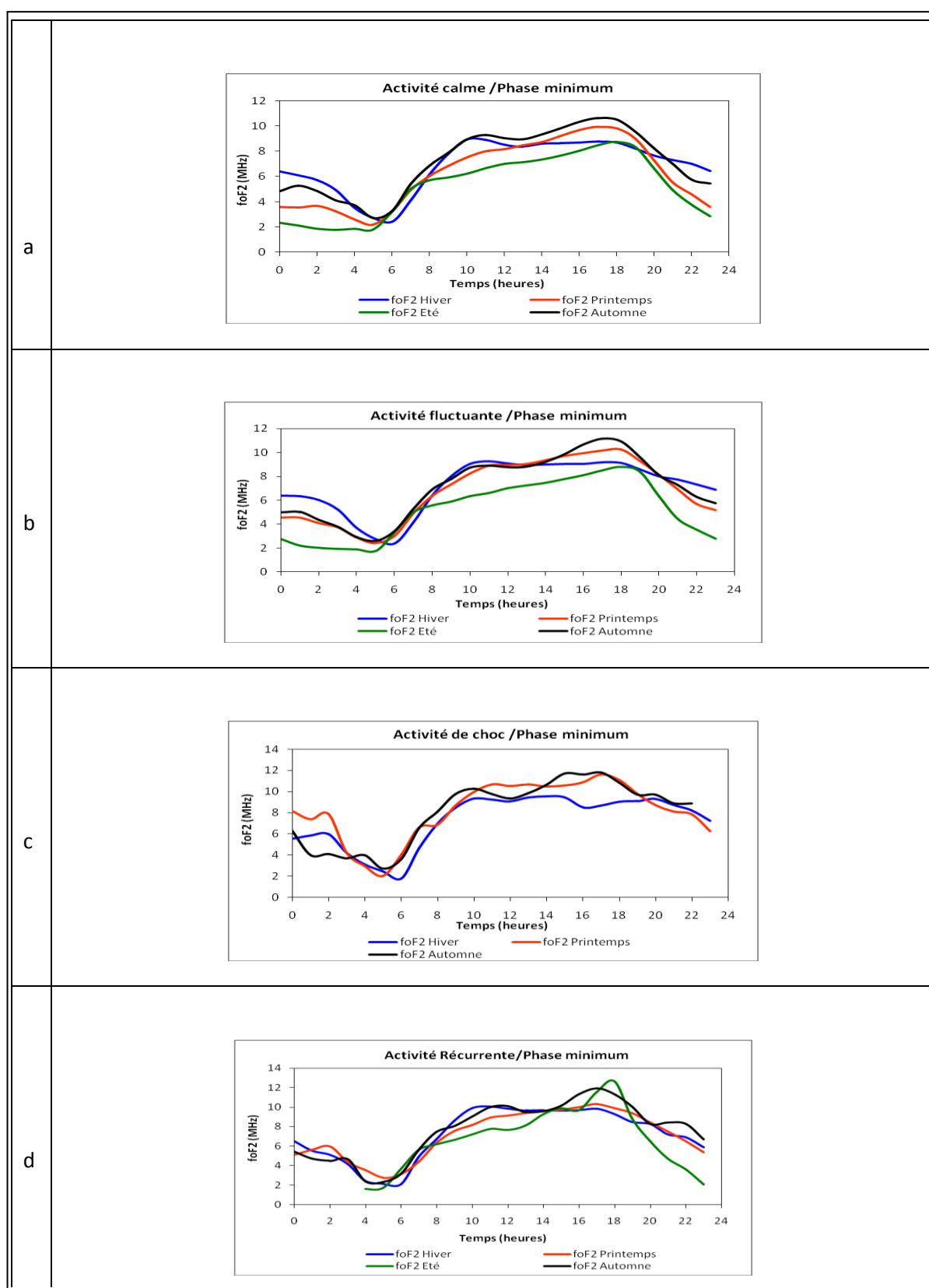


Figure 3. 2 : Profils diurnes de foF2 en phase minimum, en bleu (l'hiver), en vert (l'été), en rouge (le printemps), en noir (l'automne) ; en période calme (panneau a), fluctuante (panneau b), choc (panneau c) et récurrente (panneau d)

Pour la période calme (figure 3.2.a), le premier pic se localise à 10h00 et le second à 18h00.

Le plus grand pic du matin et d'après midi se produisent en automne avec respectivement 9,29 MHz et 10,64 MHz.

Les valeurs de foF2 de l'hiver sont supérieures à celles de l'été, excepté le matin (05h00-08h00) et le soir (18h-19h00). Ce type d'anomalie a déjà été observé par Arauje-Pradere (1997), Zou et al. (2000) et Rishbeth et al. (2000) et constitue l'anomalie d'hiver (Rishbeth et Garriott, 1969).

Plus récemment cette anomalie a été observée par Ouattara et Amory-Mazaudier (2009), lors de leur étude sur la climatologie des régions équatoriales ouest africaines à la station d'ionosonde de Ouagadougou.

Sur cette figure, on note la présence d'une asymétrie équinoxiale et l'absence de pic de nuit. Divers profils sont observés lors de la variation diurne de foF2. Le graphe d'automne présente un profil de type noon bite out, pendant que celui de l'hiver exhibe le profil de type pic du matin. Le printemps et l'été produisent le profil de pic d'après midi.

Sur un profil diurne de foF2, la présence de creux autour de midi (profil noon bite out) exprime la signature de la dérive verticale $E \times B$ (Fairley, 1986 ; Rishbeth, 1971 ; Fejer, 1979 ; et Fejer, 1981). On peut retenir donc que pendant la phase minimum, en période calme, et lors de l'automne les profils de foF2 expriment la signature de la dérive verticale.

En prenant compte les relations entre les différents types de profils classés par (Fayot and Vila, 1979) avec la présence ou non de l'électrojet ou de contre électrojet, on peut affirmer qu'en période calme et en phase minimum, il ya un fort électrojet en automne, un électrojet moyen en hiver, et un fort contre électrojet pendant le printemps et l'été.

Sur la figure 3.2.b, nous observons presque la même variation diurne de foF2 que la période calme (panneau a). La principale différence entre les deux périodes est la présence d'un pic de nuit durant l'automne en période fluctuante.

Le plus grand pic de matin a pour valeur 9,27 MHz pour le graphe d'hiver ; et 11,14 MHz à l'après midi pour le graphe d'automne. Ce dernier laisse percevoir un pic de nuit à 21h00 avec 7,29 MHz comme fréquence. L'asymétrie équinoxiale existe toujours durant cette période. En fait les valeurs de foF2 d'automne sont supérieures à celles du printemps.

Pendant la période fluctuante, nous observons un fort contre électrojet au printemps et en été et un fort électrojet en automne suivi d'un électrojet moyen en hiver.

Le panneau c de la figure 3.2 exhibe clairement l'absence de l'activité de choc pendant l'été. Un double pic est observé en automne à 10h00 et 17h00 avec respectivement 10,25 MHz, 11,8 MHz comme valeurs. On note aussi la présence d'asymétrie équinoxiale. Toutes les courbes des saisons présentent un pic de nuit. Les graphes d'hiver et d'automne montrent que ce pic est à 20h00 avec respectivement 9,3 MHz et 9,7 MHz comme valeurs et qu'au printemps, il se produit à 22h00 (7,87 MHz). Au cours de cette phase, on note la présence d'un fort contre électrojet au printemps, un fort électrojet en automne. En hiver, on observe un profil plateau de 10h00-15h00 suivi d'un creux à 16h00.

La figure 3.2.d montre toujours l'asymétrie équinoxiale avec un pic d'automne plus grand que celui de printemps.

Le pic de matin est observé à (1) 10h00 avec une valeur de 9,89 MHz pendant l'hiver et (2) à 12h00 avec 10,10 MHz comme valeur pour l'automne. Le graphe d'été produit le plus grand pic d'après midi avec une valeur de 12,63 MHz. Les graphes d'automne et d'hiver montrent un pic de nuit respectivement à 21h00 avec une valeur de 8,43 MHz, et 20h00 avec 8,25 MHz comme valeur du pic.

Lors de l'activité récurrente, un électrojet moyen est observé en hiver, en automne on observe la signature de la dérive verticale qui témoigne de la présence d'un fort électrojet, cependant en été et au printemps on note la présence d'un fort contre électrojet.

En résumé pendant la phase minimum, et seulement en automne les courbes de la variation diurne de foF2 montrent un profil de type noon out bite avec une pré dominance pic d'après midi.

Les graphes d'été et du printemps exhibent un profil de pic d'après midi durant les différentes périodes. Cependant à l'hiver on a un profil de pic de matin exceptée pour la période de choc où est observé un profil plateau de 10h00-15h00 suivi d'un creux à 16h00.

Le pic de nuit existe durant cette phase et est observé lors des périodes perturbées (panneaux b, c, d) et en automne.

En dehors de la période récurrente, le graphe d'automne montre toujours le plus grand pic d'après midi.

Il ressort de cette analyse que le maximum d'ionisation intervient à 17h00.

Il est bien connu que le pic de nuit sur les graphes de la variation diurne de foF2 présente la signature de renversement du champ électrique en région équatoriale tel que suggéré par :

Fairley, 1986 ; Rishbeth, 1971 ; Fejer, 1979; et Fejer, 1981. En effet, pendant la journée et en région équatoriale, dans les couches E et F le champ électrique orienté vers l'Est s'inverse durant la nuit et s'oriente vers l'Ouest (Fejer, 1981).

3.2.2 Variabilité en phase ascendante

Les figures 3.3, 3.4, 3.5 sont similaires à la figure 3.2 mais concernent respectivement la phase ascendante, la phase maximum et la phase descendante.

Dans toutes ces figures, nous avons au panneau a la période calme, au panneau b la période fluctuante, au panneau c la période de choc et au panneau d la période récurrente.

Dans le panneau a de la figure 3.3 (phase ascendante, période calme), le plus grand pic du matin et de l'après midi est observé en automne respectivement à 10h00 avec une valeur de 11,53 MHz et à 17h00 avec 12,47 MHz comme fréquence.

Il apparait également l'asymétrie équinoxiale, c'est-à-dire non seulement une différence entre les valeurs des pics du printemps et celles d'automne mais aussi une différence morphologique des profils.

Le profil de pic de matin est observé en hiver, celui de noon bite out se produit en automne, cependant, le profil de type inverse ou pic d'après midi qui est lié à l'intense contre électrojet a une dépendance saisonnière.

Le pic de nuit est observé sur le graphe d'hiver à 22h00 avec une valeur de 7,42 MHz.

Au cours de la journée, les graphes du printemps et de l'été présentent une variabilité journalière similaire de foF2. Il en est de même pour les graphes d'automne et d'hiver de 00h00 jusqu'à la mi-journée.

En automne, il y a une forte ionisation alors qu'en été, on enregistre une ionisation faible surtout la nuit et le matin après 08h00.

La figure 3.3.b montre une variation diurne similaire de foF2 que celle de la figure 3.3.a. La principale différence est la présence d'un pic de nuit observé sur le graphe d'automne à 22h00 avec une valeur de 9,52 MHz, précédé d'un creux à 21h00.

En automne, on observe toujours le profil de type « noon bite out ». Le premier pic se localise à 10h00 et le second à 16h00 avec un creux autour de 12h00; le profil d'hiver est de type plateau. Cependant, les profils du printemps et d'été sont de type inverse.

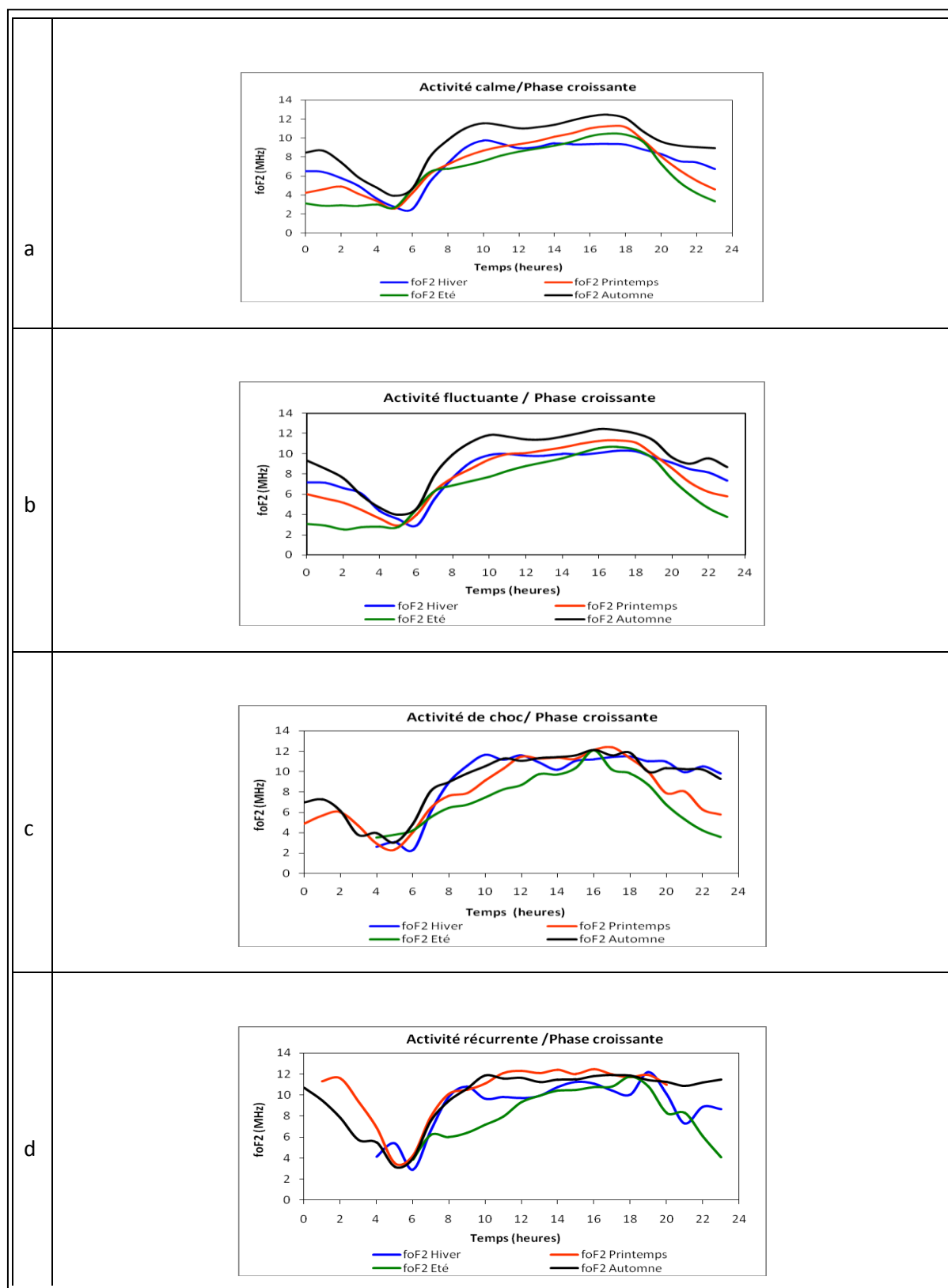


Figure 3. 3 : Profils diurnes de foF2 en phase ascendante, en bleu (l'hiver), en vert (l'été), en rouge (le printemps), en noir (l'automne); en période calme (panneau a), fluctuante (panneau b), choc (panneau c) et récurrente (panneau d)

Les valeurs de foF2 d'automne sont supérieures à celles de printemps ce qui montre la présence d'une asymétrie équinoxiale. On observe toujours une ionisation importante en automne et une faible en été.

Au panneau c de la figure 3.3, le plus grand pic du matin est observé sur le graphe d'hiver à 10h00 avec une valeur de 11,65 MHz, alors que le plus grand pic de l'après midi s'affiche sur le graphe du printemps à 17h00 avec 12,38 MHz comme valeur.

La courbe d'automne montre un profil de type plateau, celle d'hiver produit un noon bite out ; cependant, les courbes des autres saisons semblent décrire le profil de pic d'après midi.

Les valeurs de foF2 d'hiver sont supérieures à celles de l'été ce qui montre la présence de l'anomalie d'hiver.

A l'exception de l'été, les graphes de différentes saisons présentent un pic de nuit entre 21h00 et 22h00 avec la plus grande valeur observée en hiver (10,5 MHz). Le creux de nuit se situe autour de 20h00.

En fin, au panneau d de la figure 3.3 qui correspond à la période récurrente, le plus grand pic du matin est localisé sur le graphe d'automne à 10h00 avec une valeur de 11,84 MHz. Les graphes d'hiver et d'été montrent un pic de nuit respectivement à 22h00 avec une valeur de 8,9 MHz et à 21h00 avec 8,3 MHz comme valeur. Lors de cette période, les graphes présentent aussi un creux de nuit en hiver et en été entre 20h00 et 21h00.

Les graphes d'automne et du printemps montrent un profil de type plateau, alors qu'en été on observe le profil de type inverse. L'anomalie d'hiver existe durant cette période.

En résumé pendant la phase ascendante, on note l'existence de l'anomalie d'hiver, et la présence de l'asymétrie équinoxiale durant les différentes activités géomagnétiques.

Excepté la période récurrente où la courbe de printemps semble montrer un profil de type plateau, le profil de pic d'après midi est observé à travers les activités géomagnétiques pendant l'été et le printemps. Pendant les jours de chocs et récurrents, on note l'absence d'électrojet en automne, les graphes d'hiver montrent la signature de la dérive verticale, les courbes de ces deux saisons présentent de profils divers à travers les différentes activités géomagnétiques au cours de cette phase.

Le pic de nuit est observé sur les graphes de l'hiver durant les activités géomagnétiques, excepté la période fluctuante où ce pic est localisé sur le graphe d'automne.

Nous remarquons pendant la phase croissante qu'il ya une forte ionisation en automne et une faible en été. Ceci est une conséquence de la radiation solaire.

3.2.2.3. Variabilité en phase maximum

La figure 3.4 donne la variation diurne de foF2 au maximum solaire.

La figure 3.4.a qui concerne la période calme montre la présence d'une asymétrie équinoxiale, car les valeurs de foF2 d'automne sont supérieures à celles de printemps.

Puisque les valeurs de foF2 d'hiver sont supérieures à celles d'été, les données montrent aussi l'anomalie d'hiver.

Le graphe d'automne montre un profil de type noon bite out, où le pic de matin est localisé à 10h00 avec une valeur de 13,99 MHz et celui d'après midi est enregistré à 17h00 (13,66 MHz). En hiver, on observe le profil de pic de matin avec 14,29 MHz comme valeur du pic. Le graphe du printemps montre le profil de type plateau avec une valeur de 13.05 MHz et le graphe d'été montre le profil dôme avec une valeur du pic de 12,16 MHz localisé à 17h00.

Le pic de nuit est observé en automne à 21h00 et en hiver à 22h00 avec respectivement 11,97 MHz et 12,59 MHz comme valeurs.

Après le coucher du soleil, le profil d'automne montre de creux à 20h00 et à 22h00, au moment où celui de printemps exhibait ce creux à 22h00.

Les graphes d'automne et d'hiver présentent une variabilité journalière similaire de foF2. En été, on observe les plus faibles valeurs de foF2.

La figure 3.4.b est dévolue à la période fluctuante au cours de maximum solaire.

Sur cette figure, on note clairement la présence d'une asymétrie équinoxiale, car les valeurs d'automne sont supérieures à celles de printemps. L'anomalie hivernale existe aussi, car les valeurs de foF2 d'hiver restent supérieures à celles d'été. Le double pic se produit également lors de cette période, et est observé sur la courbe d'automne avec une valeur identique de pic (14 MHz) localisée à 10h00 et à 17h00. Le graphe d'hiver présente le profil de type pic de matin où le pic est observé à 10h00 avec une valeur de 14,16 MHz. Le profil du printemps est de type plateau. Le graphe d'été montre le profil de type dôme avec un maximum de foF2 localisé à 17h00 (12,69 MHz) et au cours de cette saison, on remarque les plus faibles valeurs de foF2.

Les profils d'automne et d'hiver sont presque similaires durant toute la journée. Ces deux profils présentent un pic de nuit à la même période (21h00) avec des valeurs de foF2 différentes, 11,99 MHz pour l'hiver et 12,35 MHz pour l'automne.

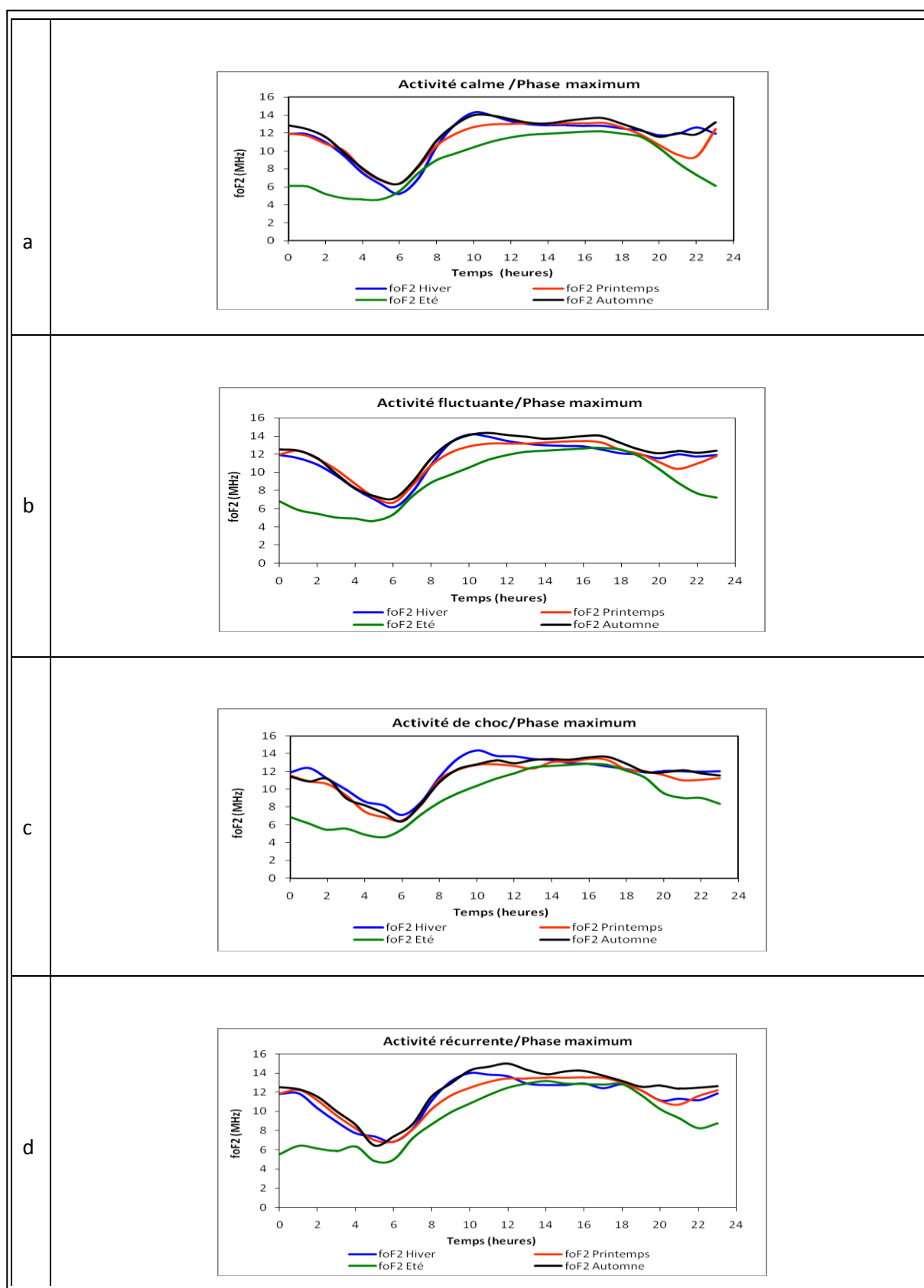


Figure 3. 4 : Profils diurnes de foF2 en phase maximum, en bleu (l'hiver), en vert (l'été), en rouge (le printemps), en noir (l'automne) en période calme (panneau a), fluctuante (panneau b), choc (panneau c) et récurrente (panneau d).

Le graphe du printemps montre un creux à 21h00 au moment où celui d'automne présentait à 20h00.

La figure 3.4.c concerne les graphes de l'activité de choc. Sur cette figure, on note l'existence de l'anomalie d'hiver. L'asymétrie équinoxiale montrée ici est caractérisée par des valeurs d'automne supérieures à celles du printemps. Le profil d'hiver montre le plus grand pic du matin, et ce pic est localisé à 10h00 avec une valeur de 14,36 MHz. Les courbes du printemps et d'automne semblent montrer le profil de type plateau.

Le profil dôme est observé en été avec un maximum de foF2 localisé à 16h00. Ce profil présente un pic de nuit à 22h00 (9 MHz). L'ionisation journalière reste toujours faible en été. Le pic de nuit est aussi observé sur le graphe d'automne à 21h00. Les profils d'automne et du printemps montrent un creux respectivement à 19h00 et à 21h00.

Le panneau d de la figure 3.4 est dévolu à l'activité récurrente. Comme lors des périodes précédentes, l'anomalie d'hiver existe.

Les valeurs de foF2 d'automne sont supérieures à celles des autres saisons.

En hiver, on observe un profil de type pic de matin avec une valeur de 14 MHz localisé à 10h00 et en automne on constate la présence d'un profil de type noon bite out. Les graphes d'automne et d'hiver présentent un pic de nuit respectivement à 20h00 et à 21h00 avec 12,69 MHz et 11,34 MHz comme valeurs du pic.

Au cours de cette période, le creux de nuit est observé en période d'équinoxe (l'automne et le printemps).

Le graphe du printemps continue de montrer le profil de type plateau, cependant le profil dôme se maintient en été.

En résumé, au maximum solaire, à travers les différentes activités géomagnétiques, nous observons le profil dôme en été ; celui du type plateau au printemps ; les graphes d'hiver exhibent le profil de type pic de matin ; et en automne, on observe un profil noon bite out, excepté lors de la période de choc.

Les graphes d'hiver et d'automne présentent un pic de nuit durant toutes les activités géomagnétiques. Ces observations diffèrent de celles de Fejer et al. (1979), qui notent qu'au maximum solaire l'augmentation de pré renversement s'observe toute l'année.

Le pic de nuit qui résulte des effets de la dérive de champ électrique de direction Est se perçoit ici. En automne, la manifestation de ce champ est l'une des caractéristiques de l'impact de différentes activités (surtout de fluctuante) durant cette phase.

Les graphes de différentes saisons montrent un pic de nuit lors de la période de choc. Excepté l'été, tous les graphes sont presque confondus pendant les périodes de chocs et récurrente. Les profils du printemps et d'automne montrent un creux de nuit durant les activités géomagnétiques, ce qui montre une augmentation par pré renversement d'ionisation lors de ces deux saisons.

En été, on enregistre la plus faible ionisation durant cette phase.

L'observation du pic sur nos profils après le coucher du soleil pourrait être expliquée par :

Une décroissance de la conductivité en région E occasionne une augmentation de la vitesse de dérive ascendante en phase de pré renversement (Farley et al., 1986) qui peut participer à la formation du pic observé sur le profil de la hauteur maximum (hmF2) après le coucher de soleil. Et ceci pourrait avoir comme conséquence une décroissance que l'on observe sur le profil de densité maximum (NmF2) (Lee et al., 2008).

3.2.2.4. Variabilité en phase décroissante

La figure 3.5 concerne la variabilité de foF2 lors de la phase décroissante à travers les différentes saisons.

Le panneau a de cette figure qui concerne la période calme montre une variation similaire des courbes entre l'automne et le printemps à partir de 03h00 jusqu'à 19h00, ce qui montre une absence d'asymétrie équinoxiale. Par contre l'anomalie d'hiver existe durant cette période.

Les profils du printemps et de l'été sont de type pic d'après midi; le graphe d'automne est de type noon bite out.

Une observation sur nos différents graphes permet de noter que, le plus grand pic du matin se trouve sur le graphe d'hiver et se localise à 11h00 avec une valeur de 10,86 MHz.

En été, on remarque une tendance d'ionisation croissante du lever au coucher de soleil (07h00 à 18h00). Au cours de la nuit, on enregistre une forte ionisation en hiver, et une faible en été et ceci de 21h00 à 05h00. Après le coucher de soleil, les graphes de l'été et du printemps ont une évolution presque similaire jusqu'au prochain jour.

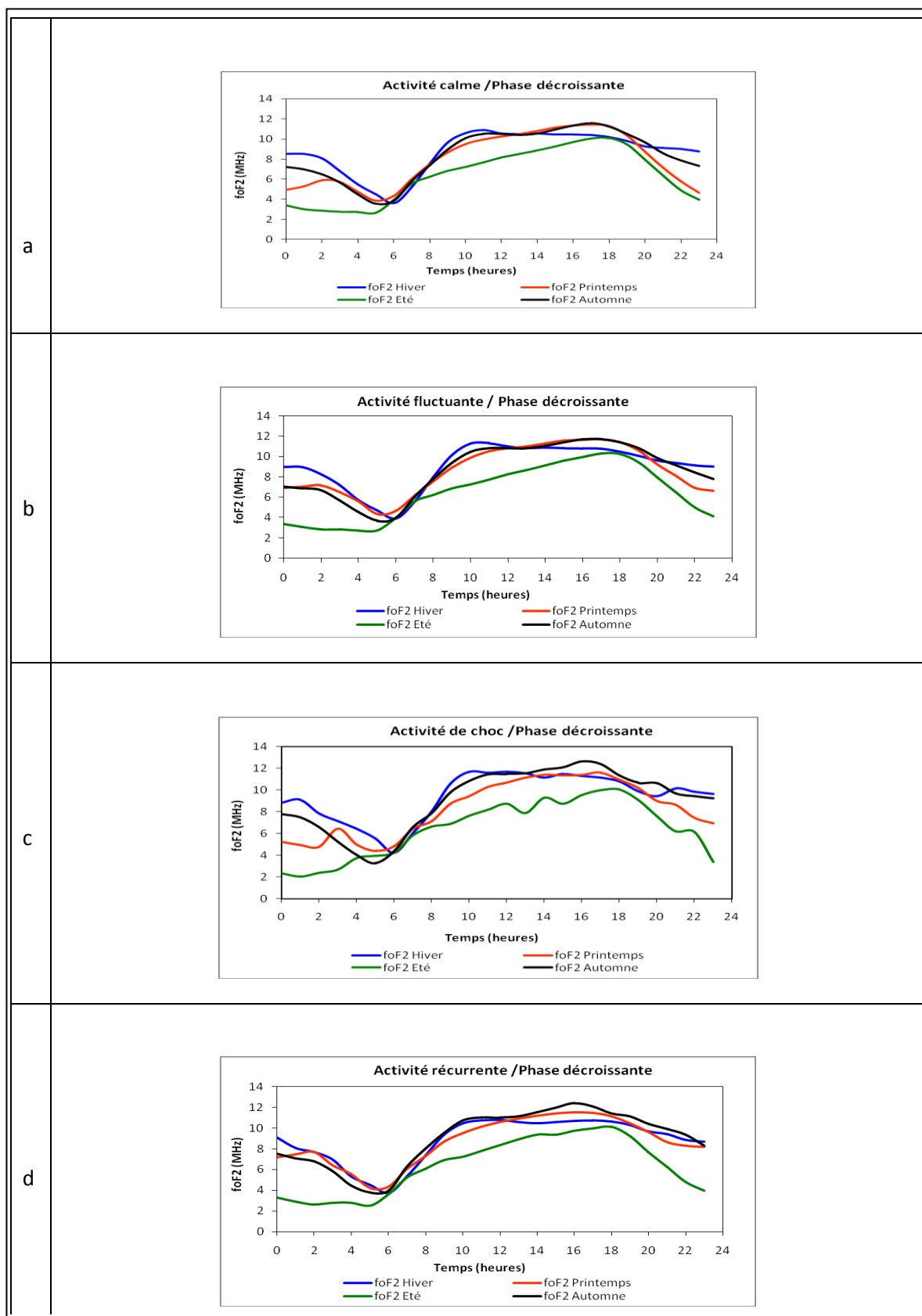


Figure 3.5 : Profils diurnes de foF2 en phase descendante, en bleu (l'hiver), en vert (l'été), en rouge (le printemps), en noir (l'automne) en période calme (panneau a), fluctuante (panneau b), choc (panneau c) et Récurrente (panneau d).

La figure 3.5.b concerne la période fluctuante lors de la phase de déclin. Sur cette figure, on note l'existence de l'anomalie d'hiver et l'absence d'asymétrie équinoxiale. Cependant, il importe de noter que le profil de type dôme est observé au printemps. Le graphe d'hiver montre le pic de matin à 10h00 avec une valeur de 11,28 MHz. Au cours de la nuit, on observe toujours une forte ionisation en hiver et une faible en été.

Les graphes du printemps et d'automne présentent une variabilité journalière similaire de foF2.

Au cours des périodes calme et fluctuante, en phase décroissante, on peut noter que le creux et le pic de nuit sont inexistantes. Cela témoigne l'absence d'une phase de pré renversement du champ électrique lors de ces deux périodes.

La figure 3.5.c concerne l'activité de choc lors de la phase décroissante. En hiver, on observe un profil de type plateau, et le graphe de cette saison permet de localiser le plus grand pic de matin à 10h00 (11,66 MHz). Cependant, le plus grand pic du soir s'affiche sur le graphe d'automne à 16h00 (12,63 MHz). L'anomalie d'hiver et l'asymétrie équinoxiale existent durant cette période. Le profil dôme est observé au printemps. Les profils d'automne et d'été sont de type pic d'après midi. Toutes les courbes présentent un pic de nuit durant cette période. Les plus faibles valeurs de foF2 demeurent toujours en été.

Le panneau d de la figure 3.5 est dévolu à l'activité récurrente. Le plus grand pic du matin et du soir est observé sur le graphe d'automne. Le pic de matin est localisé à 11h00 avec une valeur de 11,02 MHz et celui du soir se situe à 16h00 (12,39 MHz). Les profils d'hiver et d'automne sont de type noon bite out et celui de printemps semble être de type dôme avec la plus grande valeur de foF2 enregistrée à 16h00 (11,53 MHz).

Du lever au coucher du soleil, les graphes du printemps et d'été permettent de noter une tendance croissante d'ionisation. En été, on observe toujours les plus faibles valeurs de foF2.

En résumé, en phase décroissante, les courbes d'été présentent le profil de type pic d'après midi lié à l'intense contre électrojet. Le profil dôme est enregistré au printemps à l'exception des jours calmes. En hiver, on observe un profil de pic de matin dû à un électrojet moyen lors des périodes calme et fluctuante. En dehors des jours de chocs, en automne, on observe la signature de la dérive verticale (profil noon bite out). L'anomalie d'hiver existe durant toutes les périodes d'activité géomagnétique.

Hormis le graphe de l'activité de choc qui présente un pic de nuit précédé d'un creux durant les saisons, les graphes des autres activités géomagnétiques ne présentent pas ce pic.

Lors des périodes calme et fluctuante, les profils du printemps et d'automne montrent une variation de foF2 presque similaire dans l'intervalle de temps 03h00-18h00, excepté autour de 10h00 où le graphe d'automne présente un pic.

L'ionisation est forte en automne avec une tendance croissante à partir de 12h00 jusqu'au coucher du soleil. Cependant, nous observons une inversion de tendance au cours de la nuit. Au cours de la journée et en été, il ya aussi une tendance d'ionisation croissante, mais on y remarque également une inversion de cette tendance durant la nuit. Ceci est une conséquence de la radiation solaire. Il importe de mentionner que les valeurs de foF2 sont faibles en été.

3.2.3. Synthèse

Cette étude morphologique des profils temporels de la fréquence critique de la couche F2 nous a permis d'apprécier l'impact de différentes saisons sur la variabilité de ce paramètre ionosphérique.

Durant les phases du cycle solaire, à travers les différentes activités géomagnétiques et les saisons, l'analyse des profils horaires montre l'existence de l'anomalie d'hiver et de l'asymétrie équinoxiale.

En ce qui concerne l'anomalie d'hiver, Scialom (1974) explique que les valeurs élevées en hiver sont dues à une augmentation de la densité en atome d'oxygène causée par des facteurs dynamiques dans la thermosphère (Rishbeth et Müller-Wodarg, 2006; Ouattara et al., 2009).

Balan et al. (1998) expliquent l'asymétrie observée entre les pics équinoxiaux par l'asymétrie des paramètres ionosphériques qui influence le paramètre foF2 à travers les vents neutres et leur composition. Toutefois l'asymétrie équinoxiale peut avoir plusieurs autres causes (Ouattara et al., 2013): (1) le vent solaire provenant d'une intense activité solaire et (2) les CMEs.

Hormis la période de choc à travers les différentes phases du cycle solaire et celle récurrente lors de la phase ascendante, les graphes d'automne semblent montrer un noon bite out témoignant la présence d'un fort électrojet. Cependant, le profil de type pic d'après midi prouvant la présence d'un fort contre électrojet est observé en été durant les phases du cycle solaire, à l'exception de la phase maximale où les graphes de cette saison montrent un profil dôme qui marque l'absence de ce courant.

Au minimum solaire et en phase croissante, au printemps on note la présence d'un fort contre électrojet à l'exception des jours récurrents de la phase montante. Au cours de cette même saison, lors de la phase décroissante et au maximum solaire on observe l'absence d'électrojet en dehors des jours calmes de la phase de déclin.

Différents types de profil sont observés en hiver : (1) au minimum et au maximum solaire, on observe le profil de type pic de matin qui témoigne la présence d'un électrojet moyen à l'exception des jours de chocs de la phase minimum et (2) lors des phases croissante et décroissante, on constate toujours une domination d'électrojet moyen pendant les jours calmes, mais on note aussi la présence d'un fort électrojet et d'une absence de ce courant durant les jours perturbés.

Il ressort de cette analyse que, le plus grand pic du matin et du soir est observé en automne avec respectivement 14,97 MHz et 14,22 MHz comme valeurs de foF2. Ces pics sont enregistrés lors du maximum solaire et en période récurrente.

Quelle que soit la phase du cycle solaire, en période calme, le graphe de l'automne exprime la signature de la dérive verticale; en hiver on note la présence d'un électrojet moyen, alors qu'au printemps et en été on enregistre la présence d'un fort contre électrojet excepté la phase maximum.

Au cours de différentes phases du cycle solaire, les valeurs de foF2 sont généralement élevées en automne qu'en été. Cette observation montre l'importance de la production journalière d'ionisation par la radiation solaire. Cette production est importante aux équinoxes et diffère d'un mois d'équinoxe à l'autre.

Au minimum solaire, le maximum d'ionisation intervient à 17h00 ; lors des phases croissante et décroissante ce maximum se produit entre 16h00-17h00. Cette situation s'inverse totalement lors de la phase maximum où on remarque le maximum entre 10h00-12h00.

Le pic et le creux de nuit existent durant les différentes phases du cycle solaire. Ainsi, au minimum solaire, le pic de nuit est observé sur le graphe d'automne durant les périodes perturbées ; en phase croissante, les graphes de l'activité de choc présentent ce pic à toute saison; en phase maximum, il est observé en automne et en hiver durant toutes les périodes d'activité géomagnétique et enfin en phase décroissante, sauf la courbe de la période de choc exhibe ce pic, et ceci durant toutes les saisons.

Le creux de nuit, qui témoigne de l'augmentation par pré renversement d'ionisation s'observe sur nos graphes pendant les périodes perturbées lors des phases minimum et ascendante.

Au maximum solaire, on observe ce creux en automne et au printemps durant toutes les périodes d'activité géomagnétique. Lors de la phase décroissante, en dehors des courbes de la période de choc qui présentent ce creux à toute saison, on note son absence lors des autres activités géomagnétiques.

Il importe de mentionner que les graphes de l'activité fluctuante présentent généralement le pic et le creux de nuit en automne durant les différentes phases du cycle solaire.

3.3. Impact de l'activité géomagnétique sur la variabilité de foF2

Après l'étude saisonnière détaillée de la variabilité de foF2, nous passerons à l'étude de l'appréciation des écarts des profils diurnes de foF2 des activités perturbées par rapport à l'activité calme.

Pour une période donnée, au cours d'une même phase du cycle solaire et lors d'une même saison, lorsque les valeurs de foF2 des périodes perturbées sont supérieures à celles des périodes calmes : on parle de l'existence d'orage positif ; au cas contraire, il s'agit de l'orage négatif.

Cette étape se fera en quantifiant l'impact des activités perturbées en tenant compte de différentes phases du cycle solaire et sous différentes saisons.

Les barres d'erreur portées sur les profils des jours calmes permettent d'analyser rapidement les effets des activités perturbées et nous permettent de faire une appréciation de l'amplitude de l'effet d'orage.

3.3.1. Variabilité en phase minimum

La figure 3.6 étudie la variation de foF2 au minimum de phase, la figure 3.7 est dévolue à la phase croissante, la figure 3.8 concerne la phase maximum et en fin la figure 3.9 est consacrée à la phase décroissante.

Le panneau a de la figure 3.6 qui correspond à l'hiver lors de la phase minimum montre que : L'activité de choc occasionne un orage positif de 12h00-15h00 et à partir de 18h00-01h00.

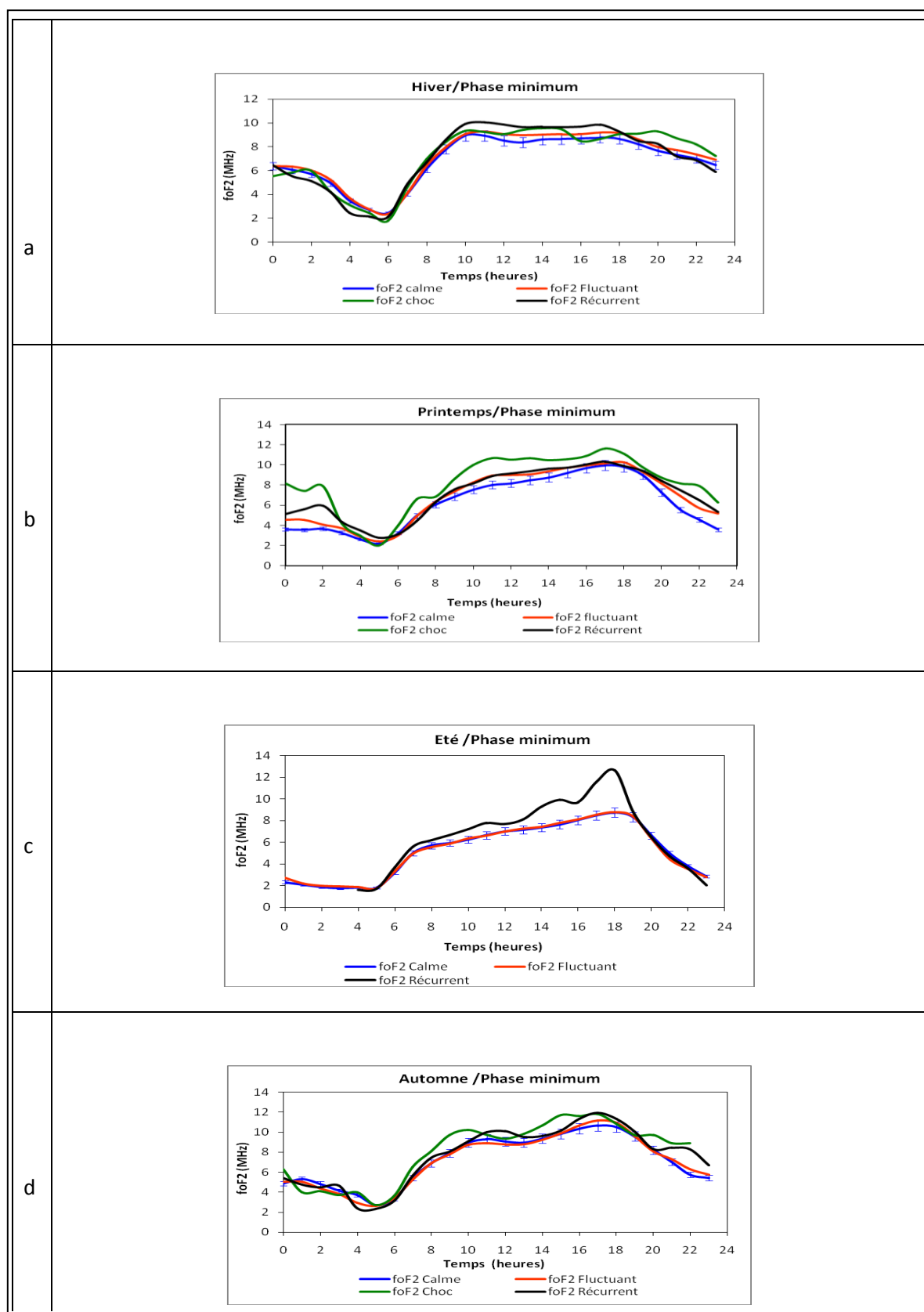


Figure 3. 6 : Profils diurnes de foF2 en phase minimum, en bleu l'activité calme, en rouge l'activité fluctuante, en vert l'activité de choc, en noir l'activité récurrente; l'hiver (panneau a), le printemps (panneau b), l'été (panneau c) et l'automne (panneau d)

Ce type d'orage est aussi montré par l'activité récurrente de 10h00-18h00, suivi d'un orage négatif de 01h00-06h00.

L'activité fluctuante ne produit aucun effet sur l'ionisation.

Nous remarquons qu'entre 07h00-10h00, les activités perturbées n'ont aucun effet sur l'ionisation. Cela témoigne que les effets de la dérive $\vec{E} \times \vec{B}$ ne sont pas affectés par les orages dans cet intervalle de temps.

La figure 3.6.b concerne le printemps en phase minimum. Un orage positif est produit durant toutes les heures par l'activité de choc, excepté de 04h00-06h00.

Au cours de la journée, l'activité récurrente engendre un orage positif de 11h00-14h00; et au cours de la nuit cette activité montre ce type d'orage de 20h00-05h00.

L'activité fluctuante engendre un orage positif dans la journée autour de midi et la nuit de 21h00-02h00.

Le panneau c de la figure 3.6 est consacré à l'été. Durant cette saison, on note l'absence de l'activité de choc. L'activité fluctuante ne présente aucun effet sur l'ionisation.

Cependant l'activité récurrente est responsable d'un orage positif durant toute la journée (du lever au coucher du soleil).

La figure 3.6.d correspond à l'automne à travers les différentes activités géomagnétiques. L'analyse de cette figure montre que :

L'activité de choc provoque un orage positif aux périodes indiquées ci-dessous : peu après le lever de jour jusqu'à l'approche de la mi-journée (07h00-11h00), de 13h00 jusqu'au coucher de soleil, et de 20h00-22h00. L'orage négatif survient tard la nuit autour de 01h00.

Lors de la période récurrente, l'orage positif est observé aux alentours du coucher de soleil, autour de midi, et la nuit de 21h00-23h00. Cette activité occasionne aussi un orage négatif autour de 04h00.

L'activité fluctuante n'a toujours aucune influence sur l'ionisation.

En résumé pendant la phase minimum, l'activité fluctuante provoque un orage positif au printemps.

L'activité de choc produit un orage positif durant toutes les saisons, sauf en été où nous remarquons une absence notoire de cette activité, et l'orage négatif ne se produit seulement en automne autour de 02h00.

L'activité récurrente provoque un orage positif durant toutes les saisons et ceci aux alentours de midi et la nuit après 20h00. Lors de cette période, l'orage négatif survient la nuit après 01h00 pendant l'hiver et l'automne.

Les études antérieures montrent que l'orage négatif est dû au changement de la composition de la thermosphère (Prolss, 1996). Quant à l'orage positif, il existe trois mécanismes qui sont capables de le produire (Fuller-Rowell et al., 1997). Compte tenu de la position équatoriale de la station de Dakar, il semblerait fort probable que nos orages positifs pourraient provenir des vents méridionaux de direction équatoriale.

Il en découle de nos observations que les différents types d'orage agissent différemment sur l'ionosphère. La signature de la dérive verticale est modifiée selon les saisons et suivant les différentes périodes. Cette perturbation peut être due au couplage ionosphère atmosphère neutre (Fuller-Rowell et al., 1997).

3.3.2. Variabilité en phase ascendante

La figure 3.7 représente la variation diurne de foF2 lors de la phase montante à travers les différentes activités géomagnétiques lors des différentes saisons.

La figure 3.7.a qui concerne l'hiver montre que l'activité de choc crée l'orage positif pendant presque toutes les heures; l'activité récurrente provoque ce type d'orage de 08h00-10h00, de 14h00-21h00 et autour de 23h00.

L'activité fluctuante engendre un orage positif durant toutes les heures, excepté de 07h00-11h00.

Le panneau b de la figure 3.7 correspond au printemps. Au cours de cette saison, l'activité de choc engendre un orage positif à partir de 11h00 jusqu'au coucher de soleil et de 21h00-03h00.

L'activité fluctuante provoque l'orage positif de 22h00-02h00.

En dehors des heures autour de lever de jour, l'activité récurrente occasionne un orage positif durant toutes les périodes de la journée.

Les graphes d'été sont représentés au panneau c de la figure 3.7. L'orage positif est observé lors de l'activité récurrente de 12h00-23h00. L'ionisation ne subit aucune influence durant l'activité fluctuante.

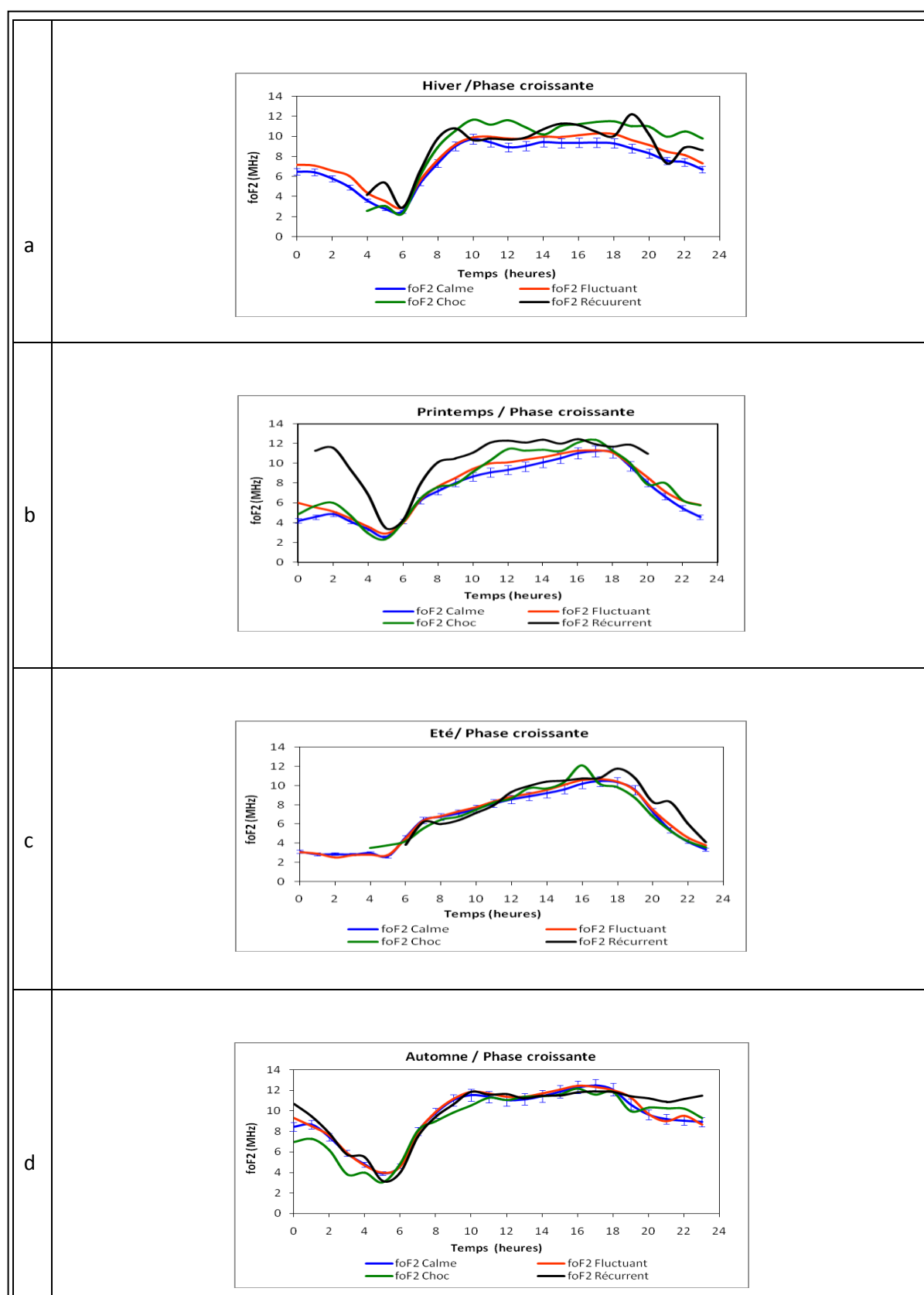


Figure 3. 7 : Profils diurnes de foF2 en phase montante, en bleu l'activité calme, en rouge l'activité fluctuante, en vert l'activité de choc, en noir l'activité récurrente ; l'hiver (panneau a), le printemps (panneau b), l'été (panneau c) et l'automne (panneau d)

La figure 3.7.d est dévolue aux graphes de l'automne pendant la phase montante. Sur cette figure, l'orage positif est observé dans l'intervalle de temps 18h00-01h00 lors de la période récurrente.

L'activité de choc provoque l'orage positif au cours de la nuit de 20h00-23h00 et cette activité occasionne aussi un orage négatif de 00h00-06h00. L'activité fluctuante n'a toujours aucun effet sur l'ionisation.

Il peut être retenu lors de la phase montante que toutes les activités perturbées causent des orages positifs pendant l'hiver et le printemps.

Les activités de choc et récurrente produisent un orage positif durant toutes les saisons.

En été et en automne, l'activité fluctuante n'a aucun effet sur l'ionisation.

Pendant la phase ascendante, sauf l'activité de choc crée un orage négatif en automne.

3.3.3. Variabilité en phase maximum

La figure 3.8 représente la variation diurne de foF2 en phase maximum à travers les différentes saisons en tenant compte de différentes activités géomagnétiques.

Le panneau a qui est dévolu à l'hiver au maximum solaire laisse percevoir un orage positif causé par l'ensemble des activités perturbées de 04h00-07h00.

On peut remarquer pendant cette saison que les activités perturbées présentent une variabilité journalière similaire de foF2.

Les graphes du printemps sont représentés à la figure 3.8.b. Au cours de cette saison, toutes les courbes des activités géomagnétiques présentent le profil de type plateau. Un orage positif causé par l'ensemble des activités perturbées est observé au cours de la nuit (20h00-22h00).

Il peut être observé sur la figure 3.8.c que l'activité de choc occasionne un orage positif autour de 16h00 et à 22h00. Il en est de même pour l'activité récurrente aux périodes suivantes : 02h00-04h00, 22h00-23h00; et l'activité fluctuante autour de 23h00.

En automne (figure 3.8.d), l'activité fluctuante n'a aucun effet sur l'ionisation. Alors que l'activité récurrente provoque un orage positif entre 12h00-14h00 et autour de 20h00. Les effets de l'activité de choc au cours de cette saison ne semblent pas clairs.

Lors de cette phase, toutes les activités perturbées créent un orage positif au cours de différentes saisons à l'exception de l'automne où les activités de choc et fluctuante ne

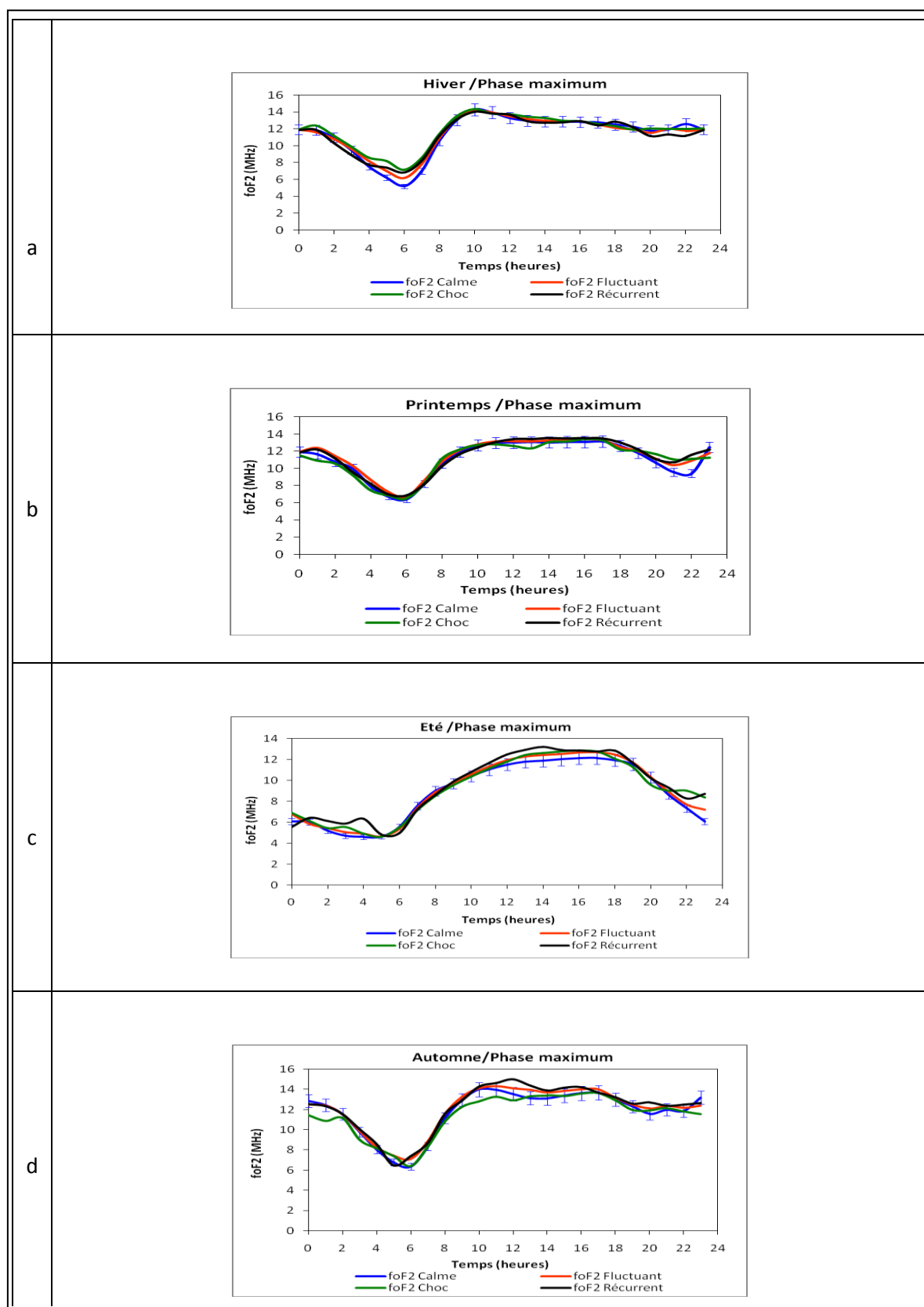


Figure 3. 8 : Profils diurnes de foF2 en phase maximum, en bleu l'activité calme, en rouge l'activité fluctuante, en vert l'activité de choc, en noir l'activité récurrente; l'hiver (panneau a), printemps (panneau b), l'été (panneau c) et l'automne (panneau d)

provoquent pas ce type d'orage. Il importe de souligner que ce phénomène d'orage positif s'observe dans beaucoup de cas la nuit.

L'orage positif observé pendant l'hiver a été mentionné par Rishbeth (1989) et Burms et al. (1991 ; 1995), Ouattara et al. (2012).

3.3.4. Variabilité en phase décroissante

La phase décroissante est représentée à la figure 3.9.

En hiver (figure 3.9.a), nos observations donnent le résultat suivant : l'activité de choc produit l'orage positif autour de 05h00, de 10h00-18h00 et de 21h00-23h00. Les autres activités perturbées demeurent sans effet pendant cette saison et lors de cette phase.

Le panneau b de la figure 3.9 est consacré au printemps. Durant cette saison, les courbes de la variation de foF2 au cours des activités récurrente et fluctuante présentent une évolution presque similaire. Ces deux activités provoquent l'orage positif durant presque toute la nuit. L'activité de choc occasionne ce type d'orage de 21h00-23h00 et engendre un orage négatif autour de 02h00.

La figure 3.9.c correspond aux graphes de l'été à travers les différentes activités géomagnétiques. Les activités récurrente et fluctuante n'ont toujours pas d'effet sur l'ionisation. L'orage positif existe toujours et résulte de l'activité de choc. Il est observé de 04h00-06h00 et autour de 22h00.

Le dernier panneau de la figure 3.9 concerne l'automne. Les activités de choc et récurrente présentent une variabilité journalière similaire de foF2. Ces deux activités engendrent un orage positif de 11h00-17h00 pendant le jour, et de 20h00-23h00 pendant la nuit. Ce pendant, l'activité fluctuante reste toujours sans effet sur l'ionisation.

En résumé, lors de la phase décroissante nos observations sont les suivantes :

- 1) L'orage positif se produit en hiver de jour comme de nuit pendant une activité de choc.
- 2) L'orage positif arrive la nuit au printemps pour toutes les activités perturbées ; excepté lors de celle de choc qui engendre un orage négatif autour de 02h00.
- 3) En été, et au cours de la nuit, il se produit un orage positif durant une activité de choc.
- 4) Excepté pour l'activité fluctuante, en automne on observe l'orage positif toute la journée.

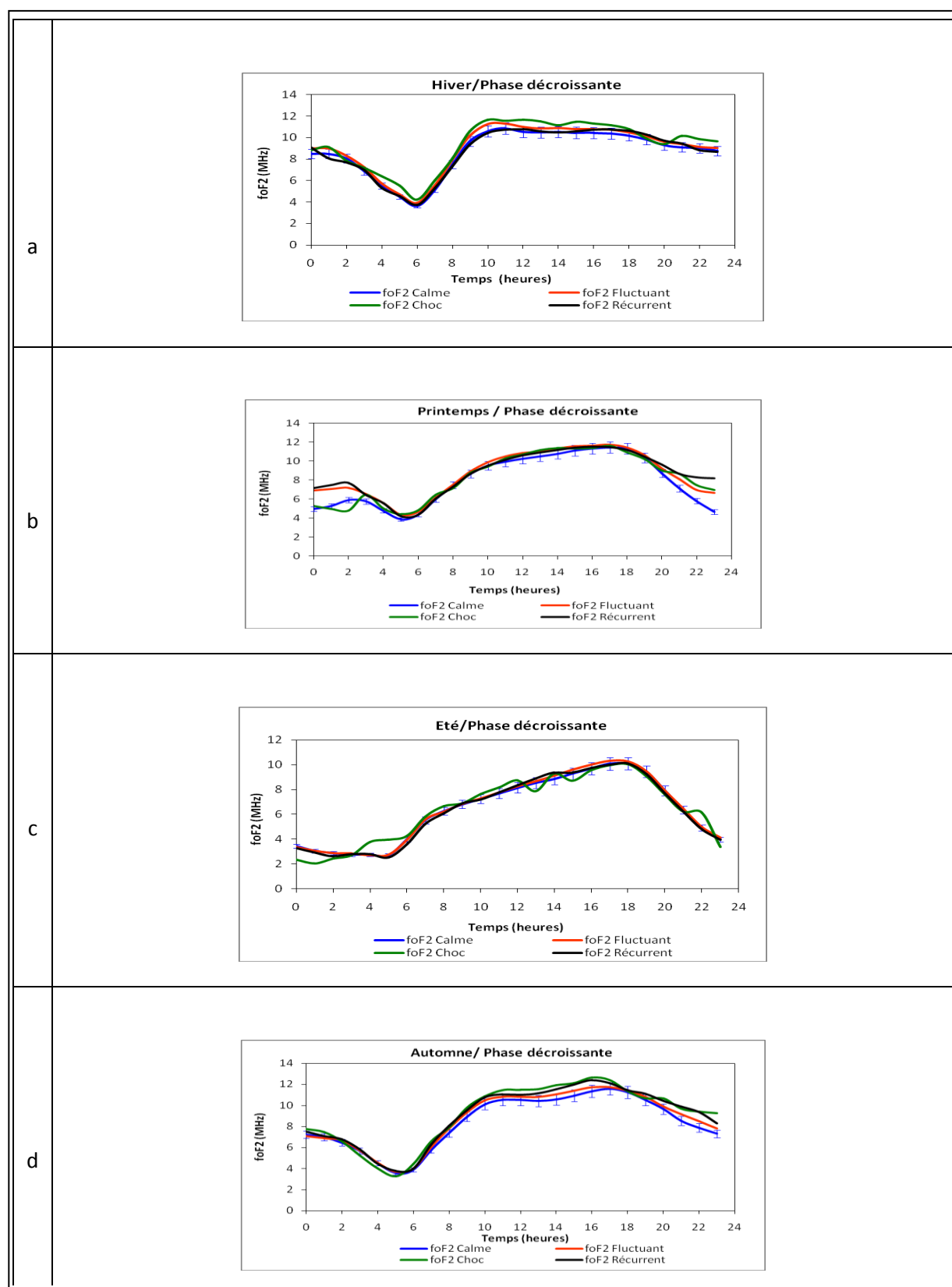


Figure 3. 9 : Profils diurnes de foF2 en phase décroissante, en bleu l'activité calme, en rouge l'activité fluctuante, en vert l'activité de choc, en noir l'activité récurrente ; l'hiver (panneau a), printemps (panneau b), l'été (panneau c) et l'automne (panneau d)

3.3.5. Synthèse

L'impact de l'activité géomagnétique sur la variabilité de foF2 lors de différentes phases du cycle solaire à travers les différentes saisons permet de retenir que :

Au minimum solaire, les activités de choc et récurrente causent un orage positif durant toutes les saisons, alors que l'activité fluctuante le produit seulement au printemps.

A la phase montante, l'orage positif résulte aussi des mêmes activités géomagnétiques qu'à la phase précédente durant toutes les saisons. Sauf que, ce type d'orage se produit au printemps et en hiver lors de l'activité fluctuante.

Pendant la phase maximum, excepté en automne où seule l'activité récurrente provoque l'orage positif; lors des autres saisons, ce type d'orage résulte de l'ensemble de toutes les activités géomagnétiques perturbées.

A la phase de déclin, l'activité de choc provoque l'orage positif durant toutes les saisons. Au printemps, il se produit un orage positif au cours des activités perturbées.

Quelle que soit la phase du cycle solaire, l'orage positif arrive au printemps pour toutes les activités perturbées. L'activité de choc engendre un orage positif au cours des saisons à travers les différentes activités géomagnétiques perturbées en dehors de la phase maximum et en automne. Il en est de même pour l'activité récurrente à l'exception de la phase décroissante pendant l'hiver et l'été.

L'orage positif observé pendant l'hiver a été mentionné par Rishbeth (1989) et Burms et al. (1991, 1995).

Les mécanismes capables de causer l'orage positif sont : les vents méridionaux thermosphériques (Testud et Vasseur, 1969 ; Richmond et Roble, 1979) ; la pénétration rapide de la convection magnétosphérique qui affecte le champ électrique (Vasyliunas, 1970) ou la perturbation du champ électrique par effet dynamo (Blanc et Richmond, 1980).

L'orage négatif est observé au cours de l'activité récurrente, en phase minimum pendant l'hiver et l'automne.

Au cours de l'activité de choc ce type d'orage s'observe : (1) en automne, au minimum de phase et à la phase croissante, et (2) au printemps lors de la phase décroissante.

En basse latitude, l'orage négatif résulte de l'augmentation de la densité des molécules neutres (Prolss, 1987) et aussi d'une diminution de la densité électronique (Lu et al., 2001).

Il importe de noter que la moyenne de la variabilité de foF2 lors de cette étude statistique est faible au cours d'une même phase du cycle solaire et à la même saison.

3.4. Conclusion

L'analyse de l'étude statistique de la fréquence critique de la couche F2 (foF2) à la station de Dakar de 1971-1996 permet de retenir que:

- A travers l'étude morphologique de profil horaire, les cinq types de profils montrés par Fayot et Vila (1979) à savoir les profils de type noon bite out, pic de matin, pic d'après midi et les profils de type plateau et dôme se confirment dans cette station et se produisent globalement selon les saisons. Durant l'automne, on peut observer le profil de type noon bite out ; en été et au printemps le profil de pic d'après midi est grossièrement observé en dehors de la phase maximum où le graphe de l'été produit le profil dôme et celui du printemps montre le profil plateau. Divers types de profil ont été observés en hiver mais celui du pic de matin reste dominant.
- Durant les différentes phases du cycle solaire, nous notons l'existence de l'anomalie d'hiver et la présence de l'asymétrie équinoxiale.

L'étude de l'impact de l'activité géomagnétique perturbée sur la variabilité foF2 fait ressortir l'existence : (1) d'un orage positif causé généralement par les jours récurrents et de chocs et parfois par l'activité fluctuante; (2) d'un orage négatif produit par les activités de choc et récurrente au cours de la nuit.

Le chapitre suivant traitera de l'étude statistique comparative de la fréquence critique foF2 dans les stations de Dakar et de Ouagadougou après un bref rappel sur l'étude statistique de foF2 à la station de Ouagadougou.

ARTICLE I (Ali M. Nour et al., 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.

Ali Mahamat Nour, Ouattara Frédéric, Zerbo Jean Louis, Gyébré Aristide Marie Frédéric, Nanéma Emmanuel, Zougmore François.

International Journal of Geosciences, 2015, 6, 201-208

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

Ali Mahamat Nour¹, Ouattara Frédéric^{1,2}, Zerbo Jean Louis^{2,3},
Gyèbré Aristide Marie Frédéric^{1,2}, Nanéma Emmanuel^{1,2,4}, Zougmore François¹

¹Laboratoire de Matériaux et Environnement (LAME), UFR SEA Université de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso

²Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace (LAREME), Université de Koudougou, Koudougou, Burkina Faso

³Institut des Sciences Exactes et Appliquées (ISEA), Université Polytechnique de Bobo Dioulasso, Bobo Dioulasso, Burkina Faso

⁴Centre National de Recherches Scientifiques et Techniques (CNRST), Institut de Recherches Scientifiques Appliquées et Technologies (IRSAT), Ouagadougou, Burkina Faso
Email: fojals@yahoo.fr, ouattarafred@yahoo.fr

Received 7 February 2015; accepted 6 March 2015; published 11 March 2015

Copyright © 2015 by authors and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The statistical study of F2 layer critical frequency at Dakar station from 1971 to 1996 is carried out. This paper shows foF2 statistical diurnal for all geomagnetic activities and all seasons and that during solar maximum and minimum phases. It emerges that foF2 diurnal variation graphs at Dakar station exhibits the different types of foF2 profiles in African EIA regions. The type of profile depends on solar activity, season and solar phase. During solar minimum and under quiet time condition, data show the signature of a strength electrojet that is coupled with intense counter electrojet in the afternoon. Under disturbed conditions, mean intense electrojet is observed in winter during fluctuating and recurrent activities. Intense counter electrojet is seen under fluctuating and shock activities in all seasons coupled with strength electrojet in autumn. In summer and spring under all geomagnetic activity condition, there is intense counter electrojet. During solar maximum, in summer and spring there is no electrojet under geomagnetic activity conditions. Winter shows a mean intense electrojet. Winter and autumn are marked by the signature of the reversal electric field.

How to cite this paper: Nour, A.M., Frédéric, O., Louis, Z.J., Frédéric, G.A.M., Emmanuel, N. and François, Z. (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>

Keywords

foF2 Diurnal Variation, Solar Cycle Phases, Geomagnetic Activity Classes, Seasonal Effects, E Region Electric Currents

1. Introduction

Geomagnetic activity, defined as the disturbance of the geomagnetic field due to external source [1], has been divided into four classes of activity [2]–[5]. These classes are: quiet activity due to slow solar wind, shock activity due to CMEs (Coronal Mass Ejections), recurrent activity provoked by high speed solar wind coming from coronal hole and fluctuating activity constituted by the other activities which are not clear [4]. The impact of each class of activity in the critical frequency of F2 layer (foF2) has been study through Ouagadougou station (Lat: 12.4°N; Long: 358.5°E; dip: 1.43°) foF2 variability [6]–[9] and Dakar (Lat: 14.8°N; Long: 342.6°E, dip: 8.44°) station foF2 variability [10]. The first foF2 statistical variation for an African Equatorial Ionization Anomaly (EIA) station has been performed by Ouattara and Amory Mazaudier [9] at Ouagadougou station located at the trough of ionization. This paper, the second one that focuses on foF2 statistical variation concerns Dakar station situated between the crest and the trough of the EIA region of African sector from 1971 to 1996. Our objective in statistical works is, on the one hand, to investigate existing models predictions by comparing the statistical experimental results coming from long series data base with models' results. On the second hand, to contribute to space weather study by determining ionosphere variability under different types of solar activity and that for different seasons and solar cycle phases. The present study goal is to contribute to space weather study. Dakar station is used because foF2 variation comparative study through its long term trend variation and diurnal variation shows the particularity of Dakar station (see [11]–[13]). For this paper, our attention is only focused on foF2 statistical diurnal variation during solar minimum and maximum phases.

2. Materials and Methods

The data used in this study concern Dakar station (Lat: 14.8°N; Long: 342.6°E, dip: 8.44°) in Sénégal provided by Télécom Bretagne. We analyze foF2 statistical diurnal variation from 1971 to 1996. That period involved three solar minimum and two solar maximum. In this paper, we neglect the impact of long term trend in data because Gnabahou *et al.* [12] at Dakar station showed that on the one hand there is no difference between disturbed and quiet time periods for foF2 yearly variation and on the other hand the long term trend slop at Dakar station is weak.

For the determination of solar cycle phases, we use sunspot number R_z and follow Ouattara *et al.* [8] method. According to their method solar minimum year is given by $R_z < 20$ and solar maximum year is obtained by taking $R_z > 100$. It is important to note that for small solar cycles (solar cycles with sunspot number maximum (R_z max) less than 100) the maximum phase is obtained by considering $R_z > 0.8 \times R_z$ max. Solar increasing phase years is given by $20 \leq R_z \leq 100$ and R_z greater than the previous year's value. Solar decreasing phase is obtained by $100 \geq R_z \geq 20$ and R_z less than the previous year's value. Keep in mind that we will only consider solar minimum and maximum in this work.

For the determination of geomagnetic conditions, we use pixel diagrams (Figure 1 example of pixel diagram; see Ouattara and Amory Mazaudier [14] for more details) built by using 1) Mayaud [15] [16] geomagnetic index aa by considering its daily mean value Aa, 2) the date of Sudden Storm Commencement (SSC) and 3) color code that allow us to identify the four classes of geomagnetic activity. In pixel diagram, quiet time condition is highlighted by white and blue colors and given by $Aa \leq 20$ nT. The other conditions namely disturbed conditions that take together the three other conditions are given by $Aa > 20$ nT and highlighted by the other colors (green, yellow, orange, red and olive red).

For seasonal study, the following seasons are considered: winter (December, January and February), spring (March, April, May), summer (June, July, August) and autumn (September, October and November).

To perform the statistical hourly foF2 values we follow Ouattara and Amory Mazaudier [9] method. Therefore, the following equations are used:

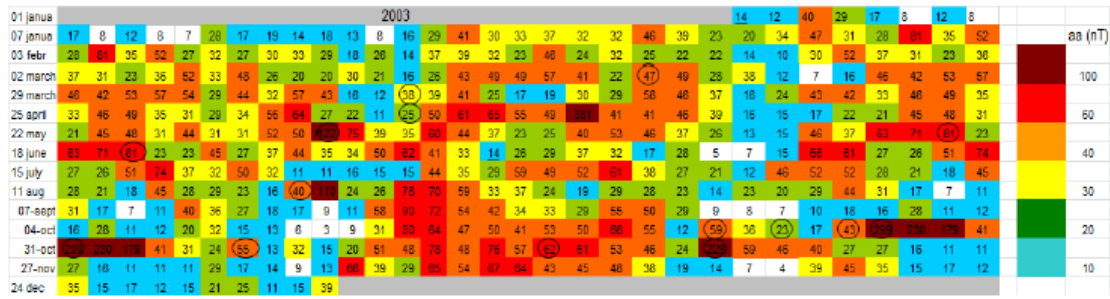


Figure 1. An example of pixel diagram (2003 year pixel diagram). Circle indicates the date of SSC.

2.1. Geomagnetic Activity Impact Evaluation

The hourly foF2 values for geomagnetic quiet conditions from 1971-1996 ($foF2_{Geomag}^{Hourly}$) are determined by using Equation (1):

$$foF2_{Geomag}^{Hourly} = \frac{\sum_{j=1}^{Nc} foF2_{Cycle}^{Hourly}}{Nc} \quad (1)$$

In this equation, $foF2_{Cycle}^{Hourly}$ is the hourly mean foF2 value for the considered solar cycle phase and Nc the number of solar cycle phase involved in the period 1971-1996.

From Table 1, it can be seen for our period involved, three solar minimum phases, two solar maximum phases, three solar decreasing phases and two solar increasing phases. Only solar maximum and minimum phases will be considered as previously noted. By using Equation (1), we determine the 24 hours mean values of foF2 for each type of geomagnetic class of activity by considering the whole 9496 days of the 26 years involved (20 years with 365 days and 6 years with 366 days). Daily geomagnetic activity is evaluated by using pixel diagrams (see [2] [3] [14]).

2.2. Solar Cycle Phase Impact Evaluation

The mean hourly foF2 value of a solar cycle phase ($foF2_{Cycle}^{Hourly}$) is carried out through Equation (2):

$$foF2_{Cycle}^{Hourly} = \frac{\sum_{j=1}^{Ny} foF2_{Year}^{Hourly}}{Ny} \quad (2)$$

In this equation, $foF2_{Year}^{Hourly}$ corresponds to the mean hourly foF2 value of the considered year and Ny the number of year involved in the considered solar cycle phase. The number of year per solar cycle phase can be obtained by counting the number of year of each solar cycle phase shown in Table 1.

$foF2_{Year}^{Hourly}$ is given by Equation (3):

$$foF2_{Year}^{Hourly} = \frac{\sum_{k=1}^{Nm} foF2_{Month}^{Hourly}}{Nm} \quad (3)$$

In Equation (3), $foF2_{Month}^{Hourly}$ corresponds to the monthly hourly mean value of foF2 and Nm the number of available month involved in the considered year.

2.3. Seasonal Study Impact Evaluation

For seasonal study, $foF2_{Month}^{Hourly}$ is obtained by utilizing Equation (4):

$$foF2_{Month}^{Hourly} = \frac{\sum_{j=1}^{Nd} foF2_{Day}^{Hourly}}{Nd} \quad (4)$$

Table 1. Solar cycle phases in the period 1971-1996.

Number of solar cycle	Minimum $R_z < 20$	Increasing $20 \leq R_z \leq 100$	Maximum $R_z > 100$	Decreasing $100 \geq R_z \geq 20$
20				1971-1975
21	1976	1977-1978	1979-1982	1983-1985
22	1986	1987-1988	1989-1991	1992-1995
23	1996			

In the previous equation, $foF2_{Day}^{Hourly}$ is an hourly foF2 value for a geomagnetic class day and Nd the number of geomagnetic class day involved in the month considered.

3. Results

In the present paper, we present foF2 diurnal variation during solar minimum and maximum phases under the four geomagnetic conditions and for different seasons.

Figure 2 and Figure 3 show seasonal variability of diurnal variation of foF2 during all geomagnetic activities for solar cycle minimum phase and solar maximum phase, respectively. In these figures, blue graph corresponds to winter, red curve to spring; black graph is devoted to autumn and green curve to summer.

Figure 2(a) shows the first peak at 1000 LT and the second at 1800 LT. The highest morning peak and afternoon peak is seen in autumn graph with 9.29 MHz and 10.64 MHz as foF2 value respectively. Winter foF2 values are superior to summer foF2 values; this shows winter anomaly. There is equinoctial asymmetry during day-time. There is no night time peak during this period.

In Figure 2(b), one can observed the same foF2 diurnal variation as for quiet time (panel a). The highest morning peak value is 9.27 MHz for winter curve; that of afternoon peak is 11.14 MHz for autumn graph. Night time peak is observed in autumn graph at 2100 LT with 7.29 MHz. The principal difference between quiet time curves (panel a) and fluctuating time curves (panel b) is the presence of night time peak. One can see the presence of equinoctial asymmetry (autumn foF2 values are superior to those of spring) *i.e.* September/October peak superior to March/April.

Figure 2(c) highlights the absence of shock activity during summer. A fairly double peak is observed in autumn curves at 1000 LT and 1700 LT with 10.25 MHz and 11.8 MHz, respectively. It can be seen that at day-time spring values are superior to those of autumn. This observation points out the presence of equinoctial asymmetry. Night peak is exhibited by all recorded season.

Figure 2(d) shows at daytime equinoctial anomaly with autumn peak superior to that of spring. Morning peak is shown at (1) 1000 LT with 9.89 MHz during winter and at (2) 1200 LT with 10.1 MHz during autumn. Autumn graph highlights night peak at 2100 LT with 8.43 MHz while winter curve shows this peak at 2000 LT with 8.25 MHz.

For summarizing, during solar minimum only under autumn, foF2 diurnal variation graph show noon bite out profile with predominance afternoon peak. During all time geomagnetic conditions, summer and spring graph exhibit afternoon profile. Winter curve shows morning peak (panels a, b and d) except shock activity where one observe a plateau profile at 06h00 - 14h00 (panel c).

F2 layer density is the highest under recurrent condition and the lowest during quiet condition. It can be retained that quiet foF2 density < fluctuating foF2 density < shock foF2 density < recurrent foF2 density.

Except the profile type, seasonal effect is non-perceptible under shock condition because graphs are merged.

The night peak is seen in autumn graph under disturbed periods (panels b, c and d). Shock activity exhibits this peak at all seasons.

Figure 3(a) shows equinoctial asymmetry as autumn foF2 values are superior to those of spring. As winter foF2 values are superior to those of summer data highlight winter anomaly. Autumn curve present noon bite out profile with morning peak at 1000 LT with 13.99 MHz and Afternoon peak is situated at 1700 LT with foF2 values 13.66 MHz. Winter curve show a morning peak profile with 14.29 MHz as foF2 values. Spring graph shows plateau profile with 13.05 MHz as foF2 value and the curve of summer exhibits dome profile with 12.16 MHz at 1700 LT.

Figure 3(b) exhibits equinoctial asymmetry with autumn foF2 values superior to those of spring. Winter

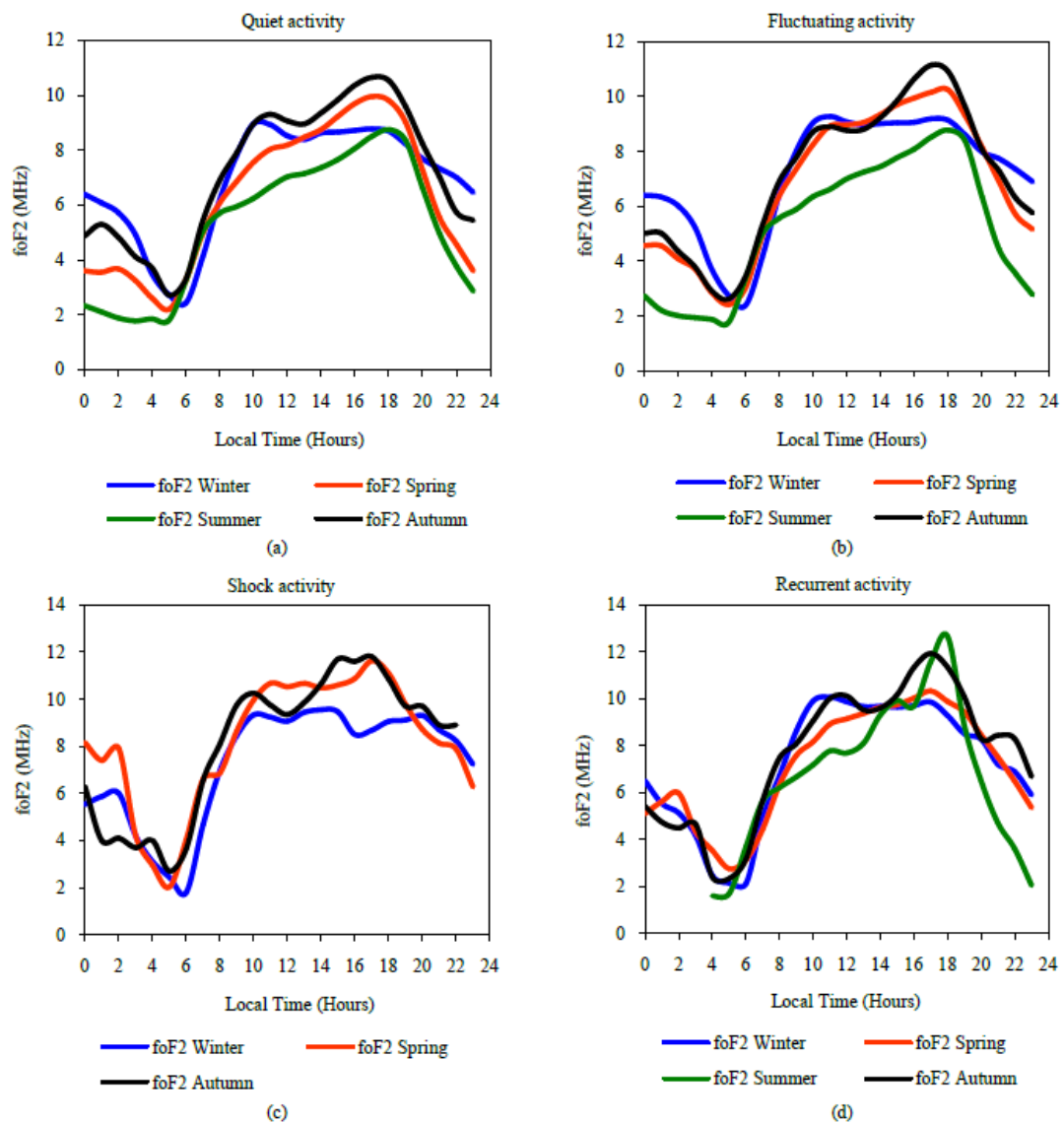


Figure 2. Seasonal and diurnal foF2 variation under quiet time (panel a), Fluctuating activity (panel b) shock activity (panel c) and recurrent activity (panel d) conditions for solar minimum.

anomaly is shown by the values of winter foF2 superior to those of summer. Double peak is seen in autumn curve with 14 MHz as peak values and located at 1000 LT and 1700 LT for morning peak and afternoon peak, respectively. Winter curve presents morning peak profile where the peak is situated at 1000 LT with 14.16 MHz. Spring profile is that plateau with 13.44 MHz as foF2 maximum value. Summer curve highlights dome profile with the maximum located at 1700 LT with 12.69 MHz.

Figure 3(c) concerns shock activity graphs. Winter anomaly is shown by data profiles. Equinoctial anomaly shown here is characterized by autumn data values superior to those of spring. Winter graph shows morning peak located at 1000 LT with 14.36 MHz. Spring and autumn curves show fairly plateau profile with 13.40 MHz as foF2 value. Dome profile is presented by summer graph with the maximum located at 1600 LT with 12.88 MHz as foF2 value.

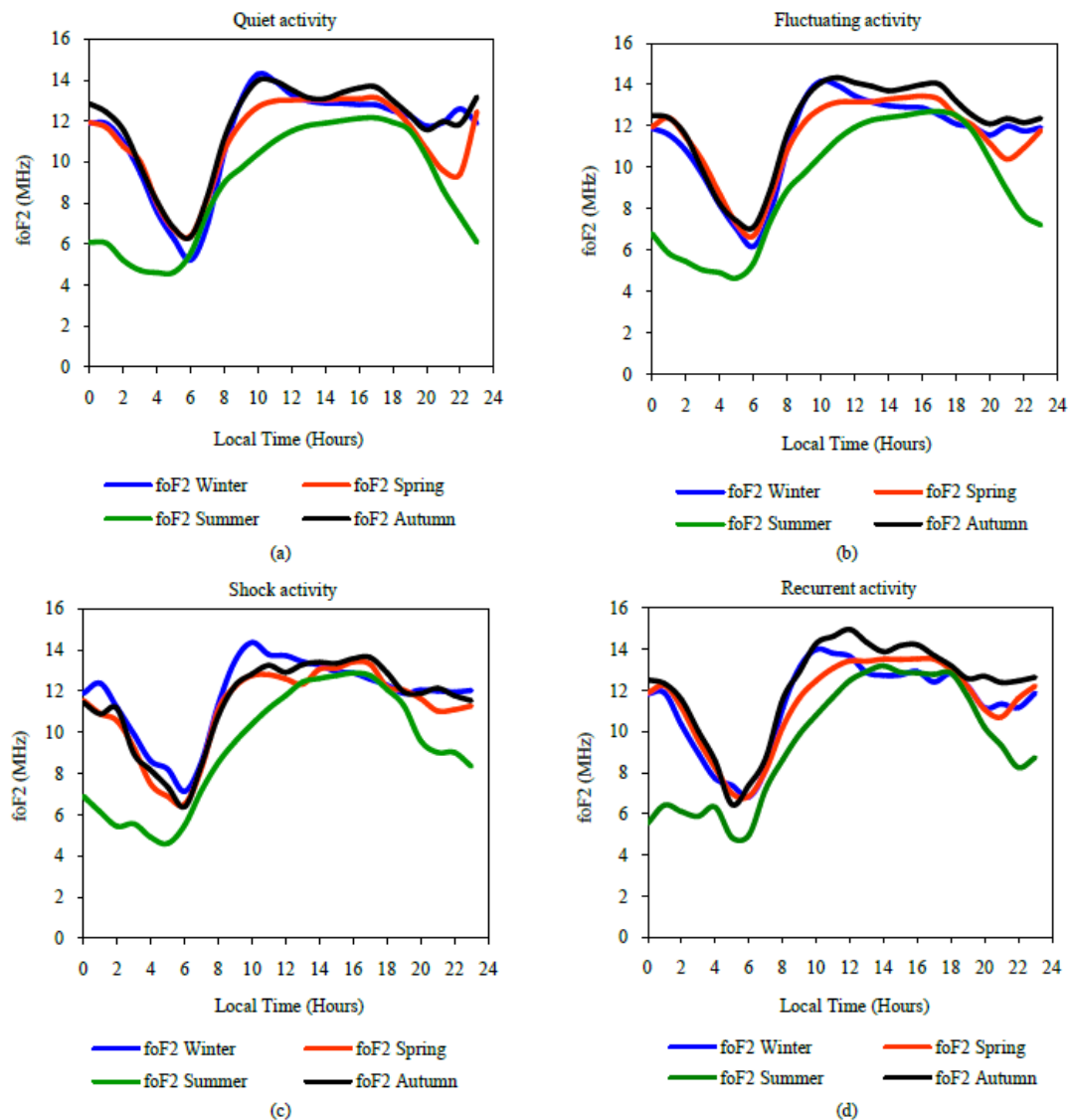


Figure 3. The same as Figure 2 but for solar maximum.

Figure 3(d) is devoted to recurrent activity. It can be seen that winter values are superior to those of summer. This observation shows winter anomaly.

Autumn values are superior to those of the other seasons. Except autumn graph the others are merged and have the same behavior. There is equinoctial asymmetry during this activity. Winter graph shows morning peak profile where the peak is situated at 1000 LT with 14 MHz; autumn exhibits the noon bite out while spring curve is plateau profile and dome profile is seen at summer.

Night time peak is seen at 2000 LT for autumn curve with 12.69 MHz and winter graphs at 2100 with 11.34 MHz as foF2 values.

For summarizing at solar maximum, under all geomagnetic activities conditions, dome profile is shown in summer, plateau profile is observed in spring graph and morning peak profile is seen in winter. Except shock activity, autumn presents a noon bite out profile.

Winter and autumn curves present night time peak at all geomagnetic activities. All graphs, under shock activity show night time peak. Except in summer, all graphs are merged under shock and recurrent activities.

4. Discussion and Conclusions

The five types of foF2 profile observed at Ouagadougou station (Long: 358.5°E; Lat: 12.4°N; dip: +1.45°) by Fayot and Vila [17] are also seen here at Dakar station (Long: 342.6°E; Lat: 14.8°N; dip: +5.53°): dome or D profile, noon bite out or B profile, morning peak or M profile, afternoon peak or reversed or R profile and plateau or P profile. Based on the fact that foF2 is able to describe the distribution of E layer electric current through the study of ground recorded magnetic field variations, Dunford [18], Vassal [19], Vassal [20], Acharya [21] and Acharya [22] show that it is possible to link ionosphere variability to the nature, the force or the absence of E region electric currents. Therefore, Vassal [20] relied the above different types of foF2 profiles of West Africa equatorial region on different types of E layer electric current (electrojet and counter electrojet). He attributed to D and P profiles the absence of electrojet, to R profile the presence of intense counter electrojet, to M profile the presence mean intensity electrojet and to B profile the presence of strength electrojet.

By taking into account the above relationship between E region electric current and foF2 diurnal variation, one can assert that:

During solar minimum and: 1) under quiet time condition there is a strength electrojet at daytime coupled with intense counter electrojet at the afternoon; 2) under fluctuating condition we observe the presence of mean intense electrojet in winter, intense counter electrojet for the other seasons coupled with strength electrojet in autumn; 3) under shock activity, we note the presence of an intense counter electrojet for the seasons involved coupled with a strength electrojet in autumn; 4) under recurrent condition, mean intense electrojet is observed in winter, strength electrojet in autumn and intense counter electrojet in the others seasons. As in foF2 diurnal profile the presence of trough around midday observed in noon bite out profile expresses the signature of the vertical drift ExB (see [23]-[26]), it can be retained that only during quiet time condition and in autumn foF2 profiles express the signature of the vertical drift ExB. Fairly under all geomagnetic activities and in autumn this signature is observed. Moreover, it is well-known that a night time peak in foF2 diurnal variation graph is the signature of the reversal electric field in equatorial region (see [23]-[26]). Therefore, this signature is observed during the disturbed condition in autumn graph under all geomagnetic conditions and also in winter except under fluctuating activity.

During solar maximum and in: 1) summer and spring, the absence of an electrojet is seen under the all geomagnetic activities; 2) winter, we observe presence of mean intense electrojet; and autumn we note presence strength electrojet except during the shock activity; 3) winter and autumn under all geomagnetic conditions, we observe the signature of the reversal electric field; this signature is also observed for all seasons under shock activity; 4) all seasons, there is no seasonal effect under shock activity except in summer.

References

- [1] Legrand, J.P. (1984) Elementary Introduction of Cosmic Physics and Solar Terrestrial Physics, Area of Southern and Antarctic French Land, 306.
- [2] Legrand, J.P. and Simon, P.A. (1989) Solar Cycle and Geomagnetic Activity: A Review for Geophysicists. Part I. The Contributions to Geomagnetic Activity of Shock Waves and of the Solar Wind. *Annals of Geophysics*, 7, 565-578.
- [3] Simon, P.A., and Legrand, J.P. (1989) Solar Cycle and Geomagnetic Activity: A Review for Geophysicists. Part II. The Solar Sources of Geomagnetic Activity and Their Links with Sunspot Cycle Activity. *Annals of Geophysics*, 7, 579-594.
- [4] Richardson, I.G., Cliver, E.W. and Cane, H.V. (2000) Sources of Geomagnetic Activity over the Solar Cycle: Relative Importance of Coronal Mass Ejections, High-Speed Streams, and Slow Solar Wind. *Journal of Geophysical Research*, 105, 18200-18213. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JA000400>
- [5] Richardson, I.G. and Cane, H.V. (2002) Sources of Geomagnetic Activity during Nearly Three Solar Cycles (1972-2000). *Journal of Geophysical Research*, 107, 1187.
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.
- [6] Ouattara, F. (2009) Contribution à l'étude des relations entre les deux composantes du champ magnétique solaire et l'ionosphère équatoriale. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar.

- [7] Ouattara, F. and Zerbo, J.L. (2011) Ouagadougou Station F2 layer Parameters Yearly and Seasonal Variations during Severe Geomagnetic Storms Generated by CMEs and Fluctuating wind Streams. *International Journal of Physical Sciences*, 6, 4854-4860.
- [8] Ouattara, F., Gnabahou, D.A. and Mazaudier, C.A. (2012) Seasonal, Diurnal and Solar-Cycle Variations of Electron Density at Two West Africa Equatorial Ionization Anomaly Stations. *International Journal of Geophysics*, 2012, Article ID: 640463. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/640463>
- [9] Ouattara, F. and Mazaudier, C.A. (2012) Statistical Study of the Diurnal Variation of the Equatorial F₂ Layer at Ouagadougou from 1966 to 1998. *Journal of Space Weather Space Climate*, 2, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2012019>
- [10] Gnabahou, A. and Ouattara, F. (2012) Ionosphere Variability from 1957 to 1981 at Djibouti Station. *European Journal of Scientific Research*, 73, 382-390.
- [11] Gnabahou, D.A., Elias, A.G. and Ouattara, F. (2013) Long-Term Trend of foF₂ at a West-African Equatorial Station Linked to Greenhouse Gases Increase and Dip Equator Secular Displacement. *Journal of Geophysical Research*, 118, 3909-3913. <http://dx.doi.org/10.1002/jgra.50381>
- [12] Gnabahou, D.A., Ouattara, F., Nanéma, E. and Zougmore, F. (2013) foF₂ Diurnal Variability at African Equatorial Stations: Dip Equator Secular Displacement Effect. *International Journal of Geosciences*, 4, 1145-1150. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.48108>
- [13] Ouattara, F., Gnabahou, A. and Mazaudier, C.A. (2012) Seasonal, Diurnal and Solar-Cycle Variations of Electron Density at Two West Africa Equatorial Ionization Anomaly Stations. *International Journal of Geophysics*, 2012, Article ID: 640463, 9 p.
- [14] Ouattara, F., Amory-Mazaudier, C., Fleury, R., Lassudrie-Duchesne, P., Vila, P. and Petitdidier, M. (2009) West African Equatorial Ionospheric Parameters Climatology Based on Ouagadougou Ionosonde Station Data from June 1966 to February 1998. *Annales Geophysicae*, 27, 2503-2514. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-27-2503-2009>
- [15] Mayaud, P.N. (1971) A Measurement of Planetary Magnetic Activity Based on Two Antipodal Observatories. *Annales Geophysicae*, 27, 67-71.
- [16] Mayaud, P.N. (1972) The aa Indices: A 100-Year Series, Characterizing the Magnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*, 77, 6870-6874. <http://dx.doi.org/10.1029/JA077i034p06870>
- [17] Faynot, J.M. and Vila, P. (1979) F-Region at the Magnetic Equator. *Annales Geophysicae*, 35, 1-9.
- [18] Dunford, E. (1967) The Relationship between the Ionosphere Equatorial Anomaly and the E-Region Current System. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 29, 1489-1498. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169\(67\)90102-X](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169(67)90102-X)
- [19] Vassal, J.A. (1982) Electrojet, contreélectrojet et région F à Sarh (Tchad), Géophysique. ORSTOM, Paris.
- [20] Vassal, J. (1982) La variation du champ magnétique et ses relations avec l'électrojet équatorial au Sénégal Oriental. *Annales Geophysicae*, 3, 347-355.
- [21] Acharya, R., Roy, B., Sivaraman, M.R. and Dasgupta, A. (2010) An Empirical Relation of Daytime Equatorial Total Electron Content with Equatorial Electrojet in the Indian Zone. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (UK), 72, 774-780. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2010.03.023>
- [22] Acharya, R., Roy, B., Sivaraman, M.R. and Dasgupta, A. (2011) On Conformity of the EEJ Based Ionospheric Model to the Fountain Effect and Resulting Improvements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (UK), 73, 779-784. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2011.01.011>
- [23] Farley, D.T., Bonell, E., Fejer, B.G. and Larsen, M.F. (1986) The Preversal Enhancement of the Zonal Electric Field in the Equatorial Ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 91, 13723-13728. <http://dx.doi.org/10.1029/JA091iA12p13723>
- [24] Rishbeth, H. (1971) The F-Layer Dynamo. *Planetary and Space Science*, 19, 263-267. [http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633\(71\)90205-4](http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633(71)90205-4)
- [25] Fejer, B.G., Farley, D.T., Woodman, R.F. and Calderon, C. (1979) Dependence of Equatorial F-Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. *Journal of Geophysical Research*, 84, 5792-5796.
- [26] Fejer, B.G. (1981) The Equatorial Ionospheric Electric Fields: A Review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43, 377-386. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90101-X](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169(81)90101-X)

CHAPITRE 4. : ETUDE STATISTIQUE COMPARATIVE DE LA VARIATION DIURNE DE foF2 A LA STATION DE DAKAR ET OUAGADOUGOU

4.1. Introduction

Compte tenu du rôle important que joue l'ionosphère dans les télécommunications, il s'avère nécessaire de comprendre sa variabilité à long terme et surtout de pouvoir prédire les perturbations ionosphériques suite aux événements solaires. La plupart des études sur la variation de l'ionosphère utilise le paramètre foF2 issu de la couche F2 qui est directement lié à sa densité électronique. Il importe de noter que la densité électronique de pic de la région F2 (NmF2) ou la fréquence critique (foF2) constitue un paramètre principal pour la détermination de la fréquence maximum utilisable (MUF) pour une propagation oblique des ondes radio.

D'importants résultats ont été obtenus après des études comparatives à travers le paramètre foF2 dans le secteur ouest africain équatorial (Ouattara et al., 2009; Ouattara et al., 2012 ; Gnabahou et al., 2013).

Après l'étude statistique détaillée de foF2 au chapitre précédent à la station de Dakar, nous utiliserons ce même paramètre et nous effectuerons une étude comparative par des moyennes statistiques de la fréquence critique foF2 entre la station de Dakar et celle de Ouagadougou durant les cycles solaires 21 et 22.

Nous commencerons ce chapitre par un rappel sur l'étude statistique de foF2 à la station de Ouagadougou.

4.2. Rappel sur l'étude statistique de la variation diurne de foF2 à la station de Ouagadougou pendant les trois cycles solaires (20, 21, 22).

La première étude statistique de la variation diurne de la fréquence critique foF2 a été faite à la station de mesure d'ionosonde de Ouagadougou par Ouattara (2009), et Ouattara et Amory Mazaudier (2012). Ces auteurs ont fait leurs études en tenant compte des facteurs de variabilité suivante :

- La classification de l'activité géomagnétique définie par Legrand et Simon (1989) à savoir

l'activité calme, l'activité fluctuante, l'activité de choc et l'activité récurrente ;

- les saisons (hiver, printemps, été et automne) ;

- les différentes phases du cycle solaire (minimum, croissant, maximum et décroissant).

Ils ont aussi considéré le fait que la fréquence critique foF2 ne présente pas de grande variation pendant la période analysée Ouattara et al. (2009) et la variabilité de la fréquence critique de la couche F2 (foF2) est petite pour la même phase à travers le cycle solaire à l'exception de la phase croissante du cycle solaire 20.

La méthodologie des moyennes statistiques utilisée est celle définie au chapitre 2 (voir Ouattara et Amory Mazaudier, 2012).

Il importe de rappeler que la station d'ionosonde de Ouagadougou (lat : 12,4° N; long : 358,5°E) est située dans le creux de l'anomalie d'ionisation de la région équatoriale d'Afrique de l'Ouest et a fonctionné de juin 1966 à Février 1998 soit sur trois cycles solaires (20, 21, 22).

Par insuffisance des données, le minimum de cycle 22 (année 1986) a été remplacé par l'année 1985. Les phases minimale et croissante du cycle 20 à la station de Ouagadougou n'ont pas été représentées à cause du manque de données pour cette période considérée.

Compte tenu de l'étude détaillée réalisée par Ouattara (2009), ici nous faisons un rappel de l'analyse de quelques phases du cycle solaire.

4.2.1. Variabilité de foF2 au minimum solaire

La figure 4.1 concerne la variation diurne de foF2 au minimum solaire.

La figure 4.1.a montre un double pic avec un creux à midi avec une pré dominance de pic d'après midi. Sur cette figure, le premier pic se localise à 09h00 et le second à 18h00. Le plus grand pic du matin est observé en automne avec 7,9 MHz comme valeur tandis que le plus grand pic d'après midi est localisé au printemps avec une valeur de 9,13 MHz. Les valeurs de foF2 de l'hiver sont supérieures à celles de l'été, ce qui montre une anomalie hivernale. Il n'existe pas l'asymétrie équinoxiale durant cette période. Le pic de nuit s'observe en automne à 21h00 avec une valeur de 7,45 MHz. Le minimum sur les courbes se localise à 05h00 excepté pour l'hiver où ce minimum se situe à 06h00.

Sur la figure 4.1.b (période fluctuante) nous observons une variation similaire de foF2 à celle de la période calme (panneau a). Le graphe de l'hiver produit le plus grand pic de matin avec une valeur de 8,16 MHz, celui du printemps montre le plus grand pic d'après midi avec 9,50 MHz comme valeur. La courbe d'automne présente un pic de nuit localisé à 21h00 (7,72 MHz).

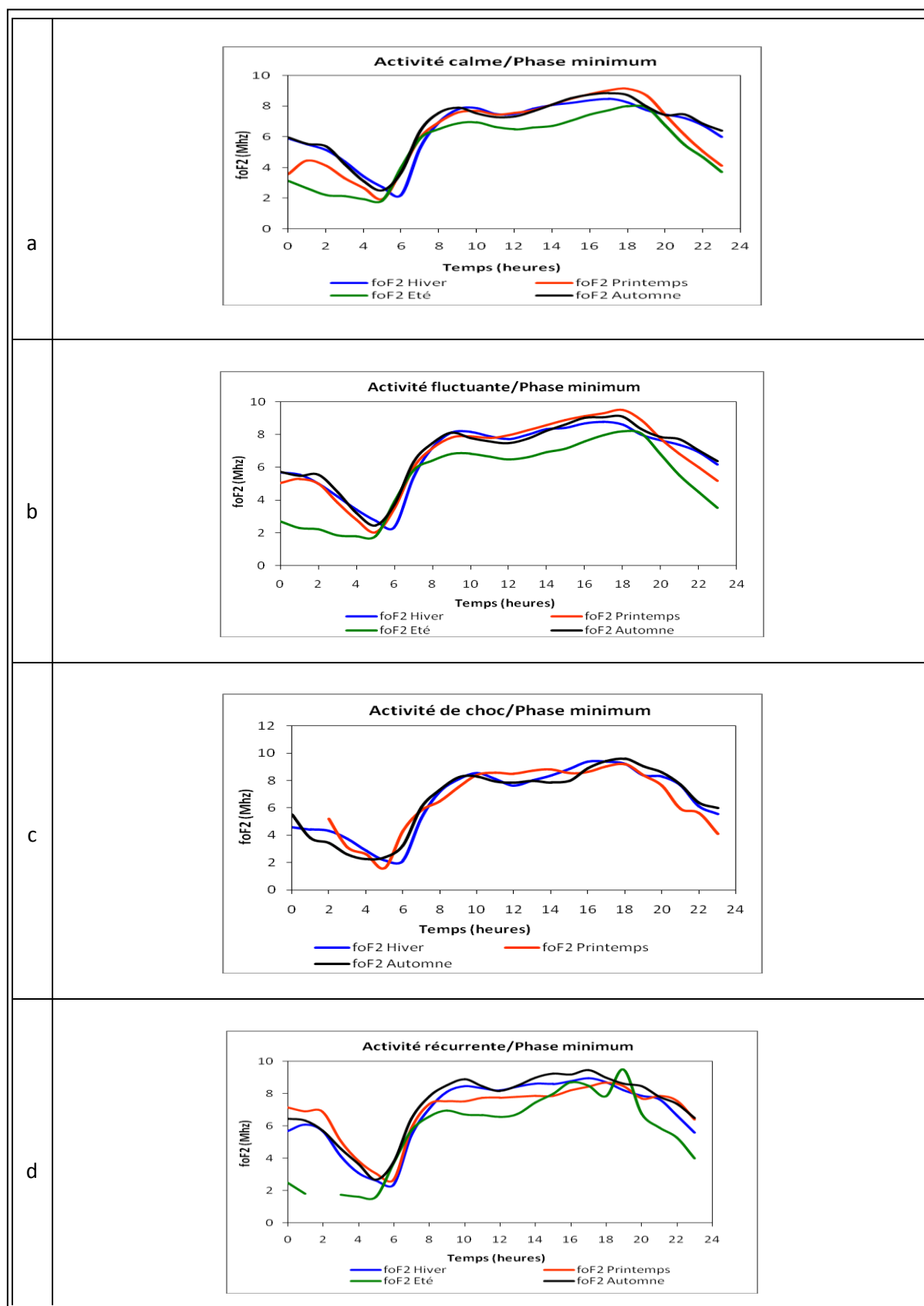


Figure 4. 1 : Variation diurne de foF2 en phase minimum; période calme (panneau a), période fluctuante (panneau b), période de choc (panneau c) et période récurrente (panneau d) à la station de Ouagadougou.

La principale différence entre les courbes de la période calme (panneau a) et celles de la période fluctuante (panneau b) est la présence d'une asymétrie équinoxiale. En fait les valeurs de foF2 du printemps sont supérieures à celles d'automne. L'anomalie d'hiver existe aussi lors de cette période.

La figure 4.1.c montre clairement l'absence de l'activité de choc pendant l'été. Un double pic est observé sur la courbe de l'automne à 10h00 et 18h00 avec respectivement 8,30 MHz et 9,6 MHz comme valeurs. Le double pic est également observé en hiver. Au cours de la journée (10h00-16h00), il ressort que les valeurs de foF2 de printemps sont supérieures à celles d'automne. Cette observation prouve la présence d'asymétrie équinoxiale. Le pic de nuit est observé au printemps et en hiver.

Au panneau d (période récurrente), tous les profils semblent être de noon bite out avec un creux localisé à 12h00 à l'exception de la courbe du printemps qui présente un profil plateau de 09h00-15h00 suivi d'un pic à 18h00. Le plus grand pic de matin et d'après midi est observé en automne et ces pics se localisent à 10h00 avec une valeur de 8,9 MHz et 17h00 avec 9,47 MHz comme valeur. Au cours de cette période, le pic de nuit demeure toujours et est observé durant toutes les saisons. Le graphe du printemps exhibe un creux à 20h00.

Il peut être mentionné qu'au minimum solaire, il ya une prédominance du profil noon bite out (signature d'un fort courant d'électrojet) en toute saison excepté au printemps où d'autres types de profil sont observés durant les activités récurrentes et de choc. Les minimums de foF2 sont observés à 06h00 en hiver et à 05h00 pour les autres saisons excepté le printemps pour lequel le minimum de foF2 se localise à 06h00 pour des activités récurrentes.

L'anomalie d'hiver existe durant toutes les périodes d'activité géomagnétique. L'asymétrie équinoxiale est observée lors des périodes perturbées. Le pic de nuit est observé en automne, alors que le creux de nuit est enregistré au printemps durant les jours de chocs et récurrents. En été, on note les plus faibles valeurs de foF2.

4.2.2. Variabilité de foF2 au maximum solaire

La figure 4.2 traite de la variation diurne de foF2 au maximum solaire. Le panneau a représente la période calme, le panneau b concerne la période fluctuante, le panneau c correspond aux jours de chocs et le panneau d est dévolu aux jours récurrents.

Au panneau a, toutes les courbes montrent clairement le profil noon bite out avec une prédominance de pic du matin. Au cours de la journée, on note l'absence d'asymétrie équinoxiale; cependant l'anomalie d'hiver existe, car les valeurs d'hiver sont supérieures à

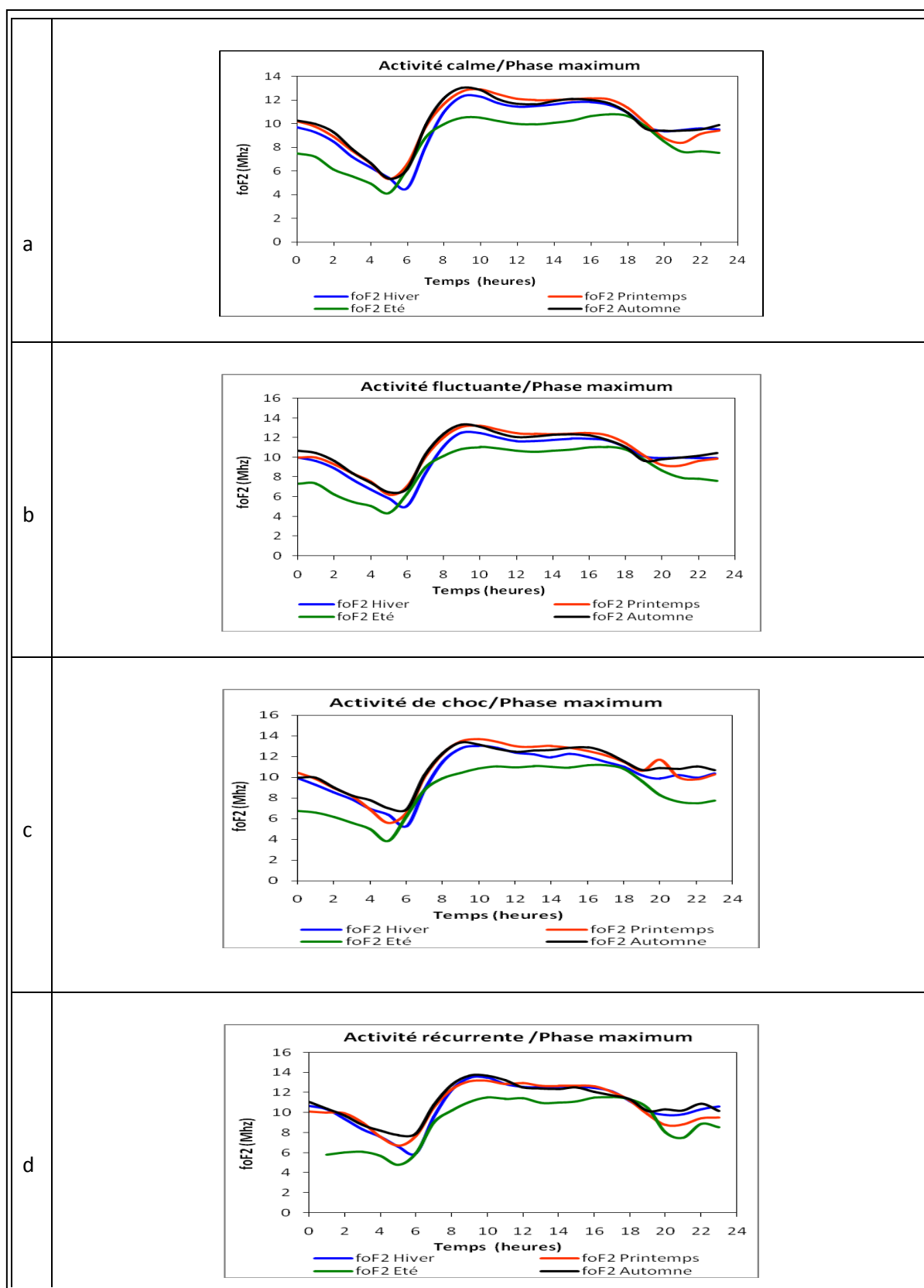


Figure 4. 2 : Variation diurne de foF2 en phase maximum; période calme (panneau a), période fluctuante (panneau b), période de choc (panneau c) et période récurrente (panneau d) à la station de Ouagadougou.

celles d'été. Une évolution similaire de la variation de foF2 est observée au cours de la journée à travers les saisons, mais nous remarquons une faible ionisation en été.

Les courbes d'automne et du printemps montrent le plus grand pic de matin et de l'après midi avec respectivement des valeurs de 13 MHz et 12 MHz.

Sur la figure 4.2.b, nous observons presque la même variation diurne de foF2 que lors de la période calme (panneau a), sauf qu'on y remarque une augmentation des valeurs du pic de matin et de l'après midi. Au cours de ces deux périodes, on note l'absence de pic et de creux de nuit et les plus faibles valeurs de foF2 sont observées toujours en été.

A la figure 4.2.c (activité de choc), en automne on observe la signature de la dérive verticale qui témoigne de la présence d'un fort électrojet; la courbe de l'été semble montrer un profil de type plateau ; le profil du pic de matin est observé au printemps et en hiver. Les graphes du printemps et d'automne présentent un pic de nuit à 20h00 avec respectivement 11,72 MHz et 10,91 MHz comme valeurs; la courbe d'automne montre aussi un second pic à 22h00. Ce type de pic est aussi observé sur le graphe d'hiver à 21h00. Le creux de nuit s'observe sur les graphes à toute saison, excepté celui d'été. Les valeurs de foF2 en hiver restent toujours supérieures à celles d'été.

Le dernier panneau de la figure 4.2 correspond aux jours récurrents. A l'exception de l'été qui produit un noon bite out avec des faibles valeurs de foF2, les courbes sont confuses. Le graphe du printemps montre un profil de type plateau, celui d'automne présente un profil de pic de matin où le pic majeur est observé à 09h00 avec une valeur de 13,7 MHz. Le graphe de l'été présente un pic de nuit à 22h00. Ce type de pic persiste en automne et est apparu deux fois à 20h00 et 22h00. L'anomalie d'hiver existe clairement lors de la période récurrente.

Au maximum solaire les observations suivantes peuvent être retenues :

En été, il ya une ionisation faible durant toutes les périodes d'activité géomagnétique occasionnant ainsi l'anomalie d'hiver.

Le profil noon bite out est globalement observé durant les activités calme et fluctuante. Ces deux dernières activités géomagnétiques ne présentent pas la signature du pré renversement du champ électrique.

Lors des périodes perturbées (choc et récurrente), les graphes montrent en plus de profil noon bite out, celui de type plateau. Le pic et le creux de nuit sont régulièrement observés en automne.

4.2.3. Synthèse

L'analyse de l'étude statistique de la variation diurne de foF2 à la station de Ouagadougou située dans le creux de l'anomalie d'ionisation équatoriale à travers les phases du cycle solaire et les différentes saisons montre clairement la dominance de profil noon bite out. Nous observons un profil de type noon bite out à prédominance de pic de matin en phase maximum et une prédominance de pic de soir en phase minimum. Le profil noon bite out qui caractérise la signature de la dérive verticale, responsable d'un fort électrojet, est enregistré en période de calme magnétique et lors de la période fluctuante durant toutes les saisons et aux différentes phases du cycle solaire.

Cependant, divers types de profils sont observés pendant les jours de choc et récurrents à travers les différentes phases du cycle solaire. Quelle que soit la phase du cycle solaire, mis à part, le profil de type pic de matin qui est observé lors de l'activité de choc en hiver et lors de l'activité récurrente en automne, les graphes de ces deux périodes perturbées présentent globalement le profil noon bite out au cours de ces deux saisons (hiver et automne). Il en est de même pour les graphes de l'été excepté toujours ceux des jours de choc. Alors que, les graphes du printemps présentent divers type de profil lors des périodes perturbées.

L'été se caractérise par une ionisation très faible durant les phases du cycle solaire. Au cours de cette saison, on observe les plus faibles valeurs de foF2.

Cette variation diurne engendre la formation de l'anomalie d'hiver. Il est aussi observé sur les données des saisons de l'asymétrie équinoxiale.

Durant les phases du cycle solaire, les minimums des valeurs sur les graphes se situent à 06h00 pour l'hiver et à 05h00 pour les autres saisons; les différents profils montrent le pic de matin entre 09h00-10h00 et le pic d'après midi entre 17h00-18h00 avec un creux autour de 12h00. Des fois le graphe d'automne montre le pic d'après midi autour de 16h00.

La principale caractéristique qui ressort de cette analyse des données de foF2 issues de cette station d'ionisation équatoriale est la présence régulière d'un pic de nuit observé en automne à travers les phases du cycle solaire.

Au minimum solaire, la signature du pré renversement de champ électrique est observée pour tous les types d'activités géomagnétiques. Cependant, au maximum solaire, la signature n'existe que lors des périodes perturbées (choc et récurrente).

Ce phénomène résulte du fait que, pendant la journée et en région équatoriale, dans les couches E et F le champ électrique orienté vers l'Est s'inverse durant la nuit et s'oriente vers l'Ouest (Fejer, 1981).

4.3. Etude statistique comparative de la variation diurne de foF2 entre la station de Dakar et celle de Ouagadougou durant les cycles solaires 21 et 22.

Depuis la première étude climatologique sur l'ionosphère équatoriale de secteur ouest africain en utilisant les données du paramètre foF2 issues d'ionosonde de la station de Ouagadougou (Ouattara et al., 2009) en passant par l'étude de la variabilité diurne de ce même paramètre à la station de Dakar et Ouagadougou (Ouattara et al., 2012), suivi de l'analyse détaillée de Gnahou et al. (2013), les recherches s'intensifient dans ce secteur à travers ce paramètre et ne cessent d'apporter de résultats.

Ici, nous faisons une étude statistique comparative de la variation diurne de la fréquence critique foF2 entre la station de Dakar située près de la crête d'anomalie d'ionisation équatoriale du secteur africain et celle de Ouagadougou qui est positionnée dans son creux.

Les données utilisées dans cette partie couvrent deux cycles solaires (21-22).

La méthodologie appliquée dans cette section est celle détaillée au chapitre 2.

Cette étude se fera en fonction de différentes phases du cycle solaire (minimum, croissante, maximum et décroissante) déterminées à partir des valeurs de nombre de tache solaire Rz.

Les différentes saisons restent toujours les mêmes à savoir l'hiver, le printemps, l'été et l'automne ; et les différentes activités géomagnétiques sont celles définies par Legrand et Simon (1989).

Les barres d'erreur portées sur les graphes de la variation de foF2 des données de la station de Ouagadougou permettront de nous renseigner sur les écarts des valeurs de foF2 observées entre les deux stations.

Par insuffisance de données, la phase minimale du cycle 22 (1986) pour la station de Ouagadougou a été remplacée par l'année 1985.

Compte tenu des similitudes des profils dans une même phase et lors d'une même saison dans nos résultats en se basant sur les différents types de profil montré par Fayot et Vila (1979), tous les graphes ne sont pas représentés.

4.3.1. Variabilité de foF2 en fonction des phases du cycle solaire

4.3.1.1. Variabilité en phase minimum

La figure 4.3 correspond aux jours calmes lors de différentes saisons. Le panneau a qui concerne l'hiver montre que les données de foF2 de la station de Dakar produisent un profil de pic de matin alors que celles de Ouagadougou présentent un noon bite out avec un pic de soir peu prononcé.

Mis à part l'intervalle 09h00-15h00 où la courbe issue des données de Dakar montre un gap, ailleurs, les deux courbes évoluent presque de la même manière. Le minimum des valeurs de foF2 se situe à 06h00.

Le graphe du printemps qui est représenté au panneau b montre un noon bite out à prédominance de pic de soir à la station de Ouagadougou; mais la courbe issue des données de Dakar présente un profil inverse avec un maximum d'ionisation atteint à 17h00. Les valeurs de foF2 à la station de Dakar sont supérieures à celles de la station de Ouagadougou dans l'intervalle de temps 10h00-19h00. Au cours de cette saison, le minimum des valeurs de foF2 sur les graphes se localise à 05h00 dans les deux stations.

En été, on observe une variation des courbes quasi-identique à celle du panneau b sauf qu'on y remarque un petit gap dans l'intervalle 07h00-10h00.

La figure 4.3.d qui renseigne l'automne présente un profil noon bite out produit par les deux courbes. Il existe un retard entre les deux graphes au niveau de pic de matin, ce pic intervient à 09h00 avec un creux localisé à 11h00 à la station de Ouagadougou alors qu'à la station de Dakar, le pic est observé à 11h00 et le creux se localise à 13h00.

Il convient de signaler aussi l'écart très important enregistré entre les deux courbes dans l'intervalle de temps 09h00-20h00 et surtout la présence d'un pic de nuit observé sur le graphe des données de Ouagadougou.

Au cours de cette même période, les graphes de deux stations présentent une évolution de variation similaire dans l'intervalle de temps 00h00-09h00.

Il ressort de cette analyse qu'au minimum solaire, et lors de la période calme, un fort électrojet est observé à la station de Ouagadougou, ce pendant à la station de Dakar, on note la présence d'un électrojet moyen, d'un fort électrojet, et d'un fort contre électrojet au cours de différentes saisons.

Compte tenu des caractéristiques quasi identiques des courbes de la période calme avec celles de la période fluctuante, les figures de cette dernière n'y sont pas représentées.

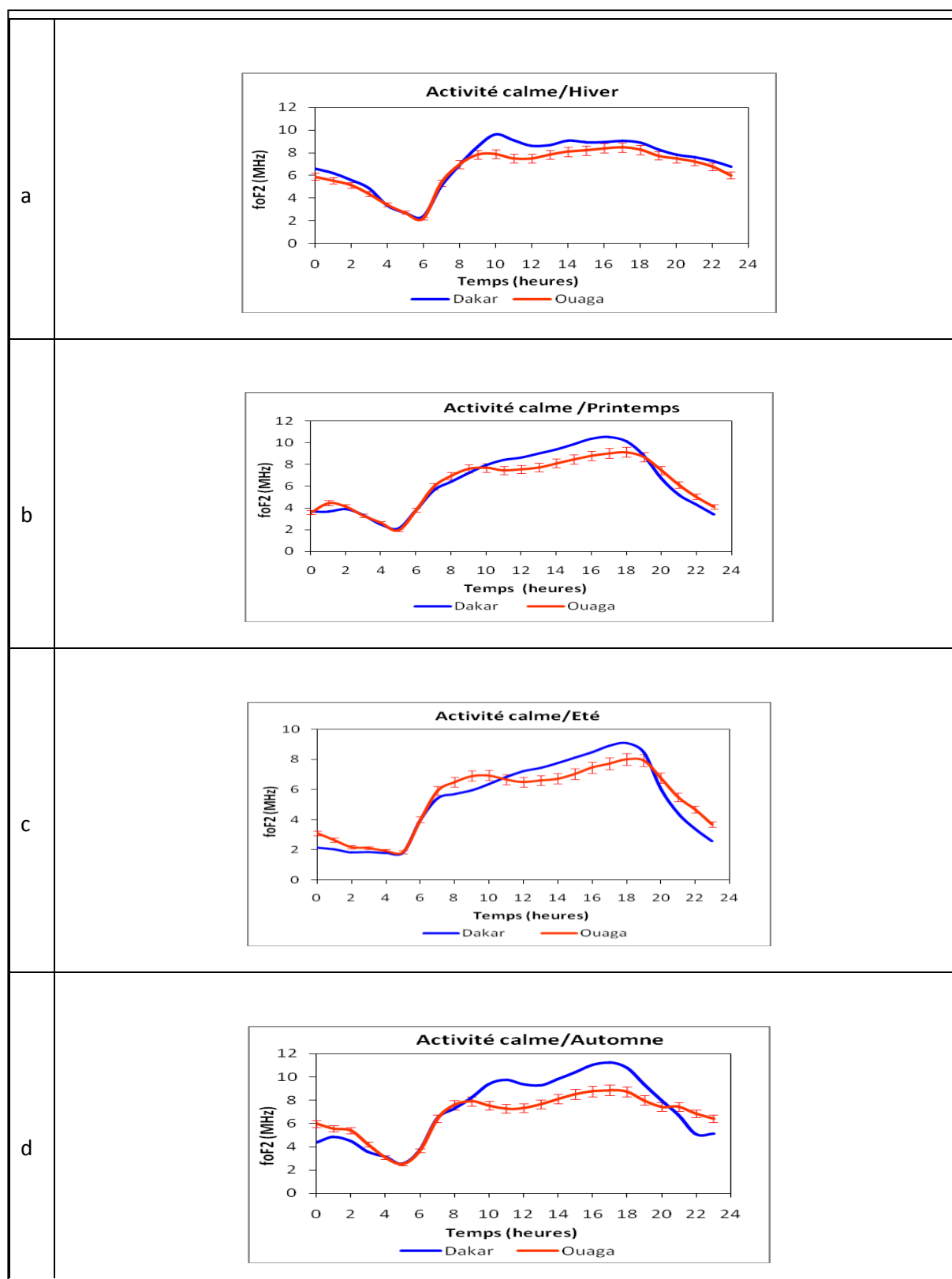


Figure 4. 3 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase minimum à la station de Dakar et Ouagadougou en période calme en fonction de différentes saisons.

La figure 4.4 concerne les jours perturbés (chocs et récurrents) au minimum solaire.

A travers le panneau 4.a (hiver, période de choc), les données de la station de Ouagadougou montrent un profil de type noon bite out au moment où on observait un léger plateau de 10h00-15h00 suivi d'un creux à 16h00 à la station de Dakar; au cours de ce même intervalle, les valeurs de foF2 de Dakar surestiment celles de la station de Ouagadougou.

Les deux graphes atteignent le maximum du matin à 10h00 et exhibent un pic de nuit autour de 20h00.

La figure 4.4.b est réservée au printemps pendant les jours de choc. Sur cette figure, un gap important existe entre les deux courbes à partir de 10h00. Les deux graphes semblent décrire un parcours similaire montrant ainsi un profil de type inverse. A la station de Dakar, le maximum de pic se localise à 17h00 (11,62 MHz) et à la station de Ouagadougou, ce maximum est observé à 18h00 (9,19 MHz). Le pic de nuit s'observe sur les deux graphes à la même période (22h00).

Le panneau c de la figure 4.4 correspond au printemps pendant les jours récurrents. L'écart entre les deux graphes persiste et reste toujours lors de cette période et ceci dans l'intervalle de temps 09h00-20h00. Le profil de type plateau est observé à la station de Ouagadougou, cependant à Dakar, on observe le profil inverse avec un maximum de pic localisé à 18h00 avec une valeur de 10,8 MHz. Lors de cette saison, on note la présence d'un pic de nuit à 21h00 à la station de Ouagadougou.

Le dernier panneau de notre figure est consacré à l'automne lors de l'activité récurrente.

Pendant les jours perturbés, les deux graphes montrent clairement le profil noon bite out prouvant la signature de la dérive verticale. Sur la courbe issue des données de Ouagadougou, le pic de matin intervient à 10h00 (8,9 MHz) suivi d'un creux localisé à 12h00; cependant à la station de Dakar, le pic de matin se localise à 11h00 (10,77 MHz) avec un creux à 13h00. Les deux courbes exhibent un gap important dans l'intervalle de temps 10h00-19h00.

Le graphe de Dakar permet de montrer la signature de pré renversement de champ électrique.

L'analyse de l'étude statistique de la variation diurne de foF2 en phase minimum à travers les différentes activités géomagnétiques à la station de Dakar et celle de Ouagadougou montre que:

A la station de Dakar, les graphes de l'hiver présentent globalement un profil de type pic de matin à l'exception des jours de choc où un léger plateau semble se dessiner; le profil de type inverse est enregistré au printemps et en été; celui du type noon bite out est observé en automne. Cependant à la station de Ouagadougou, on note une domination du profil noon bite

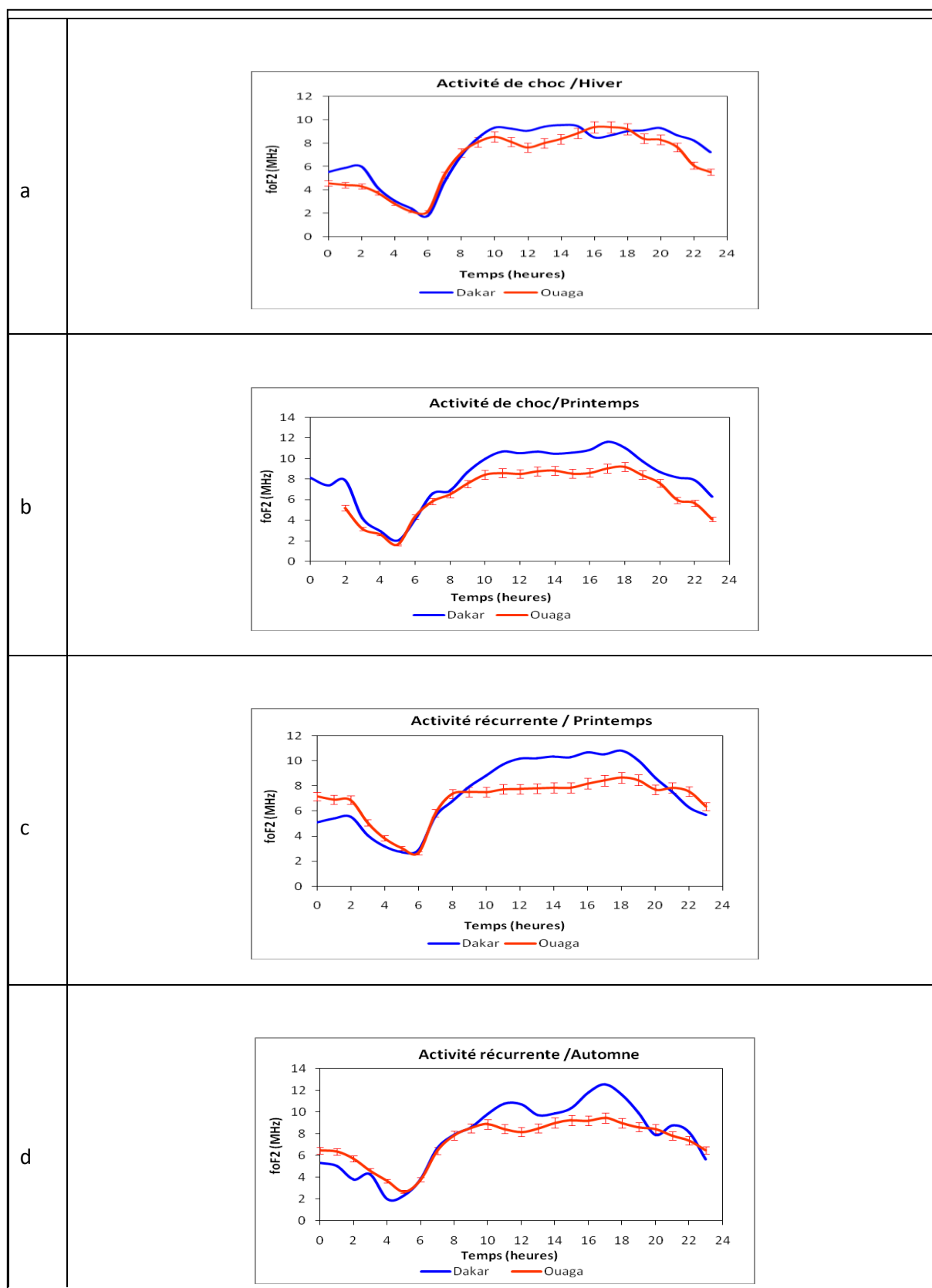


Figure 4. 4 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase minimum à la station de Dakar et Ouagadougou en période de choc (panneaux a et b) et période récurrente (panneaux c et d) en fonction de différentes saisons.

out durant les différentes saisons, mis à part les graphes du printemps qui montrent lors des jours perturbés (chocs et récurrents) d'autre type de profils.

Il importe de noter qu'on observe une variabilité journalière similaire de foF2 dans l'intervalle de temps 00h00-09h00. Mais à partir de 09h00, les valeurs de foF2 issues des données de la station de Dakar présentent un écart important et ceci jusqu'au tour de 20h00.

Cette observation témoigne de la position de la station de Ouagadougou par rapport à celle de Dakar. En effet, la station de Ouagadougou se situe dans le creux de l'anomalie d'ionisation équatoriale alors celle de Dakar se trouve aux abords de la crête.

4.3.1.2. Variabilité en phase ascendante

Compte tenu des caractéristiques quasi identiques des courbes de la période fluctuante avec celles de la période calme, les figures de cette dernière n'y sont pas représentées.

Toute fois, il importe de signaler une petite particularité observée en hiver lors de la période calme. En effet, au cours de cette saison on observe un profil de pic de matin témoignant la présence d'un électrojet moyen au lieu d'en avoir un profil plateau qui caractérise l'absence de ce courant.

La figure 4.5 est consacrée aux jours fluctuants lors de la phase ascendante. En hiver, les courbes des données de Dakar semblent décrire un profil plateau alors que celles des données de Ouagadougou présentent un noon bite out avec un pic de soir peu prononcé. Les deux graphes sont quasiment identiques dans l'intervalle de temps 00h00-09h00 et montrent le minimum des valeurs de foF2 à 06h00.

Le pic de matin se situe à 09h00 (8,88 MHz) et celui du soir se localise à 17h00 (9,33 MHz) à la station de Ouagadougou.

Les graphes du printemps et de l'été qui sont représentés respectivement au panneau b et c de la figure 4.5 montrent une variabilité de foF2 un peu similaire à travers les données.

A la station de Dakar, au cours de ces deux saisons, on observe un profil inverse qui caractérise la présence d'un fort contre électrojet tandis que la signature de la dérive verticale témoignant la présence d'un fort électrojet persiste à la station de Ouagadougou.

Du lever au coucher du soleil, on remarque une tendance croissante des valeurs de foF2 sur les courbes de ces deux saisons à la station de Dakar avec un maximum d'ionisation atteint à 17h00.

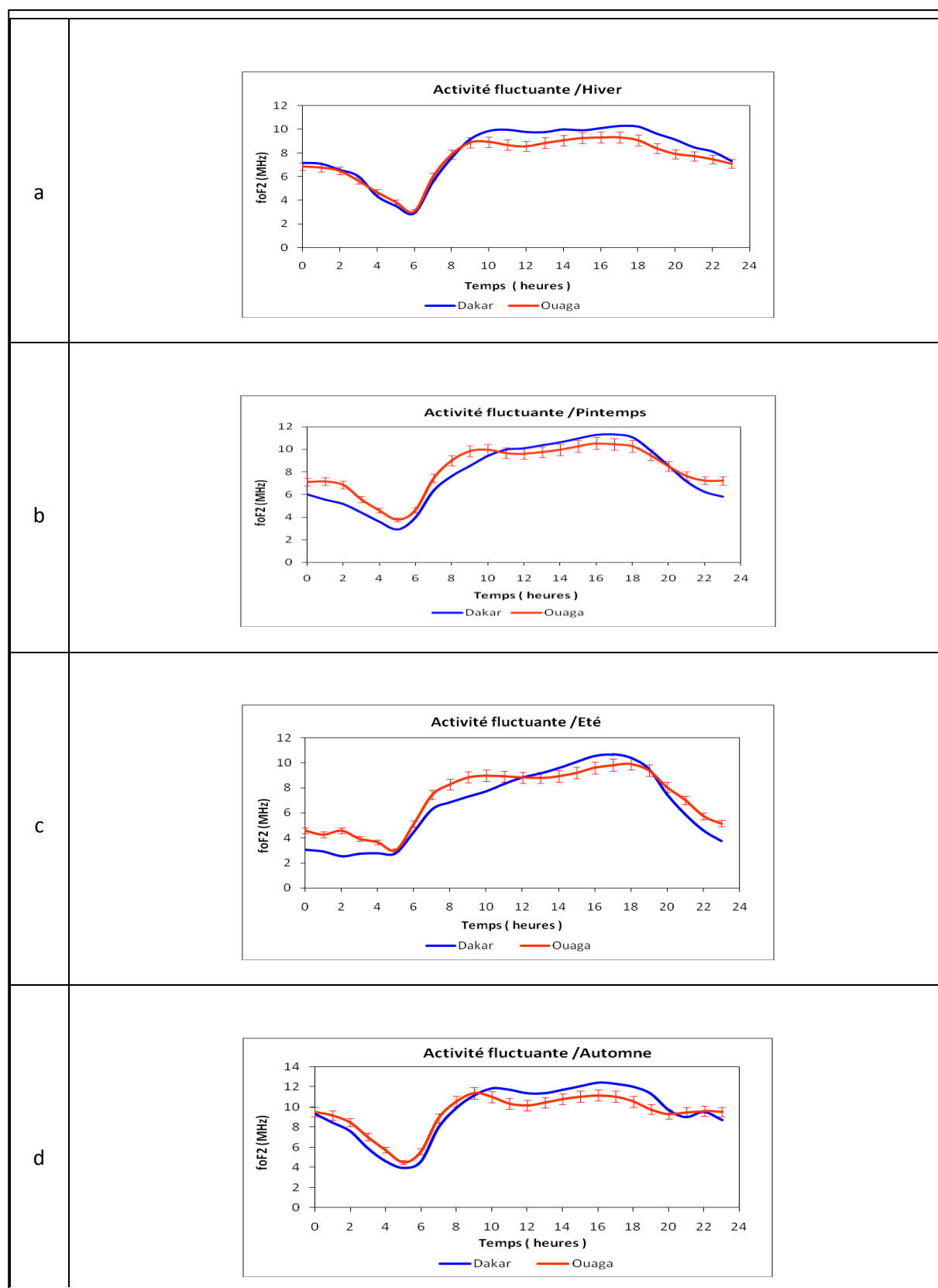


Figure 4. 5 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase croissante durant l'activité fluctuante à la station de Dakar et Ouagadougou en fonction de différentes saisons.

A la station de Ouagadougou, les courbes du printemps et de l'été présentent le pic de matin à la même période (10h00) avec respectivement 9,94 MHz et 8,98 MHz comme valeurs du pic avec un creux situé entre 12h00-13h00; mais on note un léger décalage entre les pics de soir.

Les graphes d'automne qui sont représentés à la figure 4.5.d continuent de montrer le profil noon bite out. Toujours dans l'intervalle de temps 00h00-09h00, l'évolution des courbes est quasiment la même. Le pic de matin est observé à 09h00 à la station de Ouagadougou; cependant, à Dakar ce pic se localise à 10h00.

La principale différence entre les deux graphes est la présence d'un pic de nuit observé sur la courbe de la station de Dakar.

Il peut être retenu lors de cette période qu'à la station de Ouagadougou, les courbes des données de foF2 présentent le profil de type noon bite out, alors qu'à la station de Dakar, on observe divers types de profils : le noon bite out est enregistré en automne, le profil du type inverse est observé en été et au printemps, et le graphe de l'hiver montre un profil de type plateau.

La figure 4.6 correspond aux jours perturbés durant les différentes saisons. Les panneaux a et b sont consacrés à l'activité de choc et les panneaux c et d concernent les jours récurrents.

En hiver, lors de la période de choc (panneau a), le profil de type noon bite out se produit sur les courbes de deux stations avec un pic de soir très peu prononcé de deux cotés. Le creux est localisé à 12h00 sur le graphe de Ouagadougou; cependant à la station de Dakar, il se produit à 14h00 suivi d'un pic de nuit localisé à 22h00.

La figure 4.6.b concerne le printemps lors de l'activité de choc. Sur cette figure, on observe un profil de pic d'après midi à la station de Dakar avec un maximum de pic localisé à 17h00(12,38 MHz) ; cependant à la station de Ouagadougou, le profil semble être de type dôme. Durant cette saison, les deux graphes présentent un pic de nuit localisé aux alentours de 21h00.

En été, lors des jours récurrents (panneau c), on observe à la station de Dakar un profil de type inverse avec un maximum d'ionisation localisé à 18h00 (11,75 MHz), alors qu'à la station de Ouagadougou, les données de foF2 produisent un profil de type pic de matin où le pic majeur se situe à 10h00 (10,55 MHz). Le graphe de Dakar exhibe un pic de nuit à 21h00.

Le dernier panneau de la figure 4.6 est dévolu à l'automne. Les données de deux stations présentent une variabilité journalière similaire de foF2 au cours de cette saison. A la station de Ouagadougou, la courbe décrit un profil de type noon bite out avec un pic de soir très peu

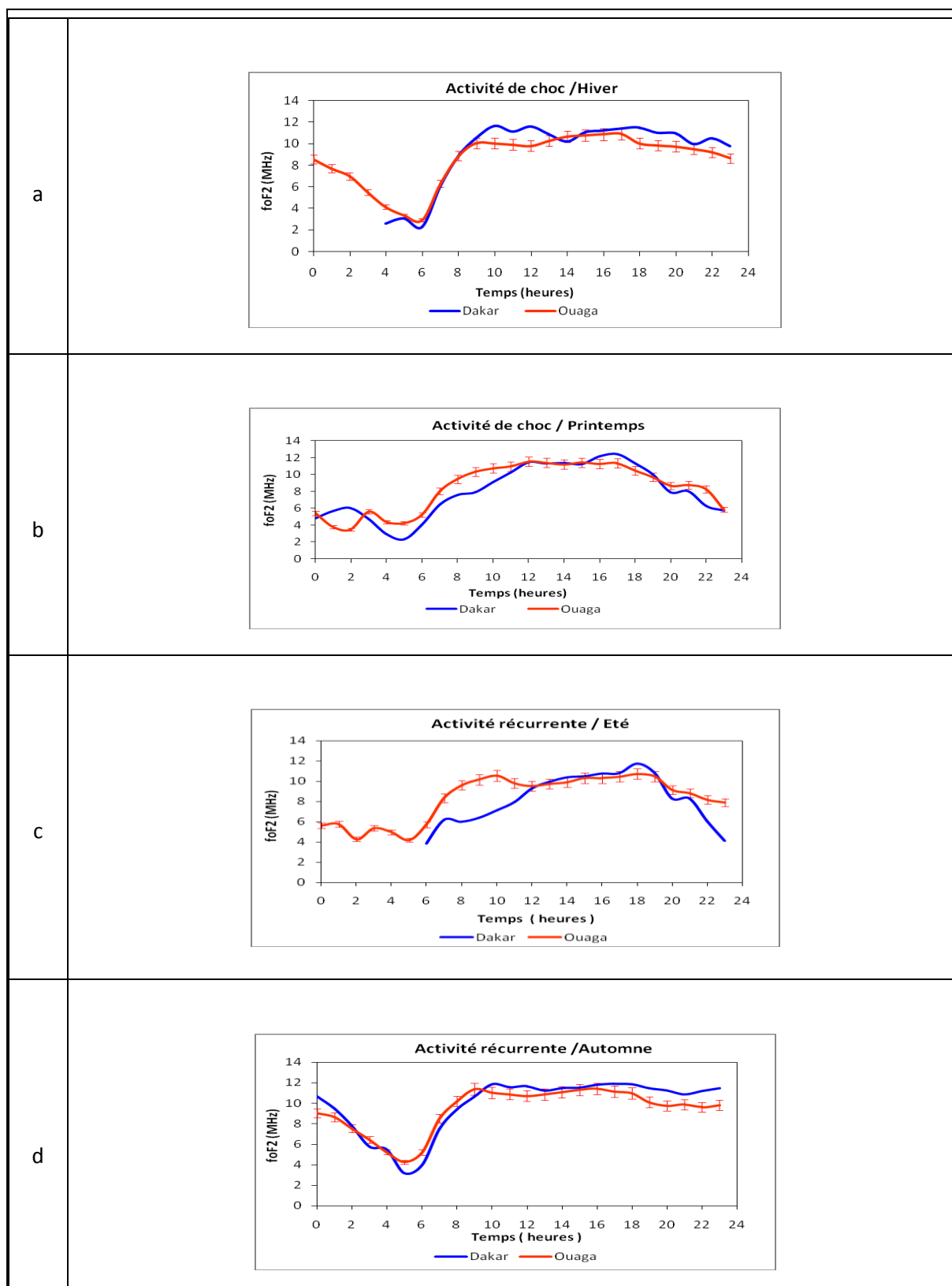


Figure 4. 6 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase croissante durant les périodes perturbées, les panneaux a et b (l'activité de choc) et les panneaux c et d (l'activité récurrente) à la station de Dakar et Ouagadougou en fonction de différentes saisons.

prononcé suivi d'un pic de nuit localisé à 21h00; tandis qu'à la station de Dakar, on observe un léger plateau.

En résumé lors de la phase ascendante, les observations suivantes peuvent être retenues:

En dehors des jours de choc au printemps, le profil noon bite out est observé globalement à la station de Ouagadougou. Cependant à Dakar, les graphes du printemps et de l'été montrent le profil de type inverse, la signature de la dérive verticale demeure toujours en automne excepté les jours perturbés (choc et récurrents); grâce aux graphes de l'hiver, nous enregistrons divers types de profils au cours de cette phase.

4.3.1.3. Variabilité en phase maximum

La figure 4.7 correspond au maximum solaire durant les jours calmes.

Le panneau a qui concerne l'hiver montre que les profils de foF2 présentent une variabilité journalière similaire avec des valeurs légèrement élevées à la station de Dakar en dehors de l'intervalle de temps 06h00-09h00. Le graphe de Dakar montre un pic de nuit à 22h00. Au cours de cette saison, on observe le profil de type pic de matin où le pic majeur est localisé à 10h00 avec une valeur de 14,29 MHz. Les données de foF2 issues de la station de Ouagadougou produisent un profil noon bite out avec un pic de soir très peu prononcé, tendant vers un profil de type pic de matin.

Une situation similaire semble se produire à la station de Ouagadougou à travers le panneau b qui correspond au printemps, c'est-à-dire la présence du profil noon bite out avec un pic de soir peu prononcé; mais on remarque que le pic de nuit change de position et se retrouve sur la courbe de Ouagadougou à la même période. Un véritable profil plateau prouvant l'absence d'électrojet s'observe sur le graphe de Dakar. Il importe de noter que lors de cette saison et au cours de cette période, les données de Ouagadougou montrent la plus grande valeur de foF2 (13,18 MHz). Cette valeur est localisée à 09h00.

La figure 4.7c renseigne sur l'été. L'analyse de cette figure montre que les données de Ouagadougou présentent le profil noon bite out. Le premier pic est observé à 09h00 (10,86 MHz) et le second pic est localisé à 17h00 (10,77 MHz). Cependant les données de Dakar montrent le profil dôme avec un maximum d'ionisation atteint autour de 17h00.

L'automne par l'intermédiaire de la figure 4.7.d permet d'observer le noon bite out produit par les données de deux stations. Les deux courbes présentent globalement des tendances assez proches. A la station de Ouagadougou, le pic de matin se localise à 09h00, alors qu'à la station de Dakar ce pic se situe à 10h00. Le graphe issu des données de Dakar exhibe un pic

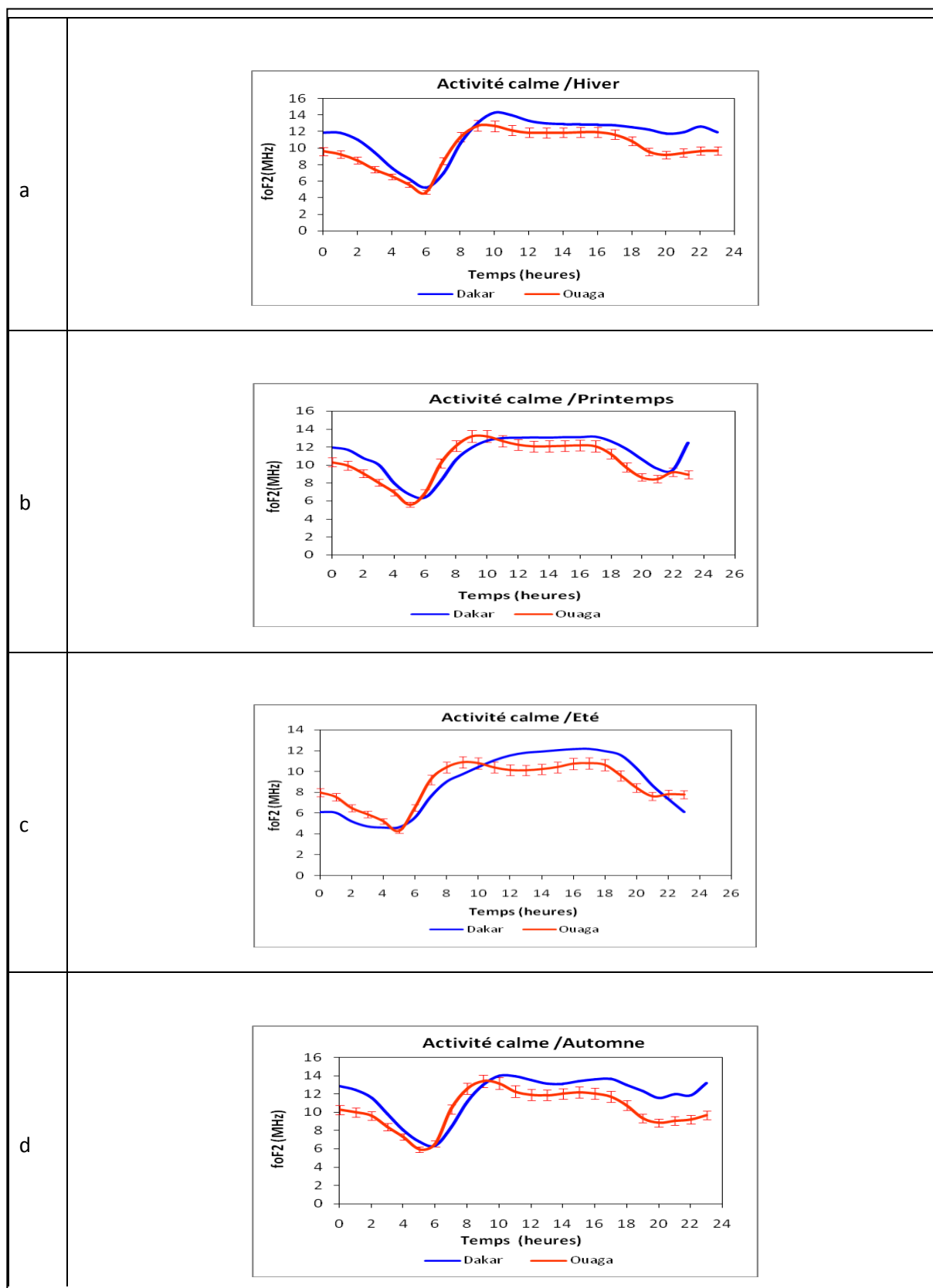


Figure 4. 7 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase maximum durant les jours calmes, le panneau a (hiver), le panneau b (printemps), le panneau c (été) et le panneau d (automne) à la station de Dakar et Ouagadougou.

de nuit à 21h00.

Il peut être résumé lors de cette phase et en période calme que les données de Ouagadougou présentent globalement un profil de type noon bite out avec un pic de soir très peu prononcé tendant vers celui de type pic de matin; cependant à Dakar, on observe clairement un profil pic de matin en hiver, un profil inverse en été et au printemps, et un noon bite out en automne. Mis à part l'intervalle de temps 05h00-10h00, il est nécessaire de signaler que les valeurs de foF2 de Dakar sont supérieures à celles de Ouagadougou.

Pendant le maximum solaire, compte tenu des caractéristiques quasi identiques des courbes de la période calme avec celles de la période fluctuante, les figures de cette dernière n'y sont pas représentées.

Les graphes de l'activité de choc sont représentés à la figure 4.8. L'analyse du panneau a de cette figure (hiver) montre la présence d'un électrojet moyen au cours de cette période et durant cette phase. Les maximums des valeurs de foF2 s'observent à 10h00 (14,37 MHz) et à 09h00 (13,16 MHz) respectivement à la station de Dakar et de Ouagadougou. A la station de Dakar, on note une phase de pré renversement du champ électrique.

Les valeurs de foF2 à la station de Dakar sont légèrement supérieures à celles de Ouagadougou, excepté l'intervalle de temps 07h00-09h00 où les deux courbes sont confondues.

En ce concerne la figure 4.8b (le printemps), le profil pic de matin est observé à la station de Ouagadougou avec la plus grande valeur de foF2 atteinte à 10h00 (13,85 MHz). Les données de foF2 issues de la station de Dakar semblent produire un profil de type plateau.

La figure 4.8.c qui concerne l'été montre clairement l'absence d'électrojet; mais les courbes de deux stations produisent de profils différents. Le graphe de Dakar présente un profil dôme au moment où celui de Ouagadougou produisait celui de type plateau.

Dans l'intervalle de temps 05h00-11h00, les valeurs de foF2 issues de la station de Ouagadougou sont supérieures à celles de Dakar, mais à partir de 11h00, la situation s'inverse et ceci jusqu'à 23h00.

A la station de Dakar, au maximum solaire, lors des jours de choc, le graphe d'automne représenté au panneau d continue de montrer l'absence d'électrojet et la présence d'un pic de nuit. Cependant, à la station de Ouagadougou, il apparaît un noon bite out avec un pic de soir très peu prononcé tendant vers la morphologie du profil observé au printemps.

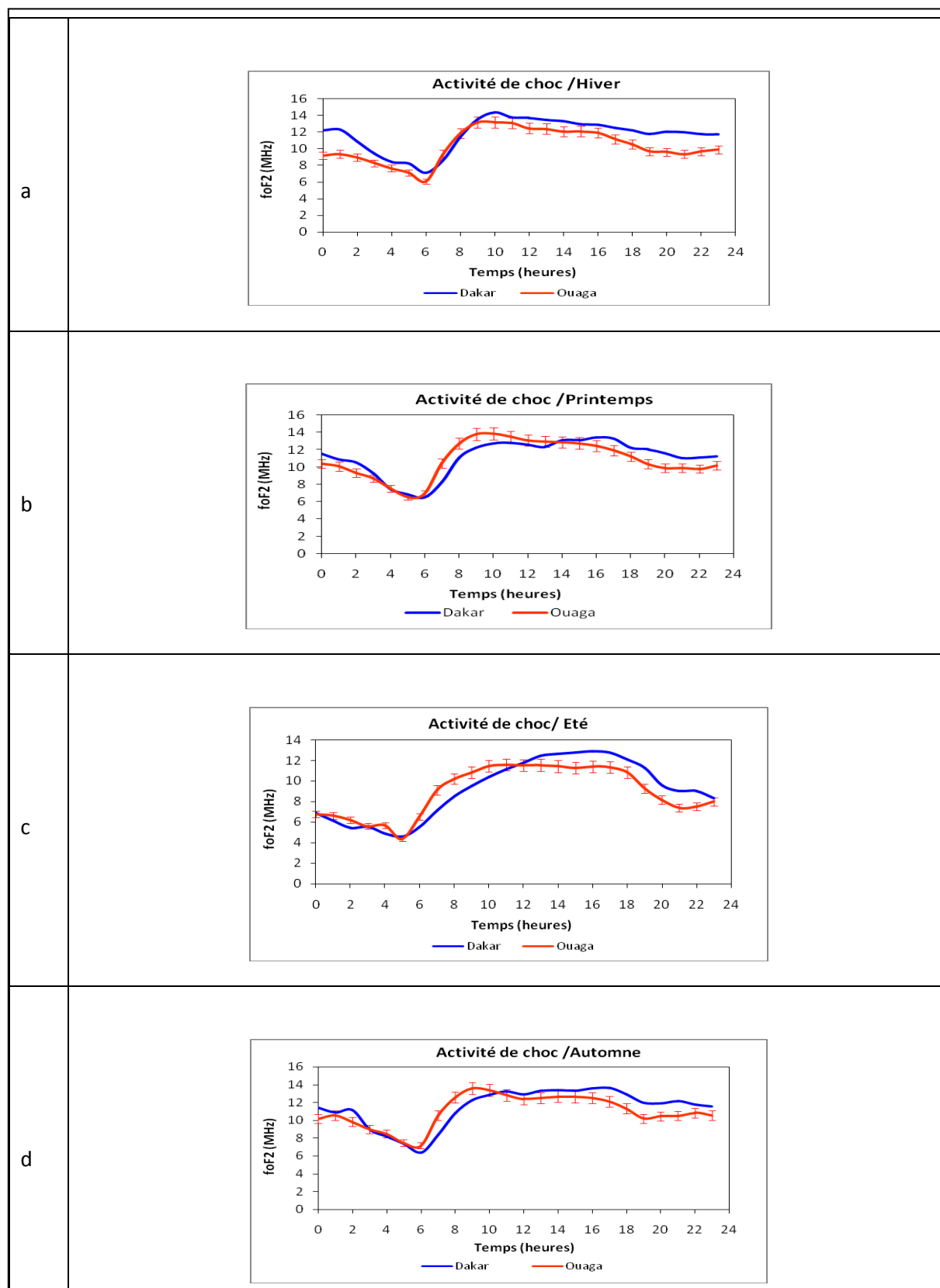


Figure 4. 8 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase maximum durant les jours de choc, le panneau a (hiver), le panneau b (printemps), le panneau c (été) et le panneau d (automne) à la station de Dakar et Ouagadougou.

La figure 4.9 renseigne sur l'activité récurrente au maximum solaire. Au printemps, (panneau a) les deux courbes présentent une variation similaire de foF2. Les deux graphes donnent le même type de profil : c'est le profil de type plateau qui caractérise l'absence de l'électrojet. Il convient de noter l'existence d'un gap entre les courbes aux périodes suivantes : 06h00-10h00 et 17h00-02h00.

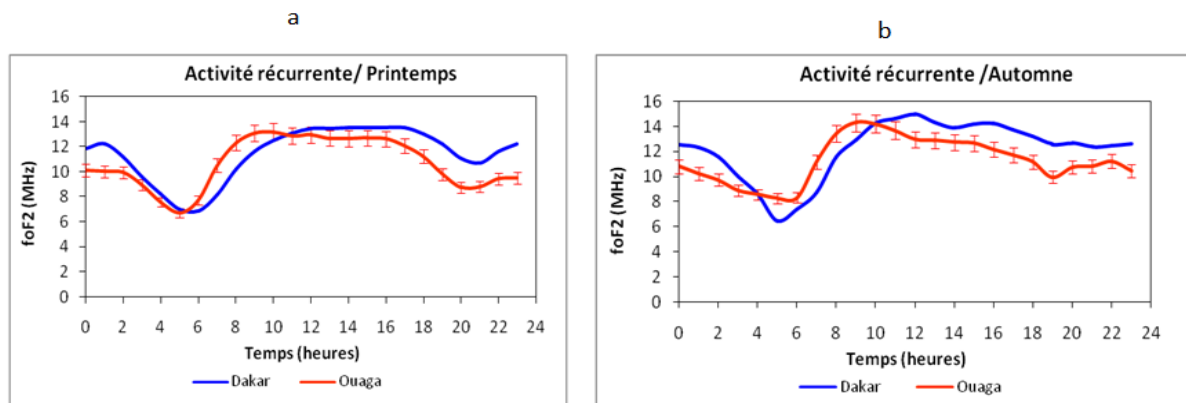


Figure 4. 9 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase maximum durant les jours récurrents, au panneau a (le printemps), au panneau b (l'automne) à la station de Dakar et Ouagadougou.

La signature de la dérive verticale et celle de pré renversement du champ électrique sont toujours observées en automne (panneau b). Ce sont les données de foF2 issues de la station de Dakar qui sont à l'origine de ces deux signatures.

A la station de Ouagadougou, le profil pic de matin est observé avec un pic majeur localisé à 09h00 (14,31 MHz), suivi d'un pic à 22h00. Alors qu'à la station de Dakar, nous observons un profil noon bite out où les deux pics majeurs se localisent respectivement à 12h00 (14,97 MHz) et à 16h00 (14 MHz); et le creux se situe à 14h00.

Lors de maximum solaire, les observations suivantes peuvent être retenues :

En hiver, les données de foF2 issues de la station de Dakar produisent le profil pic de matin alors que les graphes issus des données de Ouagadougou montrent globalement le profil noon bite out.

Au printemps, les graphes de Dakar montrent clairement le profil de type plateau au moment où ceux de Ouagadougou présentaient un noon bite out à l'exception des jours de choc et récurrents.

En été, le profil dôme est observé à Dakar alors que les graphes des données de Ouagadougou montrent le profil noon bite out à l'exception des jours de choc.

En dehors toujours des jours de choc et récurrents, les graphes d'automne permettent aux deux stations de montrer simultanément un même type de profil : c'est celui de noon bite out avec un pic de soir très peu prononcé à la station de Ouagadougou.

A la station de Dakar, le pic de nuit s'observe généralement en hiver et en automne; cependant à Ouagadougou, ce type de pic se produit en automne.

4.3.1.4. Variabilité en phase descendante

La figure 4.10 correspond à la variation diurne de foF2 à la station de Dakar et Ouagadougou durant les cycles solaires 21-22 lors des jours calmes.

Sur le graphe d'hiver (figure 4.10.a), on peut noter la présence d'un double pic presque symétrique à Ouagadougou avec un premier pic localisé à 09h00 (9,77 MHz) au moment où le second a lieu à 17h00 (9,98 MHz); cependant à Dakar on observe un léger plateau. Mis à part l'intervalle 07h00-10h00, les valeurs de foF2 de Dakar sont légèrement supérieures à celles de Ouagadougou.

Au printemps (panneau b), la signature de la dérive verticale caractérisant un profil noon bite out persiste et reste toujours à Ouagadougou; alors qu'à Dakar, nous enregistrons la présence d'un fort contre électrojet.

A la station de Dakar, le maximum d'ionisation s'observe à 18h00 avec une valeur de 11,42 MHz; alors qu'à Ouagadougou, ce maximum intervient avec une légère avance (17h00).

Une situation similaire des tendances sur les profils se produit en été (panneau c), mais on remarque une diminution d'ionisation au cours de cette saison. Les graphes de deux stations conservent les mêmes types de profil et montrent leur maximum d'ionisation à la même période que lors de la saison précédente (printemps).

Le panneau d de la figure 4.10 qui concerne l'automne affiche clairement un seul type de profil : c'est celui de noon bite out caractérisant la présence d'un fort électrojet. Les deux graphes présentent le premier pic à 09h00 (9 MHz) et à 11h00 (10,17 MHz) respectivement à la station de Ouagadougou et de Dakar; quant au second pic, ils le montrent à la même période (17h00) avec des valeurs respectives de 9,6 MHz et 11,22 MHz. Un gap important existe entre les deux graphes.

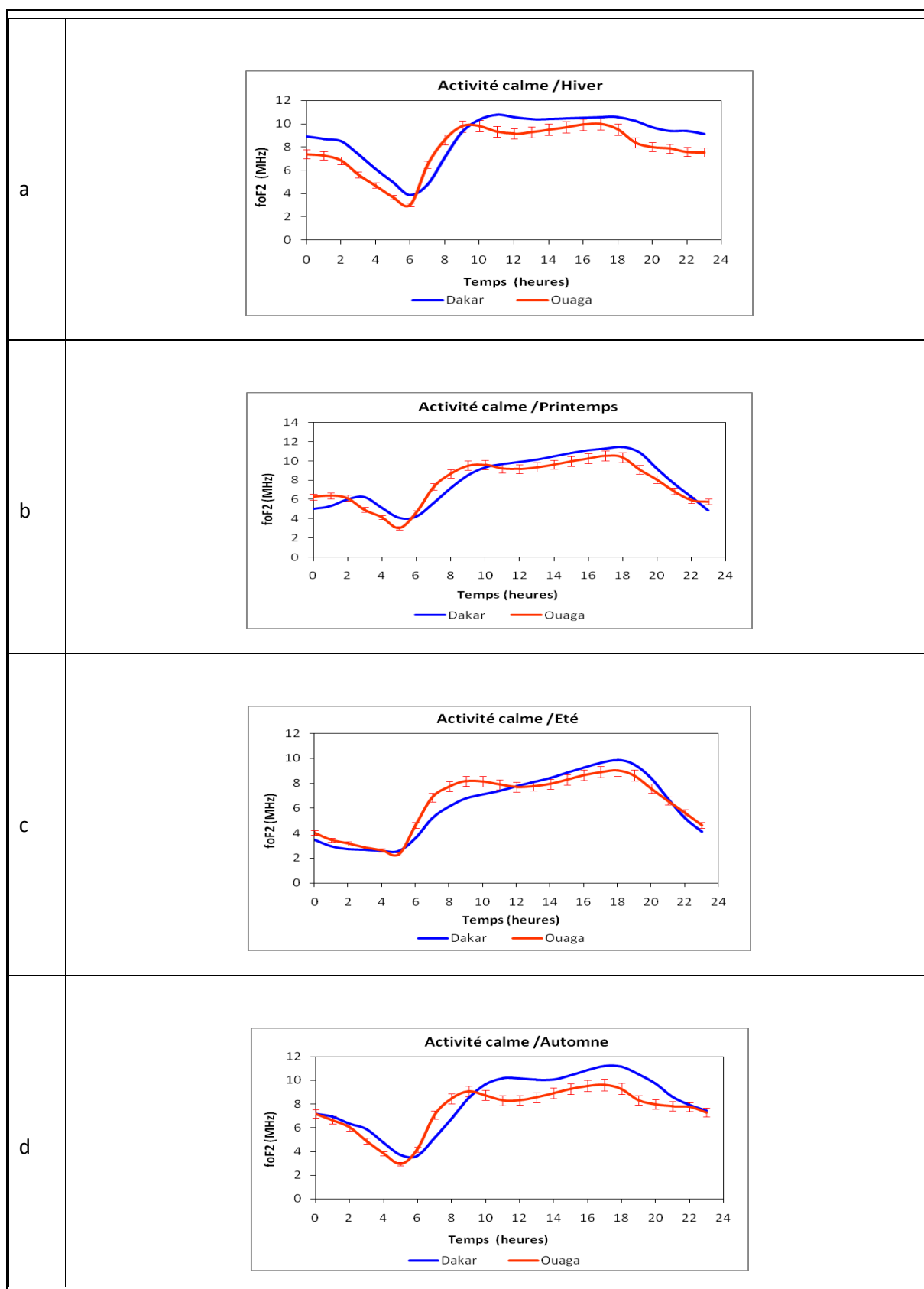


Figure 4. 10 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase décroissante durant les jours calmes, le panneau a (hiver), le panneau b (printemps), le panneau c (été) et le panneau d (automne) à la station de Dakar et Ouagadougou.

La figure 4.11 correspond aux jours perturbés (choc et récurrent) lors de la phase de déclin à la station de Dakar et Ouagadougou à travers les saisons.

L'analyse de la figure 4.11.a (période de choc, printemps) montre un profil de type plateau à la station de Ouagadougou. Cependant à Dakar, nous observons un léger dôme avec un maximum d'ionisation intervenant à 17h00 (11,59 MHz). Ces deux profils caractérisent l'absence d'électrojet au cours de cette période.

Dans l'intervalle de temps 07h00-11h00, les valeurs de foF2 issues des données de la station de Ouagadougou sont plus élevées que celles mesurées à la station de Dakar ; et la situation s'inverse totalement le soir (16h00-22h00).

Les graphes d'été qui sont représentés au panneau b montrent des profils un peu similaires que lors de la saison précédente (printemps) pendant les jours de choc.

Le profil de type plateau se maintient à Ouagadougou; mais à Dakar, on observe le profil de type inverse à travers cette saison. Toute fois, en été, on remarque une diminution des valeurs de foF2.

A la station de Dakar, le maximum de pic de soir sur le graphe intervient à 18h00 (9,98 MHz). Les graphes des jours récurrents sont représentés aux panneaux c et d.

Au printemps (panneau c), on observe un léger dôme à la station de Dakar contre un profil noon bite à Ouagadougou. Pour ce dernier profil, le pic de matin se localise à 09h00 (10,1 MHz) et le pic de soir intervient à 17h00 (10,66 MHz), et le creux est observé à 12h00.

A la station de Ouagadougou, on observe un pic de nuit qui indique une phase de pré-renversement du champ électrique.

En automne (panneau d), à travers les jours récurrents, les graphes de deux stations permettent de montrer simultanément le même type de profil : c'est le profil noon bite out. Pour la station de Ouagadougou, le premier pic est observé à 09h00 (9,95 MHz), et le second pic est localisé à 15h00 (10,55 MHz). Cependant, à la station de Dakar, le pic de soir intervient à 16h00 (12,31 MHz) au moment où celui du matin a lieu à 11h00 (10,77 MHz). Le graphe de cette dernière station permet de noter la signature de pré renversement du champ électrique au cours de cette saison.

En résumé on peut mentionner lors de la phase décroissante que, en dehors des jours de choc, le profil noon bite out est observé à la station de Ouagadougou. Cependant à la station de Dakar, on enregistre divers types de profil aux différentes saisons: (1) les graphes de l'hiver présentent le profil pic de matin tendant vers celui de type plateau; (2) au printemps, on note

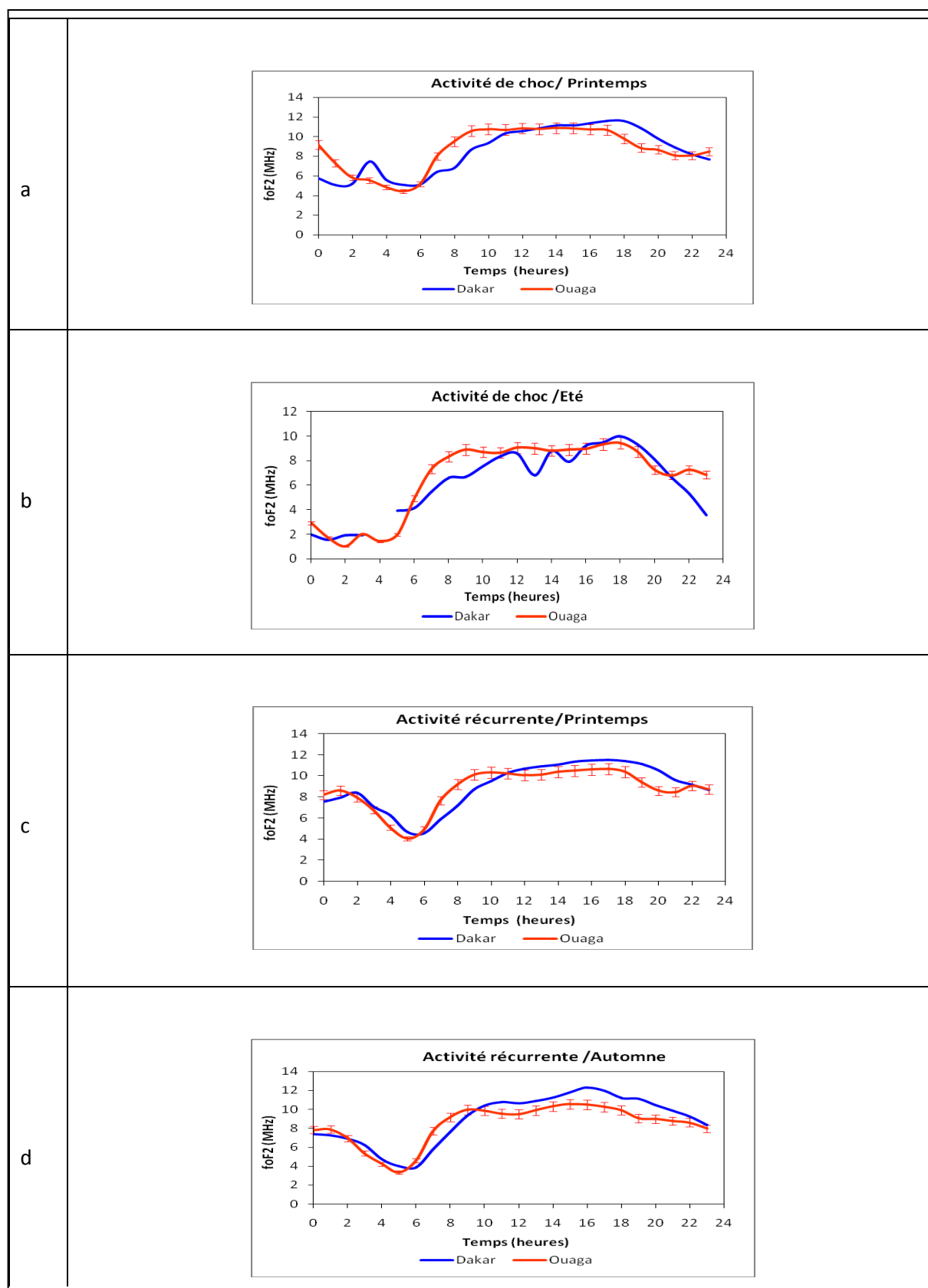


Figure 4. 11 : Variation diurne du paramètre foF2 en phase décroissante durant les jours perturbés; les panneaux a et b (activité de choc) et les panneaux c et d (activité récurrente) à la station de Dakar et Ouagadougou en fonction des saisons.

la présence du profil dôme; (3) le profil inverse est observé en été; et (4) les graphes d'automne montrent le profil noon bite out avec une pré dominance pic d'après midi.

Globalement excepté l'été, où un gap existe entre 06h00-12h00 sur les graphes de deux stations, ailleurs ce gap est observé dans l'intervalle de temps 06h00-10h00. Au cours de la journée (10h00-22h00), les valeurs de foF2 issues des données de la station de Dakar sont légèrement supérieures à celles de Ouagadougou; et dans l'intervalle de temps 00h00-06h00, les graphes de deux stations présentent une variabilité similaire de foF2.

4.3.2. Synthèse

L'étude statistique comparative de la variation diurne du paramètre foF2 durant les cycles solaires 21-22 dans les deux stations permet de noter les observations suivantes :

En période de calme magnétique, à la station de Ouagadougou, un seul type de profil a été observé : C'est le profil noon bite out avec une prédominance pic de matin ou soir ; cependant à Dakar, on note divers profils qui varient selon les saisons; ainsi, le profil pic de matin est observé en hiver, celui de noon bite out se produit en automne; et le profil inverse est enregistré en été et au printemps en dehors de la phase maximum où le graphe de l'été présente un profil dôme et celui du printemps un plateau.

Lors des jours perturbés (période fluctuante), les courbes présentent des caractéristiques similaires à celles des jours calmes à la station de Ouagadougou; mais à Dakar, les graphes de l'hiver montrent parfois le profil de type plateau.

Pendant les jours de choc, les graphes de deux stations montrent de profils divers à travers les différentes phases du cycle solaire durant les saisons.

Lors des jours récurrents, à la station de Ouagadougou, on enregistre le profil noon bite out à travers les différentes phases du cycle solaire à l'exception de maximum solaire; cependant à Dakar, divers types de profils sont observés.

En dehors des jours de choc, il importe de signaler qu'en automne, les graphes de différents panneaux présentent généralement le même type de profil : c'est celui de type noon bite out.

Il ressort de cette analyse l'existence d'un gap important entre les graphes de deux stations au minimum solaire dans l'intervalle de temps 10h00-19h00. Ce gap diminue légèrement lors des autres phases du cycle solaire; mais il s'affiche clairement en automne durant la phase décroissante.

La différence significative des profils observés entre la station de Dakar et celle de Ouagadougou avait été attribuée d'une part à la variation longitudinale Ouattara et al. (2012),

et d'autre part aux positions relatives de ces deux stations par rapport à l'équateur magnétique Gnahou et al. (2013).

4.4. Conclusion

Ce chapitre qui a pour principal objectif de mener une étude statistique comparative du paramètre foF2 entre la station de Dakar et celle de Ouagadougou laisse apparaître une différence significative de profil entre les deux stations. Le profil de type noon bite out domine à la station de Ouagadougou quelle que soit la phase du cycle solaire; tandis qu'à la station de Dakar, divers types de profil sont observés lors des saisons; le profil de type pic de matin tendant vers un plateau est observé généralement en hiver ; excepté la phase maximum où les graphes d'été présentent un profil dôme et ceux du printemps un plateau, le profil inverse s'observe globalement au cours de ces deux saisons; la signature de la dérive verticale s'exprime en automne dans les deux stations, sauf son effet est parfois perturbé lors de l'activité de choc à Dakar (due certainement aux effets de CMEs). Il importe de souligner également l'existence d'un gap observé entre les profils horaires de deux stations.

Le bref rappel de l'étude statistique de foF2 à la station de Ouagadougou permet de confirmer la domination de profil de type noon bite out et la mise en évidence de l'anomalie d'hiver et de l'asymétrie équinoxiale. Il ressort également de l'analyse de cette étude des très faibles valeurs de foF2 en été ; et l'automne se caractérise en montrant le pic de nuit à travers les différents graphes.

ARTICLE II (Ouattara et al., 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.

Ouattara Frédéric, Ali Mahamat Nour and Zougmore François.

European Scientific Journal August 2015 edition vol.11, No.24 ISSN: 1857-7881 (Print)

e-ISSN 1857 -7431

A COMPARATIVE STUDY OF SEASONAL AND QUIETTIME foF2 DIURNAL VARIATION AT DAKAR AND OUAGADOUGOU STATIONS DURING SOLAR MINIMUM AND MAXIMUM FOR SOLAR CYCLES 21-22

Ouattara Frédéric, PhD Prof.

Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace (LAREME), Université de Koudougou, Koudougou, Burkina Faso
Laboratoire de Matériaux et Environnement (LAME),
UFR SEA Université de Ouagadougou, Burkina Faso

Ali MahamatNour, MA

Zougmore François, PhD Prof.

Laboratoire de Matériaux et Environnement (LAME),
UFR SEA Université de Ouagadougou, Burkina Faso

Abstract

A statistical study of quiet time foF2 diurnal variation of two West Africa stations (Dakar and Ouagadougou) is examined through seasons and during solar minimum and maximum phases. It is shown that during solar minimum and for all seasons both stations foF2 exhibit the same variability with more and less deep trough between 1200 LT and 1400 LT. foF2 profiles are afternoon predominance profiles except during winter and for Dakar station where the profile is morning predominance peak. During solar maximum, foF2 profiles show different behavior only for spring and summer where Dakar foF2 profiles are plateau profile and dome profile, respectively. For these seasons Ouagadougou profiles are morning predominance profile and noon bite out profile, respectively. At daytime there is more ionosphere at Dakar station than Ouagadougou at all seasons and for the solar cycle phases involved.

Keywords: F2 layer critical frequency, quiet time, seasonal variation, comparative statistical study, solar cycle minimum and maximum phases

Introduction:

To contribute to space weather study and to investigate existing prediction models, the analysis of the statistical variability of ionosphere

parameters is a good means. The present paper focuses on space weather study through foF2 statistical variability. It is performed after foF2 statistical study conducted for an African Equatorial Ionization Anomaly (EIA) by Ouattara and Amory Mazaudier (2012) at Ouagadougou station (Lat: 12.4°N; Long: 358.5°E; dip: +1.43°) and that driven by Ali et al. (2015) at Dakar station (Lat: 14.8°N; Long: 342.6°E, dip: + 8.44°) situated between the crest and the trough of the EIA region of African sector at the trough of ionization. The previous works took into account different geomagnetic conditions but based on the particularity of Dakar station (see Gnabahou et al., 2013a, and Gnabahou et al., 2013b) and the geographic location of stations, we only consider quiet time conditions. This study is also performed under solar minimum and maximum conditions. In future work, the other solar cycle phases and the other geomagnetic classes of activity will be considered. For the present work, section 2 presents the materials and methods, section 3 our results and the paper ends with the discussion and conclusion section.

2. Materials and Methods

The data used in this study concern Dakar station (Lat: 14.8°N; Long: 342.6°E, dip: + 8.44°) in Sénégal and Ouagadougou station (Lat: 12.4°N; Long: 358.5°E; dip: +1.43°) provided by Télécom Bretagne. We analyze foF2 statistical diurnal variation for solar cycles 21-22 that contain part of the operating periods of Ouagadougou and Dakar stations which are 1966-1998 and 1971-1996, respectively. We especially consider the years 1971-1996.

Solar cycle phases are determined by using sunspot number R_z . Solar minimum year is given by $R_z < 20$ and solar maximum year is obtained by taking $R_z > 100$. Keep in mind that for small solar cycles (solar cycles with sunspot number maximum (R_z max) less than 100) the maximum phase is obtained by considering $R_z > 0.8 * R_z$ max.

By using pixel diagrams that are built by means of (1) Mayaud (1971; 1972) geomagnetic index aa daily mean value Aa , (2) the date of Sudden Storm Commencement (SSC) and (3) color code (white and blue colors for quiet time and the other colors (green, yellow, orange, red and olive red) for disturbed time) we identify the four classes of geomagnetic activity. In pixel diagram, quiet time condition is given by $Aa \leq 20 nT$ and disturbed conditions by $Aa > 20 nT$.

Seasons are classified as follows: winter (December, January and February), spring (March, April, May), summer (June, July, August) and autumn (September, October and November). In this classification, equinoctial properties are highlighted by spring and autumn seasons. The properties of solstice are shown by winter and summer seasons.

Statistical hourly foF2 values are evaluated by means of the following equations (for more detail see Ouattara and Amory Mazaudier, 2012; Ali et al., 2015):

$$\text{Solar cycle phase impact: } foF2_{\text{Cycle}}^{\text{Hourly}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} foF2_{\text{Year}}^{\text{Hourly}}}{N_y} \quad (1).$$

Where $foF2_{\text{Year}}^{\text{Hourly}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_m} foF2_{\text{Month}}^{\text{Hourly}}}{N_m}$ corresponds to the mean hourly foF2 value of the considered year and N_y the number of year involved in the considered solar cycle phase. It can be noted that $foF2_{\text{Month}}^{\text{Hourly}}$ is the monthly hourly mean value of foF2 and N_m the number of available months involved in the considered year.

$$\text{Seasonal study impact: } foF2_{\text{Month}}^{\text{Hourly}} = \frac{\sum_{l=1}^{N_d} foF2_{\text{Day}}^{\text{Hourly}}}{N_d} \quad (2).$$

In the precedent equation, $foF2_{\text{Day}}^{\text{Hourly}}$ is an hourly foF2 value for quiet day and N_d the number of quiet day involved in the considered month.

In order to appreciate the difference of foF2 time variation observed in both stations, we use (1) error bars shown in foF2 profile of Ouagadougou station. These are obtained by applying $\sigma = \sqrt{V}$ where V is the variance defined by $V = \frac{\sum_{i=1}^N (foF2_i - \overline{foF2})^2}{N}$ and with $\overline{foF2}$ mean value and N the total number of data and (2) percentage difference obtained by utilizing $\text{percentage} = 100 \times \frac{foF2_{\text{Dakar}} - foF2_{\text{Ouaga}}}{foF2_{\text{Dakar}}}$ where $foF2_{\text{Dakar}}$ and $foF2_{\text{Ouaga}}$ are F2 layer critical frequency values of Dakar and Ouagadougou stations, respectively.

3. Results

Figure 1 concerns data for solar minimum and figure 3 that for solar maximum. Red graph is for Ouagadougou data and blue for Dakar data. Error bar shown in Ouagadougou graph allows to appreciate the gap. Panels a, b, c and d are devoted to winter, spring summer and autumn, respectively.

Figure 2 and figure 4 show the percentage difference variability for solar minimum and solar maximum, respectively.

In figure 1a graphs present trough around midday at Ouagadougou and around 0100 LT at Dakar station. At daytime Dakar foF2 is higher than that of Ouagadougou. Dakar graph shows morning peak while that of

Ouagadougou presents fairly afternoon peak. In spring (panel b) both graphs show afternoon peak with only trough shown in Ouagadougou curve around midday. Between 0900 LT-1900 LT there is more ionosphere at Dakar station than at Ouagadougou station. Panel c graphs exhibit afternoon peak with trough only in Ouagadougou curve around midday. From 0800 LT to 1100 LT and after 2000 LT there is more ionosphere at Ouagadougou station than at Dakar station. Between 1100 LT-1800 LT it is the reverse. Figure 1d shows that from 0800 LT-2000 LT there is more ionosphere at Dakar station than at Ouagadougou station. Curves show double peaks with predominance afternoon peak. Trough is exhibited in Ouagadougou graph at 1200LT and at 1400 LT in that of Dakar.

In figure 1, it can be seen that graphs variability shows equinoctial asymmetry at both stations. One can see that there is more ionosphere in winter than in summer. Spring foF2 is higher than that of autumn. This latter situation is more pronounced in Dakar graph.

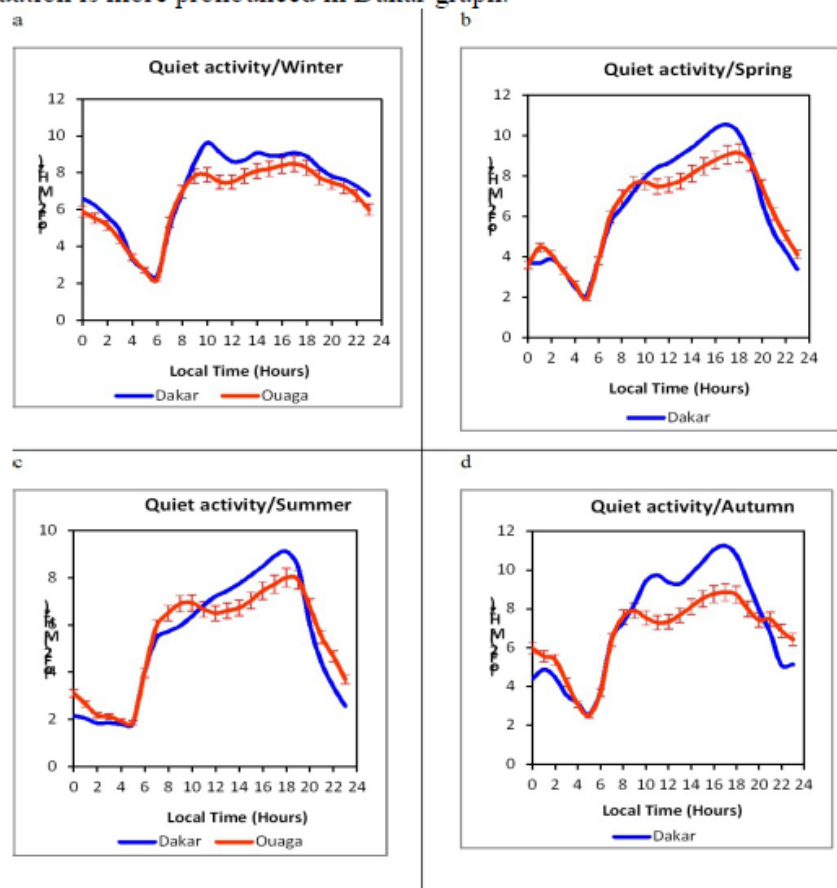


Figure 1: Quiet foF2 time variation during solar minimum phase

Figure 2 shows that during daytime we have $foF2_{Dakar} > foF2_{Ouaga}$. At night time $foF2_{Dakar} < foF2_{Ouaga}$ except for winter season. For this season, at all times $foF2_{Dakar} > foF2_{Ouaga}$, except at 0400 LT and 0700 LT where it is the reverse. The maximum percentage difference is observed at 1100 LT for winter and autumn and at 1700 LT for spring and summer. The variability of the percentage difference during spring and autumn shows equinoctial asymmetry.

In figure 3a both graphs present the same variability with Dakar foF2 higher than that of Ouagadougou from 1000 LT to night. The graph gap also increases from day to night. Night time trough is more pronounced at Ouagadougou station than at Dakar station. For the night time peak it is the reverse. Curves show morning peak profile. Panel b exhibits plateau profile at Dakar station while morning peak in foF2 is seen at Ouagadougou station. foF2 at Dakar station is higher than that of Ouagadougou station except between 0700 LT-1100 LT. Panel c shows fairly dome profile at Dakar station and noon bite out profile (double peak with trough located around midday). foF2 of Ouagadougou station is higher than that of Dakar between 0700 LT and 1100 LT and during night time. During autumn (panel d), graphs present double peak with morning predominance peak profile at Ouagadougou station and fairly noon bite out profile. foF2 of Ouagadougou station is higher than that of Dakar between 0700 LT and 1100 LT.

During equinoctial months, the difference in the form of foF2 profile and foF2 maximum value reached can be observed. Therefore, we can assert that figure 2 shows equinoctial asymmetry. It can also be seen that there is

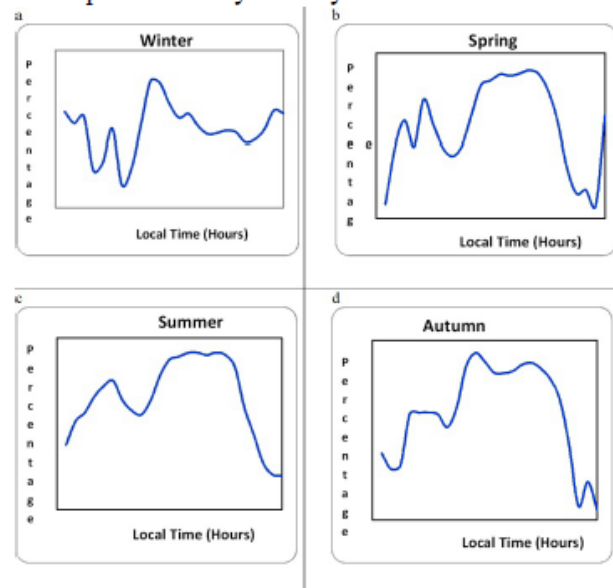


Figure 2: Quiet time percentage difference during solar minimum phase

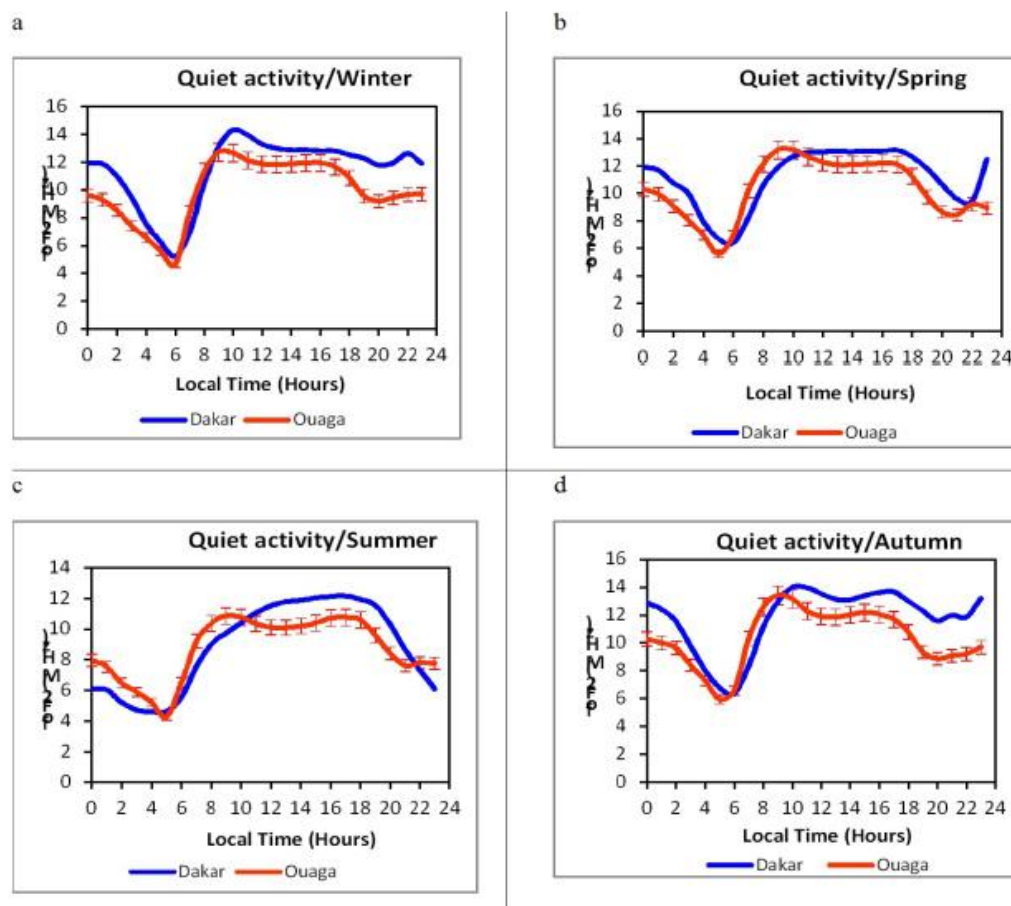


Figure 3: Quiet foF2 time variation during solar maximum phase

One can see in figure 4 that for all seasons and between 0600 LT-0900 LT $foF2_{Dakar} < foF2_{Ouaga}$. For the other times and in all seasons $foF2_{Dakar} > foF2_{Ouaga}$, except during summer where from 2200 LT to 0400 LT $foF2_{Dakar} < foF2_{Ouaga}$.

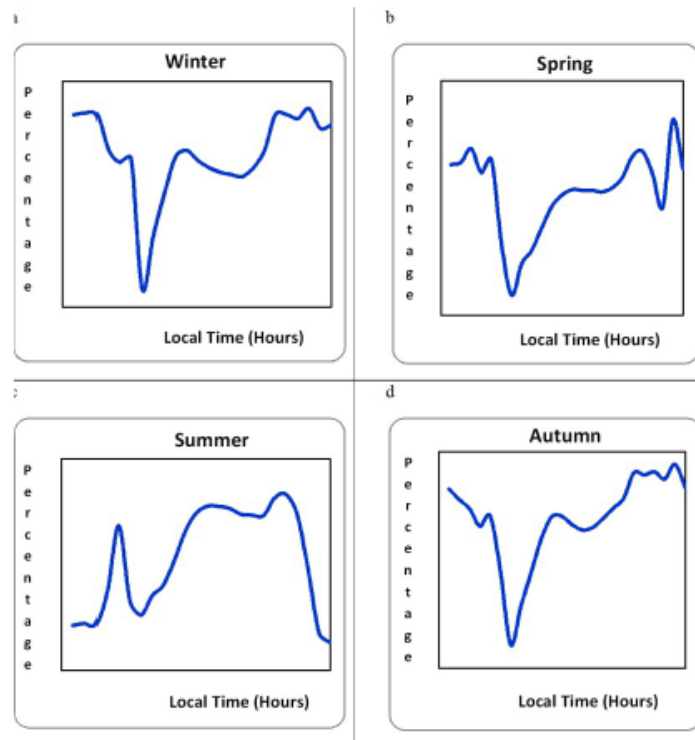


Figure 4: Quiet time percentage difference during solar maximum phase

4. Discussion and conclusion

During solar minimum, graphs show the same variability with more pronounced trough around midday at Ouagadougou station. Trough is noticed at Dakar station two hours later than that of Ouagadougou station. As trough round midday is the ExB effect, it can be retained that this appears two hours before Ouagadougou station. This allows us to assert that ExB effect seems to move from south to north because Ouagadougou is located in the EIA trough region and Dakar between the trough and the north crest. At daytime there is more ionosphere at Dakar station than at Ouagadougou station because Dakar is situated between the trough and the crest while Ouagadougou is located in the trough.

During solar maximum, curves highlight the same variability in winter (figure 2a) and in autumn (figure 2 d) with more and less pronounced trough between 1200 LT-1400LT. foF2 time profile variability is different for the two other seasons where trough is absent in Dakar foF2 time profile. The absence of trough in foF2 profile at Dakar station for these two seasons expresses that there is no vertical drift ExB effect. In fact, in the point of view of electrodynamics trough in foF2 profile for EIA region shows the signature of the vertical drift ExB (Fejer et al., 1981; Farley et al., 1986).

Moreover, it can be noticed that at all season Ouagadougou station foF2 profile shows the signature of the vertical drift ExB; that signature effect depends on season. The seasonal dependence of this signature effect is well known and has been investigated in several works (Richmond, 1995; Oyekola and Oluwafemi, 2007; Adebesein et al., 2013; Yizengaw et al., 2014).

The main difference between foF2 time variation profiles of both stations is due on the one hand to the highest ionization at Dakar station (that maybe due to its location) and on the other hand to a different profile behavior during spring and summer (Plateau and Dome profiles at Dakar station and fairly morning peak and noon bite out profiles at Ouagadougou, respectively). With a possibility to link ionosphere variability to the nature, the force or the absence of E region electric currents (Dunford, 1967; Vassal, 1982a; Vassal, 1982b; Acharya et al., 2010; and Acharya et al., 2011), it appears that Dome profile or plateau profile expresses the absence of electrojet while morning profile shows the presence of mean intensity electrojet and noon bite out profile the presence of strength electrojet (see Vassal, 1982b). These differences not only show a seasonal dependence of ExB effect but also its longitudinal and especially equatorial electrojet seasonal and longitudinal dependence. In fact, Yizengaw et al. (2014) clearly pointed out the equatorial electrojet and ExB seasonal differences in magnitude.

It can be retained from this study that: (1) ionization is higher at Dakar station than at Ouagadougou station; (2) the profile at Ouagadougou station always shows noon bite out profile with more or less predominance morning or afternoon peak; (3) the profiles at Dakar station during minimum phase principally are reverse profile except in winter. During solar maximum profiles change from one season to another.

Acknowledgement

Authors thank Dr Rolland Fleury and Dr Lassudrie Duschene for providing ionosonde data.

We also thank the reviewer whose kind suggestions and remarks have improved the present paper.

References:

- Acharya, R., Roy, B., Sivaraman, M.R. and Dasgupta, A. (2010) An Empirical Relation of Daytime Equatorial Total Electron Content with Equatorial Electrojet in the Indian Zone. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (UK), 72, 774-780.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2010.03.023>

- Acharya, R., Roy, B., Sivaraman, M.R. and Dasgupta, A. (2011) On Conformity of the EEJ Based Ionospheric Model to the Fountain Effect and Resulting Improvements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (UK), 73, 779-784. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2011.01.011>
- Adebesin B.O., Adeniyi J.O., Adimula I. A. , Reinisch B.W. (2013) Equatorial vertical plasma drift velocities and electron densities inferred from ground-based ionosonde measurements during low solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 97, 58–64
- Ali M. N., Ouattara F., Zerbo J. L., Gyébré A. M. F., Nanéma 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>
- Dunford, E. (1967) The Relationship between the Ionosphere Equatorial Anomaly and the E-Region Current System. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 29, 1489-1498. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169\(67\)90102-X](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169(67)90102-X)
- Farley, D.T., Bonell, E., Fejer, B.G. and Larsen, M.F. (1986) The Prereversal Enhancement of the Zonal Electric Field in the Equatorial Ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 91, 13723-13728. <http://dx.doi.org/10.1029/JA091iA12p13723>
- Fejer, B.G., Farley, D.T., Woodman, R.F. and Calderon, C. (1979) Dependence of Equatorial F-Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. *Journal of Geophysical Research*, 84, 5792-5796.
- Fejer, B.G. (1981) The Equatorial Ionospheric Electric Fields: A Review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43, 377-386. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90101-X](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169(81)90101-X)
- Gnabahou, D.A., Elias, A.G. and Ouattara, F. (2013a) Long-Term Trend of foF2 at a West-African Equatorial Station Linked to Greenhouse Gases Increase and Dip Equator Secular Displacement. *Journal of Geophysical Research*, 118, 3909-3913. <http://dx.doi.org/10.1002/jgra.50381>
- Gnabahou, D.A., Ouattara, F., Nanéma, E. and Zougmore, F. (2013b) foF2 Diurnal Variability at African Equatorial Stations: Dip Equator Secular Displacement Effect. *International Journal of Geosciences*, 4, 1145-1150. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.48108>
- Mayaud, P.N. (1971) A Measurement of Planetary Magnetic Activity Based on Two Antipodal Observatories. *Annales Geophysicae*, 27, 67-71.
- Mayaud, P.N. (1972) The aa Indices: A 100-Year Series, Characterizing the Magnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*, 77, 6870-6874. <http://dx.doi.org/10.1029/JA077i034p06870>

- Ouattara, F., Gnahou, A. and Mazaudier, C.A. (2012) Seasonal, Diurnal and Solar-Cycle Variations of Electron Density at Two West Africa Equatorial Ionization Anomaly Stations. *International Journal of Geophysics*, 2012, Article ID: 640463, 9 p.
- Oyekola O.S. and Oluwafemi C. C. (2007) Morphology of F-region vertical $E \times B$ drifts in the African sector using ionosonde measurements. *Annals of Geophysics*, Vol. 50, N. 5, 615-625
- Richmond, A.D. (1995) Modeling equatorial ionospheric electric fields. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 1103-1115.
- Rishbeth, H. (1971) The F-Layer Dynamo. *Planetary and Space Science*, 19, 263-267. [http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633\(71\)90205-4](http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633(71)90205-4)
- Vassal, J.A. (1982a) Electrojet, contreélectrojet et région F à Sarh (Tchad), *Géophysique*. ORSTOM, Paris.
- Vassal, J. A. (1982b) La variation du champ magnétique et ses relations avec l'électrojet équatorial au Sénégal Oriental. *AnnalesGeophysicae*, 3, 347-355.
- Yizengaw E., Moldwin M. B., Zesta E., Biouele C. M., Dantie B., Mebrahtu A., Rabiou B., Valladares C. F. and Stoneback R. (2014) The longitudinal variability of equatorial electrojet and vertical drift velocity in the African and American sectors. *Ann. Geophys.*, 32, 231–238,

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué pendant cette thèse est consacré à l'étude statistique de la variation diurne de la fréquence critique de la couche F2 (foF2) à travers les activités géomagnétiques lors des différentes saisons durant les phases du cycle solaire à la station de Dakar et de Ouagadougou.

L'analyse de l'étude statistique de foF2 faite dans ces deux stations montre que :

- Le profil noon bite out à prédominance pic de matin ou d'après midi caractérisant la présence d'un fort électrojet est observé globalement à la station de Ouagadougou. Le profil noon bite out est totalement enregistré lors des périodes calme et fluctuante. Divers types de profil sont observés lors des jours de chocs et récurrents. Cette analyse montre aussi l'existence de l'anomalie d'hiver et la présence de l'asymétrie équinoxiale. Le pic de nuit qui indique une phase de pré renversement du champ électrique est observé généralement en automne dans ce creux de l'anomalie d'ionisation équatoriale.
- A la station de Dakar, les profils varient selon les saisons et selon les phases du cycle solaire. En effet, les graphes d'automne montrent globalement le noon bite out; ceux de l'été présentent le profil de type inverse témoignant la présence d'un fort contre électrojet à l'exception de la phase maximum où on enregistre l'absence de ce courant; au printemps, on observe un profil similaire à celui de l'été, mais de fois on note l'absence d'électrojet en phase décroissante; et en fin le profil du type pic de matin est observé en hiver. L'analyse des profils horaires au cours des saisons montre aussi l'existence de l'anomalie d'hiver et de l'asymétrie équinoxiale.

L'impact de l'activité géomagnétique perturbée sur la variabilité de foF2 permet de noter la présence de l'orage positif causé généralement par les jours de chocs et récurrents. L'influence de l'activité fluctuante sur la variabilité de foF2 est faible. L'orage négatif qui se produit la nuit est moins fréquent.

L'étude statistique comparative de foF2 durant les cycles solaires 21,22 a permis de mettre en évidence une différence significative de profil entre les deux stations.

Lors des périodes calmes, la tendance est claire, le profil noon bit out est observé à la station de Ouagadougou. Cependant, à la station de Dakar, les profils dépendent des saisons: en hiver, on observe un profil de type pic de matin, le profil de type inverse est observé au printemps et à l'été, celui de type noon bite out est fréquent sur les graphes d'automne.

Les données de foF2 issues de ces deux stations présentent des profils divers pendant les périodes perturbées.

Il ressort de cette analyse une petite similitude en termes de profil entre les deux stations au cours de l'automne. Pendant cette saison, on observe globalement le profil noon bite out.

Lors de différentes phases du cycle solaire, on note l'existence d'un gap important entre les graphes issus de ces deux stations dans l'intervalle de temps 10h00-19h00, et ce gap devient plus important lors de minimum solaire.

PERSPECTIVES

La différence significative de profils observés lors des études antérieures sur la variation diurne de la fréquence critique de la couche F2 (foF2) à la station de Dakar et de Ouagadougou se confirme ici à travers l'étude statistique de foF2. Cette différence a été attribuée d'une part, à l'effet longitudinal et d'autre part, à la position des stations par rapport à l'équateur magnétique (Dakar se trouve aux abords de l'anomalie d'ionisation équatoriale du secteur ouest africain, alors que Ouagadougou est dans le creux). Une étude approfondie de ce même paramètre ionosphérique utilisant d'autres méthodes ou une étude statistique comparative de foF2 entre la station de Dakar et une station africaine qui se trouverait sur une position géographiquement similaire à cette dernière et se situant aux abords de la crête pourrait nous permettre de tirer une conclusion importante.

Le très faible écart de la moyenne de la variation diurne de foF2 à la station de Dakar pendant cette étude statistique lors d'une même saison au cours de maximum solaire à travers les différentes activités géomagnétiques exige une étude saisonnière plus approfondie.

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1.

Aarons, J., 1982. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, 70, 360-378.

Andriambahoaka, Z. Modélisation régionale du champ magnétique terrestre et établissement de cartes magnétiques détaillées appliquées à Madagascar.

Thèse de doctorat présentée à l'Université d'Antananarivo, 2008.

Appleton, E. V., Two anomalies in the ionosphere, *Nature* 157, 691, 1946.

Bailey, D.K., The geomagnetic nature of the layer longitude effect, *Terrestrial Magnetism Atmospheric Electrical*. 53, 35-39, 1948.

Balan, N., and G. J. Bailey, Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an Additional layer, *J. Geophysical Research*, 100, 21,421, 1995.

Biondi, M. A., Electron-ion and ion-ion recombination, *Annale Geophysics.*, 20, 34–46, 1964.

Bramley, E. N. and M. Peart, Diffusion and electromagnetic drift in the equatorial F region, *J. Geophysics Research*, 69, 4609, 1964.

Bramley, E. N. and M. Peart, Diffusion and electromagnetic drift in the equatorial F2- region, *J. Atmospheric Terrestrial Physics* 27, 1201-1211, 1965.

Chapman, S., The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth, *Proc. Phys. Soc.*, 43, 26-45, 1931.

Chapman, S., and Bartels, J. *Geomagnetism*, Oxford University Press, New York, 1940.

Chapman S., The equatorial electrojet is detected from the abnormal electric current distribution above Huancayo, Peru and elsewhere. Arch. Meteorology Geophysics Bioclimatology A4, 368. 1951.

Croom, S. A., Robbins, A. R., and Thomas, J. O., Two anomalies in the behavior of the layer of the ionosphere, Nature 184, 2003-2004, 1959.

D. Ivers, R. Stening, J. Turner et D. Winch: Equatorial electrojet from scalar magnetic field observations. J. Geophysical Research, 108:1061{1070, 2003.

[Davies et al., 1962] K. Davies, J. M. Watts et Zacharisen. A study of F2 layer effects as observed with doppler techniques. Journal of Geophysics, (67): 601–609, 1962.

Davis, T.N., K. Burrows and J.D., Stolarik. A latitude survey of the equatorial electrojet with rocket – borne magnetometers, J. Geophysical Research, 72, 1845-1861, 1967.

Davies, K. Ionospheric Radio. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.

Evans, J.V. (1973) the cause of storm-time increases of the F-layer at mid-latitudes. J. Atmospheric Terrestrial Physic, Vol. 35, 593-616.

Evans, J.V., 1978. Incoherent scatter contributions to studies of the lower thermosphere, Rev. Geophysical Space Phys., 16, 195.

Gauss, K.F., General Theory of Terrestrial magnetism, 1839.

G. Jadhav, M. Rajaram et R. Rajaram: Main field control of the equatorial electrojet: a preliminary study from the ersted data. Journal of Geodynamics, 33:157{171, 2002.

Gnabahou Doua Allain (2014). Thèse sur la variabilité et variation à long terme de l'ionosphère en région équatoriale africaine.

Hanson, W. B., and Moffett, R. J., Ionization transport effects in the equatorial F-region. J. Geophysical Research 71, 5559-5572, 1966.

Hirono, M., and Maeda H., Geomagnetic distortion of the region on the magnetic equator, J. Geophysical Research, 60,241-255, 1955.

Kelley M C: The Earth's ionosphere. Plasma physics and electrodynamics. International Geophysics Series, volume 43, Academic Press, New York, 1989.

King, J. W., Smith, P. A., Eccles, D., Fooks, G. F., and Helm H., Preliminary investigation of the structure of the upper ionosphere as observed by the topside sounder satellite, Alouette, Proc., Roy., Soc. (London) A281, 464-487, 1964.

Kinter, P., GNSS and Ionospheric Scintillation: How to Survive the Next Solar Maximum, Cover story of Inside GNSS, July/August 2009, en ligne, disponible www.insidegnss.com/node/1579

Luhr, H., Maus,S. et Rother M. Noon-time equatorial electrojet : its spatial features as determined by the champ satellite. J. Geophysicae Research, 2004.

Mayaud, P. N., Analyse morphologique de la variabilité jour à jour de la variation journalière et régulière Sr du champ magnétique terrestre, système C (région non polaire), Annales Geophysical 21, 514 -544, 1965.

McNamara, L.F. (1977a) Recurrent storms and their effects on HF radio communications. Monitors-Proc.IREE Australie, 48-55.

McNamara, L.F. (1977b) Ionospheric storm effects on maximum usable frequencies on circuits around Australia. Ionospheric Prediction Service Series R reports IPS-R35, Sydney, Australie.

McNamara, L.F., The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding. Krieger Publishing Company, Malabar, FL., 1991.

Mitra, S. K., Geomagnetic control of region F2 of the ionosphere, Proc. Inst. Elec. Eng. 96-III, 441-446, 1946.

Northon, R. B., and Van Zandt, T. E., The daytime equatorial F layer. J. Atmospheric Terrest. Phys., 26,1047-1054, 1964.

Obrou, O, K, ionosphère équatoriale: contribution à l'amélioration du modèle « International Reference Ionosphere » (IRI), Thèse de doctorat d'état en physique, Université de Cocody-Abidjan, UFR SSMT, 2008.

Ouattara F. (2009). Contribution à l'étude des relations entre les deux composantes du champ magnétique solaire et l'ionosphère équatoriale. Thèse d'état soutenue à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Rajaram, G., J. Atmos. Terr. Phys. 39, 1125, 1977.

Ratcliffe, J.A. (1970). Sun, Earth and Radio. McGraw-Hill Book Company, New York.

Reddy C. A., The equatorial electrojet. A. Geoph. Vol. 131 No. 3, 1989.

Richmond, A.D., Ionospheric wind dynamo theory: A review, J. Geomagnetism Geoelectrical, 31, 287, 1979.

Rishbeth, H. and Garriott O. K., Introduction to ionospheric physics, Academic Press, New York, 1969.

Rishbeth, H., J.Atmos.Terr.Phys.34, 1, 1972.

Rishbeth J. (1975) F-region storms and thermospheric circulation. J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 37, 1055-1064.

Stening, R.J. Modeling the low-latitude F-region, J. Atm. Terr. Phys., 54, 1992.

Sterling, D.L., W.B. Hanson, Moffett, R.J., and Baxter R.G., Radio Sci. 4, 1005. 1969.

Tascione, T.F., Introduction to Space Environment, Orbit Book Company, Malibar, Florida, 1988.

Tarpley, J.D., the ionosphere wind dynamo, 1, lunar tides, planet. Space Sci., 18, 1075, 1970a.

Tarpley, J.D., The ionosphere wind dynamo, 2 solar tides, planet. Space Science, 18, 1091, 1970b.

Vallières, X : Les échelles de la turbulence dans l'ionosphère des hautes latitudes et leurs signatures sur les échos des radars HF et du réseau Super DARN. Thèse présentée à l'Université d'Orléans, 2002.

Wanninger, L., "Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS." GPS World, Vol. 4, No. 7, pp. 48-53, 1993.

CHAPITRE 2.

Andriambahoka Zedidia (2008). Thèse sur Modélisation régionale du champ magnétique terrestre et établissement de cartes magnétiques détaillées appliqués à Madagascar.

Bartels, J., N. H. Heck, and H. F. Johnston, 1939: The three-hour range index measuring magnetic activity, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, 44, 411-454.

Davis, T.N and M. Sugiura (1966): Auroral electrojet activity index AE and its Universal Time variations, Journal Geophysical Research 71, 785-801.

Dumond, R. (1953): L'ionosphère et l'optique géométrique des ondes courtes. Paris, Monographies Dunod edition, 1953.

Gnabahou A., F. Ouattara, Ionosphere Variability from 1957 to 1981 at Djibouti Station, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.73 No.3 (2012), pp. 382-390.

Legrand J. P and P.A. Simon: 1989, Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part I. The contribution to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind. *Annales geophysicae*, 7, (6).

Legrand J.P., M. Le Goff, C. Mazaudier: 1990, On the climatic changes and the sunspot activity during the XVIIth century, *Annales Geophysicae*, 8 (10), 637-644.

Mayaud, P. N., Indices Kn, Ks et Km, 1964-1967, 156 pages, Ed. CNRS, Paris, 1968.

Mayaud., P. N., 1967. Corrélation entre les variations journalières du champ magnétique terrestre sous l'électrojet équatorial et dans les régions avoisinantes, *Annales Géophysique*, 23, 387-406.

Mayaud, P.N. (1971): Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux, *Ann, géoph.*, 27, 71.

Mayaud, P.N. (1972): The aa indices: a 100-year series characterizing the magnetic activity, *J. Geophysicale Research*, 77 (34), 6870-6874.

Mayaud, P.N. (1973): A hundred year series of geomagnetic data, 1868–1967, indices aa, Storm sudden commencements, *IAGA Bull.*, 33, 252 (IUGG Publ. Office, Paris, Mayaud).

Mayaud, P.N. (1980): Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 22, AGU, Washington, D. C. Moos, N. A. F. (1910), *Colaba Magnetic Data, 1846 to 1905*, 2, The Phenomenon and its Discussion, 782 pp., Cent. Govt. Press, Bombay.

Michel MENVIELLE, Jean-Jacques VALETTE, Mathieu PAU et Chantal LATHUILLÈRE
Nouveaux indices Géomagnétiques permettant une meilleure résolution spatiale et temporelle de l'activité magnétique.

Obrou, O, K, ionosphère équatoriale : contribution à l'amélioration du modèle « International Référence Ionosphère » (IRI), Thèse de doctorat d'état en physique, Université de Cocody-Abidjan, UFR SSMT, 2008.

Ouattara, F., Amory-Mazaudier, C., Solar-geomagnetic activity and Aa indices toward a Standard, journal of atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 2008,doi:10.1016/j.jastp.2008.05.001.

Ouattara, F., Amory-Mazaudier, C.: 2009, Solar–geomagnetic activity and Aa indices toward a Standard, J. Atmos. Solar-Terr. Phys, 71, pp.1736-1748.

Ouattara, F., C. Amory-Mazaudier, M. Menvielle, P. Simon, J-P. Legrand.: 2009, On the long term change in the geomagnetic activity during the XXth century, Annales Geophysicae, Vol 27, N°5, pp. 2045-2051.

Ouattara F., 2009, Relationship between geomagnetic classes activity phases and their occurrence during sunspot cycle. Ann Geophys. 52 : 11-20.

Ouattara F. and J. L. Zerbo, “Ouagadougou station F2 layer parameters yearly and seasonal variations during severe geomagnetic storms generated by CMEs and fluctuating wind streams,” International Journal of Physical Sciences, vol. 6, no. 20, pp. 4854–4860. (2011).

Ouattara, C. Amory Mazaudier, Statistical study of the diurnal variation of the Equatorial F layer at Ouagadougou from 1966 to 1998’, Journal of Space Weather Space Climate 2, A19, 2012, pp. 1-10, DOI: 10.1051/swsc/2012 019.

Richardson, I.G., E. W. Cliver, H. V. Cane. : 2000, Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind. J. Geophys. Res., vol 105, NO. A8, pages 18,200-18,213.

Richardson, I.G. and H.V. Cane. :2002, Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972-2000), J. Geophys. Res., Vol 107, A8, 1187.

Rishbeth H. and Garriott O. K., 1969. Introduction to Ionospheric Physics, International Geophysics series, Acad. Pres., New York and London, volume 14.

Simon P. A. et J. P., Legrand, Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part II. The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity. *Annales geophysicae*, 1989, 7, (6), 579-594.

Svalgaard, L. (1977) geomagnetic activity: Dependence on solar wind parameters, in Skylab Workshop Monograph on Coronal Holes, edited by J. B. Zirker, chap.9, p.371, Columbia Univ. Press, New York.

Svalgaard L., E. W. Cliver, and P. Le Sager (2004). IHV: A new long-term geomagnetic index. *Adv. Space. Res.*, 34, 436.

Svalgaard L. and E. W. Cliver (2005). The IDV index: Its derivation and use in inferring long-term variations of the interplanetary magnetic field strength. *J. Geophys. Res.*, 110, A12103, doi:10.1029/2005JA011203.

Svalgaard, L. and E. W. Cliver (2007), Interhourly variability index of geomagnetic activity and its use in deriving the long-term variation of solar wind speed, *J. Geophys. Res.*, 112, A10111, doi:10.1029/2007JA012437.

Pham Thi Thu Hong (2012) .Thèse sur Analyse et interprétation de la variation régulière du champ magnétique terrestre au Vietnam et modélisation de l'ionosphère.

W. Baumjohann, R. Nakamura, Magnetospheric Contributions to the Terrestrial Magnetic field in *Treatise of Geophysics*, ed: M. Kono, Elsevier B.V. (N.Y.), 2007.

Watkins, B., Radio Techniques for Observing the Ionosphere An overview of some commonly used methods. What is at HAARP? (1998).

Zerbo, J.L., Ouattara, F., Zoundi, C., Gyébré, A. Solar cycle 23 and geomagnetic activity since 1868, *Revue CAMES serie A*. 12 (2): 255-262, 2011.

Zerbo Jean Louis (2012). Thèse sur Activité solaire, vent solaire, géomagnétisme et l'ionosphère équatoriale.

CHAPITRE 3.

Acharya R, Roy B, Sivaraman M R & Dasgupta A, An empirical relation of daytime equatorial total electron content with equatorial electrojet in the Indian zone, *J Atmos Sol-TerrPhys (UK)*, 72 (10) (2010) pp 774–780.

Acharya R, Roy B, Sivaraman M R & Dasgupta A, on conformity of the EEJ based Ionospheric model to the Fountain effect and resulting improvements, *J AtmosSol-TerrPhys (UK)*, 73 (2011) pp 779–784. Acharya.

A. Gnabahou and F. Ouattara, “Ionosphere Variability from 1957 to 1981 at Djibouti Station,” *European Journal of Scientific Research*, Vol. 73, No. 3, 2012, pp. 382- 390.

Ali M. Nour, F.Ouattara, Zerbo Jean Luis, Gyebré Aristide M., Nanema Emmanuel, Zougmore François. “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*, 2015, 6, 201-208.

Araujo-Pradere E. A., foF2 frequency bands in el cerrillo, Mexico during magnetically quiet conditions, *Revista Brasileira de Geofisica*, vol. 15, no.2, 1997.

A. Özgüç, T. Ataç and R. Pektaş, “Examination of the Solar Cycle Variation of foF2 for Cycles 22 and 23,” *Journal of Atmospheric and Terrestrial physics* Volume .70, No. 2-4, 2008, pp. 268-276.

Balan, N., Otsuka, Y., Bailey, G., J., and Fukao, S.: Equinoctial asymmetries in the ionosphere and thermosphere observed by the MU radar, *J. Geophys. Res.*, 103, 9481–9495, 1998.

Blanc, M., A. Richmond, The ionospheric Disturbance Dynamo, *J. Geophys. Res.*, 85, 1669–1686, 1980.

Bremer, J. 1998, Trends in the ionosphere E and F regions over Europe. *Ann. Geophysics.*, Vol.16 pp 986-996.

Bremer, J., Long term trends in the ionosphere E and F region , *Ann. Geophys.* 26, 189-1197, <http://www.ann-geophysi.net /26/1189/2008>.

Burns, A.G., T.L. Killeen, and R.G. Roble, A simulation of thermospheric composition changes during an impulsive storm, *J. Geophys. Res.*, 96, 14153–14167, 1991.

Burns, A.G., T.L. Killeen, G.R. Carignan, and R.G. Roble, Large enhancements in the O/N₂ ratio in the evening sector of the winter hemisphere during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 100, 14661–14671, 1995.

C. Lal, “Global F2 Layer Ionization and Geomagnetic Activity,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. A8, 1992, pp. 12153-12159.

C. Lal, “Contribution of Solar Wind and Equinoctial Maxima in Geophysical Phenomena,” *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 60, No. 10, 1998, pp. 1017-1024.

Chuo, Y.J., Lee, C.C., 2008. Ionospheric variability at Taiwan low latitude station: comparison between observations and IRI-2001 model. *Advances in Space Research* 42, 673–681.

D. A. Gnabahou, A. G. Elias and F. Ouattara, “Long-Term Trend of foF2 at a West-African Equatorial Station Linked to Greenhouse Gases Increase and Dip Equator Secular Displacement,” *Journal of Geophysical Research* 118, No. 6, 2013, pp. 3909-3913.

D. Pancheva, N. Mitchell, R. R. Clark, J. Drojbeva and J. Lastovicka, “Variability in the Maximum Height of the Ionospheric F2-Layer over Millstone (September 1998 March 2000); Influence from Below and Above,” *Annals of Geophysics*, Vol. 20, No. 11, 2002, pp. 1807-1819.

D. H. Zhang, X. H. Mo, L. Cai, et al., “Impact Factor for the Ionospheric Total Electron Content Response to Solar Flare Irradiation,” *Journal of Geophysical Research A*, Vol. 116, No. 4, 2011, Article ID: A04311.

D. N. Fotiadis, G. M. Baziakos and S. S. Kouris, "On the Global Behaviour of the Day-To-Day MU Variation "Advances in Space Research, Vol. 33, No. 6, 2004, pp. 893-901.

D. Bilitza, O. K. Obrou, J. O. Adeniyi and O. Olapido, "Variability of foF2 in the Equatorial Ionosphere," Advances in Space Research, Vol. 34, 2004, pp. 1901-1906.

Dunford, E.: The relationship between the ionosphere equatorial anomaly and the E region current system, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1489-1498, 1967.

E. Sambou, P. M. Vila and A. T. Koba, "Non-Trough foF2 Enhancements at Near-Equatorial Dip Latitudes," Annales Geophysicae, Vol. 16, No. 6, 1998, pp. 711-720.

Faynot J. M. and Vila P. F region at magnetic equator, Ann. Geophys., 35, 1-9, 1979.

F. Ouattara, C. Amory-Mazaudier, R. Fleury, P. Lassudrie-Duchesne, P. Vila, M. Petitdidier, West African equatorial ionospheric parameters climatology based on Ouagadougou ionosonde station data from June 1966 to February 1998, Ann. Geophys., 27, 2009, pp. 2503-2514

F. Ouattara and J. L. Zerbo, "Ouagadougou Station F2 Layer Parameters Yearly and Seasonal Variations during Severe Geomagnetic Storms Generated by Fluctuating Wind Streams," International journal of physical Sciences, Vol. 6, No. 20, 2011, pp. 4854-4860.

F. Ouattara, C. Zoundi and R. Fleury, "Comparison between CODG TEC and GPS Based TEC Observation at Koudougou Station in Burkina Faso," Indian Journal of Radio & Space Physics, Vol. 41, No. 6, 2012, pp. 617- 623.

F. Ouattara and R. Fleury, "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, Vol. 6, No. 17, 2011, pp.3609-3622.

F. Ouattara, A. Gnabahou and C. A. Mazaudier, "Seasonal, Diurnal and Solar-Cycle Variations of Electron Density at Two West Africa Equatorial Ionization Anomaly Stations," International Journal of Geophysics, 2012, Article ID: 640463.

F. Ouattara, C. Amory Mazaudier, Statistical study of the diurnal variation of the Equatorial F layer at Ouagadougou from 1966 to 1998, Journal of Space Weather Space Climate 2, A19, 2012, pp. 1-10, DOI: 10.1051/swsc/2012019.

Farley, D.T., Bonell, E., Fejer, B. G., Larsen, M. F.: The Prereversal Enhancement of the Zonal Electric Field in the Equatorial Ionosphere, J. Geophysical Research, volume 91, NO A12, 13,723-13,728, 1986.

Fejer, B. G., Farley, D. T., Woodman, R. F., Calderon, C.: Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and Geophysical Research, 84, 5792, 1979.solar cycle, J.

Fejer, B. G.: The equatorial ionospheric electric fields: A review, J. Atmos. Terrestrial Physic, 43, 377, 1981.

Fuller-Rowell, T. J., Codrescu, M. V., Roble, R. G., Richmond, A. D., How does the thermosphere react to a geomagnetic storm? American Geophysical Union, Geophysical monograph 98, pp, 303-225, 1997.

G. Lu., A. D. Richmond, R. G. Roble, and B. A. Emery, Coexistence of ionospheric positive and negative storm phases under northern winter conditions: Journal of geophysical Research, vol. 106 NO A11, pages 24, 493-24, 501, (2001).

H. Huang and K. Cheng, "Solar Cycle Variations of the Equatorial Ionospheric Anomaly in Total Electron Content in the Asians Region," Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. A11, 1996, pp. 24513-24520.

H. Risbeth and Mendilo, "Pattern of F2-Layer Variability," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 63. No.15, 2001, pp. 1661-1680.

I. S. Batista and M. A. Abdu, "Ionospheric Variability at Brazilian Low and Equatorial Latitudes: Comparison between Observations and IRI Model," *Advances in Space Research*, Vol. 34, No. 9, 2004, pp. 1894-1900.

J. Lei, J. P. Thayer, J. M. Forbes, et al., "Ionosphere Response to Solar Wind High-Speed Streams," *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 19, 2008, Article ID:L19105.

J. O. Adeniyi and I. A. Adimula, "Comparing the F2 Layer Model of IRI with Observations at Ibadan," *Advances in Space Research*, Vol. 15, No. 2, 1995, pp. 1441- 1444.

J. R. de Souza, G. J. Batley, M. A. Abdu and I. S. Batista "Comparison of Low Latitude F Region Peak Densities, Heights and Equatorial ExB Drift from IRI with Observational Data and the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model," *Advances in Space Research*, Vol. 181996 , pp. 41-44.

K. L. Jones, "Storm Time Variation of the F2 Layers Electron Concentration," *Journal of Atmospheric and Terrestrial physics*, Volume 33, No. 3, 1971, pp.372-389.

K. L. Jones and H. Risbeth, "the Origin of Storm Increases of Midlatitude F-Layer Electron Concentration," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 33, No. 9, 1971, pp. 391-401.

Lee, C. C., B.W. Reinisch, S.-Y. Su, W.S. Chen, Quiet-time variations of F2-layer parameters at Jicamarca and comparison with IRI-2001 during solar minimum, *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physic* (70) 184-192, 2008.

M. Le Huy, C. T. Nguyen, T. L. Tran, R. Fleury, P. L. Duchesne, A. Bourdillon, C. Amory-Mazaudier, N. N. Tran and T. L. Hoang, "The Effect of the Geomagnetic Storm on the Ionospheric Total Electron Content in the Southeast Asian Equatorial Ionization Anomaly Region Observed by the GPS Data," *Journal of Sciences of the Earth*, Vol. 29, No. 2, 2007, pp. 104-112.

N. Thiam, F. Ouattara, A. Gnabahou, C. A. Mazaudier, R. Fleury and P. L. Duchesne, "Variation de la Fréquence Critique de la Couche F2 (foF2) de la Station de Dakar avec le Cycle Solaire," *Journal of Science* Vol. 11, No.2, 2012, pp. 16-20.

O. K. Obrou, M. N. Mene, A. T. Koba and K. Z. Zaka, "Equatorial Total Electron Content (TEC) at Low and High Solar Activity " *Advances in Space Research* 43, No. 11, 2009, pp. 1757-1761.

O. K. Obrou, J. O. Adeniyi, A. T. Koba and B. Moukassa, "Electron Density Profile Parameters B0 and B1 Response during a Magnetic Disturbance at Equatorial Latitude," *Journal of Atmospheric and Solar –Terrestrial Physics*, Vol. 67, No. 5, 2005, pp. 515-519.

Ouattara F., IRI-2007 foF2 predictions at Ouagadougou station during quiet time periods from 1985 to 1995, *Archives of Physics Research*, 2013, 4 (3):12-18. (2013).

Prolss, G. W., Magnetic storm associated perturbations of upper atmosphere, AGU Geophysical Monograph, 1996.

Richmond, A., and R.G. Roble, Dynamic effects of aurora generated gravity waves on mid-latitude ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 41, 841–852, 1979.

Rishbeth H. and Garriott O. K., Introduction to ionospheric physics, Academic Press, New York, 1969.

Rishbeth, H.: The F-layer dynamo, *Planet. Space Science*, 19, 263, 1971.

Rishbeth, H., F-region storms and thermospheric circulation, in *Electromagnetic Coupling in the Polar Clefts and Caps*, eds. P.E., Sandholt, and A. Egeland, Kluwer Academic, Norwell, MA, pp. 393–406, 1989.

Rishbeth H. and Müller-Wodarg, I. C. F.: Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer, *Ann. Geophys.*, 24, 3293–3311, doi: 10.5194/angeo-24-3293-2006. (2006).

S. S. Kouris, P. A. Bradley and I. K. Nissopoulos, the Relationships of foF2 and M(3000)F2 versus R12,” Proceedings of the COST 238/PRIME/Workshop, Eindhoven, 1994, pp. 155-167.

S.S. Kouris, P.A. Bradeley and P.Dominici (1998) Solar-cycle variation of the daily foF2 and M(3000) F2, *Ann.Geophysicae*, 16 (8) 1039-1042.

Scialom, G.: Neutral composition in the lower thermosphere, *Radio Sci.*, 9(2), 253–261. (1974).

Sethi, N.K., Dabas, R.S., Kavita, S., 2008. Comparison between IRI predictions and digital ionosonde measurements of hmF2 at New Delhi during low and moderate solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70, 756–763.

T. Ataç, A. Özgüç and R. Pektaş, “The Variability of foF2 in Different Phases of Solar Cycle 23,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71, No. 5, 2009, pp. 583-589.

T. T. Pham, C. Amory-Mazaudier and M. Le Huy, “Time Variations of the Ionosphere at the Northern Tropical Crest of Ionization at Phu Thuy, Vietnam “*Annals of Geophysics*, Vol. 29, No. 1, 2011, pp. 197-207.

Testud, J., and G. Vasseur, Ondes de gravité dans la thermosphère, *Ann. Geophys.*, 25, 525–546, 1969.

Vassal, J. A. : Electrojet, contre électrojet et région F à Sarh (Tchad), *Géophysique*, ORSTOM, Paris, 1982a. 13.

Vassal, J.: La variation du champ magnétique et ses relations avec l'électrojet équatorial au Sénégal Oriental, *Annale Géophysique*, t. 38, fasc. 3, 347-355, 1982b.

Vasyliunas, V.H., A mathematical model of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere, in *Particles and Fields in the Magnetosphere*, eds. B.M., Cormac, and D. Reidel, vol. 60, Hollant, 1970.

Yizengaw E., Moldwin M. B., Zesta E., Biouele C. M., Damtie B., Mebrahtu A., Rabiou B., Valladares C. F. and Stoneback R. (2014) The longitudinal variability of equatorial electrojet and vertical drift velocity in the African and American sectors. *Ann. Geophys.*, 32, 231–238.

Zou, L., Rishbeth, H. I. C. F. Müller-Wodarg, A.D., Aylward, G. H., Millward, T. J. Fuller-Rowell, D.W. Idenden, R.J. Moffett, Annual and semiannual variations in the ionospheric F2 layer: I. Modelling, 2000.

CHAPITRE 4.

D. A. Gnabahou, A. G. Elias and F. Ouattara, “Long-Term Trend of foF2 at a West-African Equatorial Station Linked to Greenhouse Gases Increase and Dip Equator Secular Displacement,” *Journal of Geophysical Research* 118, No. 6, 2013, pp. 3909-3913.

Faynot J. M. and Vila P. F region at magnetic equator, *Ann. Geophys.*, 35, 1-9, 1979.

F. Ouattara, Ali M. Nour and Zougmore François, A Comparative study of seasonal and quiet time foF2 diurnal variation at Dakar and Ouagadougou stations during solar minimum and maximum for cycles 21-22, *European Scientific Journal* August 2015 edition vol.11, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

F. Ouattara, C. Amory-Mazaudier, R. Fleury, P. Lassudrie-Duchesne, P. Vila, M. Petitdidier, West African equatorial ionospheric parameters climatology based on Ouagadougou ionosonde station data from June 1966 to February 1998, *Ann. Geophys.*, 27, 2009, pp. 2503-2514.

F. Ouattara, C. Zoundi and R. Fleury, “Comparison between CODG TEC and GPS Based TEC Observation at Koudougou Station in Burkina Faso,” *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol. 41, No. 6, 2012, pp. 617- 623.

F. Ouattara, A. Gnabahou and C. A. Mazaudier, “Seasonal, Diurnal and Solar-Cycle Variations of Electron Density at Two West Africa Equatorial Ionization Anomaly Stations,” *International Journal of Geophysics*, 2012, Article ID: 640463.

F. Ouattara, C. Amory Mazaudier, Statistical study of the diurnal variation of the Equatorial F layer at Ouagadougou from 1966 to 1998, *Journal of Space Weather Space Climate* 2, A19, 2012, pp. 1-10, DOI: 10.1051/swsc/2012019.

Fejer, B. G.: The equatorial ionospheric electric fields: A review, *J. Atmos. Terrestrial Physic*, 43, 377, 1981.

Legrand J. P and P.A. Simon: 1989, solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part I. The contribution to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind. *Annales geophysicae*, 7, (6).