

UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU

**École Doctorale
Sciences et Technologies**

Laboratoire d'Energies
Thermiques Renouvelables
(L.E.T.RE)



N° d'ordre..... /

THÈSE

Présentée par

ZERBO Jean Louis

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Ouagadougou

Option : Sciences Appliquées

Spécialité : Héliophysique

**ACTIVITE SOLAIRE, VENT SOLAIRE,
GEOMAGNETISME ET IONOSPHERE EQUATORIALE**

Soutenue le, **20 Octobre 2012**, devant le Jury composé de:

Président : **John D RICHARDSON**, Professeur Titulaire, Massachusetts Institute of Technology, USA

Membres : **Dieudonné Joseph BATHIEBO**, Professeur Titulaire, Université de Ouagadougou, Burkina

Frédéric OUATTARA, Maître de Conférences, Université de Koudougou, Burkina

Vafi DOUMBIA, Maître de Conférences, Université de Cocody, Côte d'Ivoire

Alhadi WEREME, Directeur de recherche, CNRST, Burkina

Christine AMORY-MAZAUDIER, Chercheur Sénior, LPP/CNRS/UPMC, France

DEDICACE

A mes Frères et Sœurs !

En hommage à mes défunts parents !

REMERCIEMENTS

Le Professeur Joseph Dieudonné BATHIEBO a eu l'amabilité de me recevoir dans son Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables (L.E.T.RE) et permis mon inscription en m'acceptant comme étudiant en Thèse. Merci pour votre disponibilité, vos encouragements et vos précieux conseils tout au long de ce travail. Merci surtout pour votre présence, votre soutien inestimable et votre grande humanité sans lesquels ma thèse n'aurait pas abouti. Puissiez-vous trouver ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Ce travail a été mené en partie au Laboratoire de Physique des Plasmas, Unité mixte de recherche de l'Université Pierre et Marie Curie et du CNRS (LPP/CNRS/UPMC) de Paris. Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Docteur Christine AMORY-MAZAUDIER**, Chercheur sénior au LPP/CNRS/UPMC, pour son accompagnement durant ces trois années de thèse. Je lui dis merci de m'avoir initié à la recherche et surtout de m'avoir fait profiter de ses grandes et riches expériences scientifiques. Merci de m'avoir indiqué le chemin de la recherche exigeante et fructueuse ; merci surtout d'avoir dirigé cette thèse.

J'exprime ma reconnaissance à tous les membres de l'équipe du **LPP/CNRS/UPMC** de Saint-Maur, pour leur accueil, leur collaboration et leur constante disponibilité durant mes différents séjours parmi eux. Merci pour votre soutien.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables (L.E.T.RE) convivialité partagée et pour les soutiens multiformes. Puisses-t-il lire à travers chaque ligne de ce manuscrit le fruit de leurs encouragements.

Le Maître de conférences Frédéric OUATTARA, m'a fait l'honneur de m'accompagner tout au long de ce travail de thèse. Je lui dis merci, ses conseils avisés, et surtout pour l'excellente qualité de ses corrections. Merci à vous de m'avoir permis de m'engager dans le domaine des sciences de l'espace. J'espère pouvoir toujours compter sur vous pour approfondir mes connaissances et améliorer mes techniques de recherche.

Je remercie mon Frère, **le Docteur Roger ZERBO**, pour son soutien inestimable et sa présence indéfectible dans mes moments de doute et de désespoir, depuis mon plus jeune âge. Oui, « la vie est agréable lorsqu'il y a quelqu'un sur qui on peut compter ». Merci de m'avoir constamment rappelé que « ma destinée est plus grande que mes erreurs ». Merci Roger, merci d'être mon frère!!

Je témoigne ma reconnaissance au **Professeur John D. RICHARDSON** du Massachusetts Institute of Technology (MIT) aux USA pour sa disponibilité et pour m'avoir guidé et partagé ses expériences et compétences sur la physique du soleil durant tout ce travail. Merci de m'avoir aidé à améliorer mon anglais et de m'avoir appris la rigueur scientifique. Merci Professeur pour l'intérêt que vous portez à nos efforts de réflexion en acceptant de présider mon jury de thèse.

Je dis merci à Monsieur **Jean Pierre Legrand**, chercheur de l'Institut National des Sciences de l'Univers de Paris à la retraite ; et historien des sciences, pour son aide, ses critiques et suggestions dans mes recherches sur la physique du soleil et des relations Soleil-Terre. Cette thèse est une continuité des travaux qu'il a développés avec Feu Paul Simon. Puisse-t-il trouver ici, l'expression de toute ma reconnaissance pour sa disponibilité et son accueil toujours édifiant.

Je dis merci au **Directeur de Recherche Alhadi WEREME** de l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologie du Centre National de Recherche Scientifique et Technologique du Burkina Faso pour sa participation à mon jury de Thèse qui traduit l'intérêt qu'il accorde à ce travail de réflexion scientifique.

Je remercie le **Maître de Conférences Vafi DOUMBIA**, l'Université de Cocody, en Côte d'Ivoire pour sa sympathie et pour avoir accepté de participer à mon jury de Thèse. Merci de l'intérêt que vous portez à mon travail.

Merci à l'ambassade de France au Burkina Faso, qui a financé trois années de suite mes séjours de travail et de recherche au LPP/CNRS/Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Merci pour votre soutien tout au long de ce travail.

Je dis merci à tous mes amis et collègues de l'Université Polytechnique de Bobo pour leur soutien humain, moral et les beaux instants de comédie partagés le long de la conduite de ce travail. Lisez ici, le témoignage de mon amitié soutenue.

Je dédie enfin cette thèse à toute ma famille et amis de France et du Burkina Faso ainsi qu'à tous ceux qui, où qu'ils soient, m'encouragent à vivre et à aller de l'avant à chaque instant. L'Eternel vous le revaudra et moi, je vous aime beaucoup !

RÉSUMÉ

Au cours de l'Année Héliophysique Internationale (2007-2009), il a été demandé aux scientifiques des différentes disciplines de l'Environnement terrestre (physique solaire, magnétosphère (*cavité du champ magnétique terrestre*), ionosphère (*couche ionisée entourant la terre entre 50 et 700 km*), atmosphère etc...) de fusionner leurs études en une nouvelle discipline, l'Héliophysique, proposant une approche globale du système Terre-Soleil. Cette étude s'inscrit dans ce cadre et nous nous attacherons à établir les liens électromagnétiques entre le soleil et la terre. C'est une tentative pour relier à grande échelle l'activité solaire et le vent solaire au géomagnétisme et à l'ionosphère équatoriale. Le premier chapitre présente certaines connaissances concernant le soleil, le vent solaire l'atmosphère, l'ionosphère et le champ magnétique terrestre utiles à notre étude. Le deuxième chapitre est consacré aux plasmas dans le système Terre-Soleil et principalement au plasma ionosphérique équatorial. Le chapitre 3 rassemble les nombreuses bases de données nécessaires à notre étude : nous montrons que l'inter comparaison de ces bases de données permet de détecter des années exceptionnelles pour tous les paramètres choisis. Le chapitre 4 présente les résultats obtenus concernant la connexion Activité solaire-Vent solaire-géomagnétisme. Nous avons utilisé la classification de Legrand et Simon organisant l'activité solaire/géomagnétique en 4 classes d'activité solaire/géomagnétique : (1) soleil calme/Vent solaire calme, 2) trous coronaux/vents rapides, 3) mouvements de l'héliosheet/vents fluctuants et 4) Ejection de Masse coronale /ondes de chocs). Nous avons raffiné cette classification en utilisant de nouveaux types d'évènements solaires (nuages magnétiques, activité de corotation) et avons pu ainsi classifier 80% de l'activité géomagnétique/solaire. Dans chaque classe d'activité géomagnétique nous avons établi les caractéristiques statistiques du vent solaire. Enfin le dernier chapitre a analysé l'impact du soleil sur l'ionosphère équatoriale. Nous avons sélectionné des types d'évènements solaires et étudié leurs impacts sur l'ionisation équatoriale à Ouagadougou/Burkina Faso. Nous avons comparé pour la classe 1) soleil calme/vent solaire calme les mesures d'ionisation de l'ionosonde de Ouagadougou au modèle semi-empirique IRI (International Reference Ionosphere de 2007). Le modèle IRI-2007 surestime les valeurs de l'ionisation à Ouagadougou. Nous concluons ce travail par les nouvelles perspectives notamment celle d'utiliser nos résultats statistiques pour affiner la modélisation grande échelle du vent solaire et d'étudier l'impact des phénomènes solaires électromagnétiques sur le climat.

Mots clés : Soleil, Vent solaire, Cycle solaire, relations Soleil-Terre, Ionosphère équatoriale, Fréquence critique, Hauteur virtuelle, Activités géomagnétiques, Activités solaires, Diagrammes pixel, IRI-2007.

ABSTRACT

During the International years (2007-2009), it appeared, for the scientists, the necessity to combine several disciplines including solar physics, space physics, plasma physics etc., to a unique one which deals with better approach in Sun-Earth relations: Heliophysics.

To quote George Siscoe who coined this word, Heliophysics is an environmental science, a unique hybrid between Meteorology and Astrophysics.

Our present thesis is a contribution into this news field of interdisciplinary sciences. It is an approach on the study of all these continuous variations known by the terrestrial atmosphere and its implications for human being.

The chapter 1 gives an overview on solar physics and solar-terrestrial relations background. The second chapter deals with Sun-Earth systems plasmas and especially ionosphere plasma. The chapter 3 is the section of all the data sets used in our research.

In chapter 4, we first ratified the classification of geomagnetic/solar activity proposed by Legrand and Simon (1989) and secondly used new wind criteria to improve the classification scheme throughout a standard classification: quiet activity, recurrent activity, shock activity and unclear activity (Zerbo et al., 2012a).

A study of the statistics on each geomagnetic class shows how similar slow solar wind distributions are from cycle to cycle. This result point out clearly that the process accelerating the slow wind does not change even though the solar wind flux is decreasing. Other amazing conclusions are that QA reflects slow wind effects, RA the effects of high wind stream and UA the answer to the fluctuations between high wind stream (~60%) and slow wind (~40%). The study shows that high wind stream (~60%) and slow wind (~40%) are both registered for SA.

In the chapter 5, we investigate the impacts of solar wind on equatorial ionosphere especially foF2 and h'F2 parameters. We also used model to show that the models IRI-2007 overestimates the ionization of the layer F2 of equatorial ionosphere based on Ouagadougou ionsonde station writing.

All the results pointed out by our researches, direct us logically to investigate more efficiently the turbulence in the interplanetary medium through space weather and climate change for forecasting.

Key words: Sun, solar wind, solar cycle, Solar-Terrestrial relations, Equatorial ionosphere, critical frequency, virtual height, geomagnetic activity, solar activity, Pixel diagram, IRI-2007, Space weather

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les relations Soleil-Terre	5
Introduction	5
1.1. Soleil et Milieu interplanétaire	5
1.1.1. Le Soleil : Structure et mécanisme de fonctionnement.....	5
1.1.2. Le milieu interplanétaire	7
1.1.3. Cycle solaire et activité solaire.....	11
1.1.4. Dynamo et magnétisme solaire	13
1.2. L'atmosphère terrestre.....	16
1.2.1. Définition de l'atmosphère.....	16
1.2.2. Structure verticale de l'atmosphère.....	17
1.3. L'environnement terrestre dans le système ionosphère – magnétosphère-vent solaire 19	
1.3.1. L'ionosphère.....	19
1.3.2. Le Vent Solaire et la magnétosphère.....	20
1.4. Dynamo terrestre : Géomagnétisme	28
1.4.1. Historique	28
1.4.2. Champ magnétique terrestre.....	28
Conclusion.....	32
Chapitre 2 : Les plasmas dans le système Soleil-Terre et la physique de l'ionosphère équatoriale	33
Introduction	33
2.1. Plasma solaire, interplanétaire et magnétosphérique	33
2.1.1 Température des espèces : « plasma chaud », « plasma froid ».....	35
2.1.2. Les principaux plasmas spatiaux.....	36
2.2. Le plasma ionosphérique.....	37
2.2.1. Les équations de continuité	38
2.2.2. Mouvement du plasma	39
2.2.3. Influence de la pression et de la gravité : la diffusion ambipolaire dans la région F	41
2.3 Caractéristiques de l'ionosphère équatoriale.....	42

2.3.1. La fontaine équatoriale	43
2.3.2. L'électrojet équatorial	47
Conclusion.....	51
Chapitre 3: Les données et indices d'activité solaire et géomagnétique	52
Introduction	52
3.1. Les indices d'activité solaire	52
3.1.1. Les taches solaires	52
3.1.2. Ejection de masse coronale ou Coronal Mass Ejections (CMEs)	54
3.1.3. Les débuts brusques d'orages : Sudden Storm Commencement : SSC	56
3.1.4. Vent solaire	57
3.1.5 L'indice de flux radio solaire $F_{10.7}$	58
3.3. Les données ionosphériques.....	60
3.3.1. Sondage de l'ionosphère	60
3.3.2. Données des ionosondes.....	62
3.3.3. Ionogramme et hauteur virtuelle h'	63
3.3.4. Indices géomagnétiques : choix de l'indice Aa.....	65
3.4. Quelques analyses de données	69
3.4.1 Indice géomagnétique Aa.....	69
3.4.2. Vent solaire et taches solaires	71
Conclusion.....	74
Chapitre 4 : Vent solaire et géomagnétisme-vers une classification standard de l'activité géomagnétique	86
Introduction	86
4.1. Données et Méthodologie.....	87
4.1.1. Données	87
4.1.2. Méthodologie (classification selon Legrand et Simon, 1989).....	88
4.1.3. Diagramme pixel	90
4.2. Variation long terme de l'activité solaire de 1868 à nos jours.....	92
4.3. Cycle solaire 23	101
4.4. Vers une classification standard de l'activité solaire	103

4.4.1. Critères de classification	103
4.4.2. Résultats	105
4.4.3. Origine solaire et discussion	109
4.5. Connexion géomagnétisme et Vent solaire	112
4.5.1. Etude statistique	112
Conclusion.....	123
Chapitre 5 : Vent solaire et Ionosphère Equatoriale.....	141
Introduction	141
5.1. Influence de l'activité géomagnétique sur l'ionosphère.....	142
5.1.1. Mise en évidence des deux composantes du champ magnétique solaire	142
5.1.2. Influence de l'activité géomagnétique sur la région F2 de l'Ionosphère	144
5.2. Orages sévères, vents solaires et couche F2 de l'Ionosphère.....	145
5.3. Modèle IRI et Mesures in situ des paramètres foF2 de l'ionosphère équatoriale.	152
5.3.1. Données analysées.....	152
5.3.2. Mesures in situ et prédictions IRI-2007	153
5.3.3. Appréciation du Modèle IRI	169
Conclusion.....	173
Conclusion générale et perspectives.....	182
Références bibliographiques	186

Symboles/Acronymes

σ	Conductivité d'électrique
σ_1	Conductivité de Pedersen
σ_H / σ_2	Conductivité de Hall
σ_3	Conductivité équivalente
$\sigma_{//}$	Conductivité parallèle au champ magnétique
$E_{//}$	Composante du champ électrique parallèle au champ magnétique
E_{\perp}	Composante du champ électrique perpendiculaire au champ magnétique
V	Vitesse du vent solaire
k	Constante de Boltzmann
g	Accélération de la pesanteur
N_2^+	Ion d'azote moléculaire dans l'ionosphère
N^+	Ion d'azote atomique dans l'ionosphère
O^+	Ion oxygène atomique dans l'ionosphère
NO^+	Ion monoxyde d'azote dans l'ionosphère
O_2^+	Ion oxygène moléculaire dans l'ionosphère
k	Constante de Boltzmann
He^+	Ion hélium dans l'ionosphère
H^+	Ion hydrogène dans l'ionosphère

e	Electron dans l'ionosphère
E	Couche E de l'ionosphère, comprise entre 90 et 150km d'altitude
F	Couche F de l'ionosphère, comprise entre 150 et 600km d'altitude
F1	Couche F1 de l'ionosphère, entre 150 et 300km d'altitude, de jour
F2	Couche F2 de l'ionosphère, entre 300 et 600km d'altitude, de jour
He⁺	Ion hélium dans l'ionosphère
f_oE	Fréquence critique de la couche E de l'ionosphère
f_oF1	Fréquence critique de la couche F1 de l'ionosphère
f_oF2	Fréquence critique de la couche F2 de l'ionosphère
\vec{j}	Densité de courant ionosphérique
\vec{B}	Vecteur champ magnétique terrestre
F_{10.7}	Radio flux solaire
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ESA	European Space Agency
IRI	International Ionosphere Reference model
CCIR	Comité Consultatif International des Radio communications
URSI	Union Radio-Scientifique Internationale
H	Composante horizontale du champ magnétique
Z	Composante verticale du champ magnétique
D	Déclinaison du géomagnétique

Dst	Indice d'activité magnétique de l'anneau de courant dans la magnétosphère
AU	Indice d'activité magnétique auroral
LASCO	Large Angle and Spectrometric Coronagraph
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
UV	Ultra-violet
CMEs	Coronal Mass Ejections : Ejection de masse coronale
SSC	Sudden Storm Commencement : comment d'orage brusque
Rz ou SSN	Nombre de tache solaire ou Solar Sunspot Number
aa	Indice d'activité géomagnétique
QA	Quiet Activity : activité de calme magnétique
RA	Recurrent Activity : activité récurrente
SA	Shock Activity : activité de chocs
FA/UA	Fluctuating Activity : activité fluctuante / Unclear Activity

LISTE DE FIGURES

Figure 1. 1 : Les différentes parties du soleil. (Soho)	7
Figure 1. 2a : Phénomènes électromagnétiques solaires (Triplet et Roche, 1977 : Météorologie générale)	8
Figure 1. 2b : : Phénomènes électromagnétiques.....	8
Figure 1. 3 : Les deux composantes du champ magnétique solaire.....	10
Figure 1. 4b : Explosion solaire	11
Figure 1. 4a : Tache solaire	11
Figure 1. 5 : Variation de la latitude d'apparition des taches solaires en fonction du temps pour les deux hémisphères solaires. EQ : Equateur Solaire ; 30N : 30° de latitude Nord ; 30S : 30° de latitude Sud (NASA).....	12
Figure 1. 6 : Principe dynamo solaire (Soho).....	16
Figure 1. 7 : Les différentes couches de l'atmosphère.....	19
Figure 1. 8: Schéma représentant les lignes de force du champ magnétique polo dal et la trajectoire du vent solaire de grande vitesse émanant des trous coronaux polaires, deux ou trois années avant le minimum des taches. Le fort gradient du champ magnétique des trous coronaux polaires tendant à rabattre les lignes de forces vers le plan équatorial du soleil et de l'axe de ce champ étant assez incliné, les jets de vent solaire de grande vitesse balayent régulièrement la Terre à chaque rotation du soleil, soit tous les 27 jours (Legrand, 1985).....	24
Figure 1. 9: Au minimum des taches, le gradient du champ magnétique poloïdal émanant des trous coronaux polaires étant faible, le facteur de divergence des lignes de force diminue et les jets de vent solaire de grande vitesse n'atteignent plus la terre. La couche neutre créée par l'inversion des polarités des lignes de force du champ tend à coïncider avec l'équateur solaire. A cette époque du cycle des taches, la Terre reçoit du vent de faible vitesse et de forte densité émanant de cette région (Legrand, 1985).....	24

Figure 1. 10: Interaction vent solaire-magnétosphère (Soho)	25
Figure 1. 11 : Points miroir, gyrofréquence et dynamo (Source: Sun and Earth, Herbert Friedman).....	26
Figure 1. 12 : Phénomènes auroraux (source : Dynamics Explorer I).....	27
Figure 1. 13 : Principe de la dynamo terrestre	29
Figure 1. 14: Principaux mécanismes des relations Soleil-Terre (soho)	32
Figure 2. 1 : Aperçu des différents plasmas existant (Soho)	34
Figure 2. 2 : Profil en fonction de l'altitude des constituants ionisés et neutres (Rishbeth et Garriott, 1969)	38
Figure 2. 3 : Formation de la fontaine.....	44
Figure 2. 4 : Contour de foF2 (Rishbeth et Gariot, 1969)	45
Figure 2. 5 : L'électrojet équatorial (NOAA, NGDC).....	48
Figure 2. 6 : Champs magnétique et électrique en région F équatoriale.....	49
Figure 3. 1: Variation du nombre de taches solaire sur près de 400 ans (NASA).....	53
Figure 3. 2 : Exemple d'acquisition du nombre de taches solaires	54
Figure 3. 3 : Ejection de masse coronale (CME) : SOHO Consortium, ESA, NASA....	55
Figure 3. 4: catalogue donnant les dates des CME.....	56
Figure 3. 5 : Exemple de page permettant l'acquisition des dates des SSC.....	57
Figure 3. 6 : Acquisition des paramètres du vent solaire	58
Figure 3. 7 : Acquisition de l'indice de flux solaire F10.7	59
Figure 3. 8 : Exemple d'ionogramme de jour avec les couches E, F1 et F2. Les fréquences sont en abscisse et les hauteurs virtuelles en ordonnée.....	64
Figure 3. 9 : Illustration du calcul de l'indice k (Menvielle, 2008)	66
Figure 3. 10 : Acquisition des valeurs moyennes de l'indice géomagnétique Aa	68
Figure 3. 11: Profil d'évolution de l'indice Aa	70
Figure 3. 12: Trous coronaux au cours de l'année 2003	71
Figure 3. 13 : Evolution des valeurs journalières de l'indice géomagnétiques Aa	72

Figure 3. 14 : Evolution des valeurs moyennes par rotation solaire de l'indice Aa ...	72
Figure 3. 15 : Superposition de l'évolution du vent solaire et du nombre de taches ..	73
Figure 3. 16 : Profil comparé du vent solaire et de l'indice Aa.....	73
Figure 3. 17: Corrélacion vent solaire et géomagnétisme	74
Figure 4. 1 : Diagramme pixel de l'année 2003 construit à partir des indices Aa	91
Figure 4. 2: Profils des classes d'activité (a) activité calme, (b) activité récurrente,(c) activité de choc,(d) activité fluctuante.....	95
Figure 4. 3a: Répartition statistique des classes d'activité par phase de cycle de taches (cycles 11 à 14).....	96
Figure 4. 3b: Répartition statistique des classes d'activité par phase de cycle de taches (cycles 15 à 18).....	97
Figure 4. 3c: Répartition statistique des classes d'activité par phase de cycle de taches (cycles 19 à 22).....	98
Figure 4. 4: Diagramme pixel illustrant le calme exceptionnel de 2009	102
Figure 4. 5: Activité géomagnétique suivant les phases du cycle de tache solaires ..	102
Figure 4. 6: Variations long-terme de l'activité des jours calmes et du nombre de taches depuis 1868.....	103
Figure 4. 7: illustration des deux classes extraites du fluctuant	104
Figure 4. 8: Variations long terme:(a) calme,(b) récurrente et co-rotation, (c) choc et nuage magnétique,(d) fluctuant et non clair	107
Figure 4. 9: couplage nombre de taches avec (a) chocs,(b)nuage magnétique, (c)récurrent,(d) co-rotation.....	108
Figure 4. 10: couplage nombre de taches avec (a)évènement de chocs (b) évènement récurrents.....	109
Figure 4. 11: Distribution du vent solaire dans la classe de calme magnétique	115
Figure 4. 12 : Histogramme de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité de calme magnétique.....	116
Figure 4. 13: Distribution du vent solaire dans la classe de l'activité récurrente	117

Figure 4. 14 : Pourcentage de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité récurrente	118
Figure 4. 15 : Distribution du vent solaire dans la classe de l'activité de choc	119
Figure 4. 16 : Pourcentage de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité de choc	120
Figure 4. 17 : Distribution du vent solaire dans la classe de l'activité non claire	121
Figure 4. 18 : Pourcentage de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité non claire	122
Figure 5. 1 : Mise en évidence des deux composantes du Champ solaire	143
Figure 5. 2: Les différentes régions de l'ionosphère (Rishbeth et Garriott, 1969).....	145
Figure 5. 3: Pixel traduisant l'activité géomagnétique en 2004	147
Figure 5. 4: Corrélation entre F10.7 et foF2(a) puis h'F2(b).....	148
Figure 5. 5: Valeurs théoriques et anomalie sur (a) foF2 et (b) h'F2	149
Figure 5. 6: Répartition statistique des jours perturbés sur la période étudiée	150
Figure 5. 7: variations mensuelles des paramètres foF2 et h'F2 de l'ionosphère.....	150
Figure 5. 8: effet des différents perturbations sur les paramètres foF2 et h'F2	151
Figure 5. 9.1: Profils de foF2 au cours des saisons d'équinoxe (Mars et Septembre).155	
Figure 5. 9.2 : Profils de foF2 au cours des saisons de solstice (Décembre et Juin) ...	156
Figure 5. 10.1 : Maximum solaire (année 1990).....	159
Figure 5. 10.2 : Maximum solaire (année 1990).....	160
Figure 5. 11 .1 : Minimum solaire (année 1986)	161
Figure 5. 11.2 : Minimum solaire (année 1986)	162
Figure 5. 12.1 : Phase ascendante (année 1987).....	165
Figure 5. 12.2 : Phase ascendante (année 1987).....	166
Figure 5. 13.1 : Phase descendante (année 1994).....	167
Figure 5. 13.2 : Phase descendante (année 1994).....	168
Figure 5. 14.1 : Saisons d'équinoxe	171
Figure 5. 14.2 : Saisons de solstice.....	172

TABLES

Tableau 3. 1 : Les différents indices géomagnétiques	67
Tableau 4. 1: Fréquence des activités solaires sur un siècle et demi	99
Tableau 4. 2: Fréquence des activités solaires (Legrand and Simon, 1989).....	100
Tableau 4. 3: corrélation entre les classes de sources solaires voisines	111
Tableau 4. 4: Comparaison entre classification de Legrand and Simon(1989) et celle de Zerbo et al. (2012a).....	111
Tableau 4. 5: Ordre de grandeur moyenne des conditions moyennes sur le vent solaire dans les quatre classes d'activité géomagnétique.....	123
Tableau 5. 1 : Chocs Sévères et activité fluctuante ; jours et valeurs de Aa au cours de l'année 2004	146

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour l'observateur non averti, les relations Soleil-Terre peuvent paraître simples, voire banales. Les deux astres s'attirent mutuellement au rythme d'un tango gravitationnel orchestré durant 365 jours ou 365 jours un quart. Immuable en apparence, le Soleil inonde la Terre de ses rayons lumineux, jour après jour. Mais pour les scientifiques et les enthousiastes avisés, les relations Soleil-Terre sont loin d'être aussi simples. Divers changements se produisent dans l'Univers à petites et grandes échelles de façon permanente, et nombre d'entre eux peuvent avoir des conséquences de très grande portée pour l'humanité.

Ces changements multiples dans le milieu interplanétaire et dans l'environnement proche de notre planète trouvent leur origine dans les différents aspects de notre étoile. En effet, la vie du soleil est jalonnée de périodes de calme apparent et aussi des périodes d'intense rayonnement en raison des permanentes réactions thermonucléaires qui ont lieu en son noyau.

Aujourd'hui, il est bien connu, depuis les travaux de Schwabe (1843), que les variabilités observées dans la vie du Soleil suivent un cycle de 11 ans caractérisé par des taches solaires dont l'évolution est comparable à une gaussienne.

Depuis la découverte par Mairan au 19^{ème} siècle d'un flot de particules émises constamment du soleil et son appellation « vent solaire » que nous devons à Parker en 1958, l'exploration de l'Univers et l'étude des plasmas spatiaux occupent une place très importante dans le monde de la recherche fondamentale et appliquée.

Au-delà de son importance scientifique, les relations Soleil-Terre constituent aussi aujourd'hui un sujet qui soulève des questions immédiates pour l'humanité. Par exemple, les tempêtes solaires aux hautes latitudes, comme au Canada, sont l'équivalent des ouragans sur la côte du golfe du Mexique. Les particules à haute

énergie qui frappent la Terre, en plus de déclencher le phénomène des aurores boréales, se révèlent capables d'asséner des coups débilissants aux satellites de communication et aux systèmes terriens à grande distance comme les réseaux électriques et les câbles sous-marins. Par conséquent, les travaux de recherche scientifique ont une incidence directe sur notre capacité de prévoir les conditions météorologiques spatiales et de protéger contre les défaillances les infrastructures dont la société moderne a le plus grand besoin.

Ainsi de nombreux travaux, allant dans le sens de la compréhension de la structure et de la formation des différentes couches de l'atmosphère terrestre virent le jour ; et continuent d'être approfondis. Chapman et Bartels (1940), Baker et Martyn (1953) se consacrèrent à l'explication des mécanismes de génération de l'électrojet équatorial après sa découverte à Huncayo en 1931 par Sydney Chapman. Ils ont posés les bases de la formation de l'ionosphère. Pour comprendre et expliquer les effets de la variabilité du soleil sur le milieu interplanétaire, et dans le voisinage proche de la Terre, des chercheurs comme Legrand et Simon (1984 ; 1989 ; 1990 ; 1991) ; Richardson et Cane (2000 ; 2002) , Ouattara and Amory-Mazaudier (2009), Zerbo et al (2011 ; 2012a) ont étudié l'activité solaire à partir des différentes variations transitoires que connaît le champ magnétique terrestre en réponse à l'influence du magnétisme solaire. Ces auteurs ont alors proposé un découpage de l'activité géomagnétique en quatre classes suivant des conditions des vitesses du vent solaire et l'indice d'activité géomagnétique Aa (activité de calme magnétique, activité récurrente, activité de chocs et activité fluctuante).

Derrière cette courte description des relations Soleil-Terre se cachent de nombreux problèmes scientifiques non résolus qui sont d'une importance et d'une complexité extraordinaires.

C'est pourquoi, à la suite de ces scientifiques et chercheurs, nous avons entrepris, également, des travaux de recherche en vue de comprendre les phénomènes solaires

(éjections de masse coronales, éruptions solaires, orages, etc.), leurs impacts dans le milieu interplanétaire et faire de possibles prédictions.

C'est dans ce sens que nous avons consacré trois années de recherche au sujet « *Activité solaire, Vent solaire, géomagnétisme et Ionosphère équatoriale* » qui constitue l'objet même de notre présente thèse de doctorat.

Ce travail a fait l'objet de nombreux résultats scientifiques intéressants que nous structurons de la façon suivante :

Le *chapitre 1* présente les généralités sur les relations Soleil-Terre en insistant sur les connaissances utiles à la compréhension de la physique du soleil et le géomagnétisme, bases de notre travail.

Le *chapitre 2* traite des différents plasmas existant dans le système Soleil-Terre. Ce chapitre mettra beaucoup plus l'accent sur le plasma ionosphérique et ses caractéristiques en raison de l'importance de ce plasma non collisionnel pour notre travail.

Le *chapitre 3* fait l'inventaire des données et permet d'apprécier des indices solaires et géomagnétiques nécessaires pour notre travail. Nous y expliquons les méthodes d'acquisitions des données tout en faisant des analyses à moyenne et grande échelles que nous exploiterons dans les chapitres suivants.

Le *chapitre 4* expose et explique l'activité géomagnétique. Dans ce chapitre, nous validons dans un premier temps la classification de Legrand et Simon (1989) puis nous la raffinons en l'améliorant par une classification standard (Zerbo et al., 2012a). Pour finir nous faisons une étude statistique par classe d'activité pour en tirer de nouvelles conditions sur les vitesses du vent solaire.

Le *chapitre 5*, examine le comportement de l'ionosphère équatoriale en réponse à l'impact du vent solaire et des éjections de masse coronale. Dans ce chapitre, nous comparons les données observées et les prédictions faites avec la version 2007 du

modèle International Reference Ionosphere (IRI-2007). Nous terminons notre travail par une conclusion générale qui non seulement récapitule tous nos résultats importants mais aussi décline les différentes perspectives de la présente recherche.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de deux nouvelles disciplines l'Héliophysique et la météorologie de l'Espace.

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES RELATIONS SOLEIL-TERRE

Introduction

L'environnement interplanétaire revêt un intérêt certain pour l'humanité, en ce qu'il est le siège de manifestations incroyables et majestueuses tant pour leur beauté que pour leur ampleur, d'où la nécessité de comprendre les différents phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent ces manifestations.

Le soleil interagit avec la terre suivant différents canaux:

- 1) les rayonnements électromagnétiques solaires à l'origine de la formation de l'ionosphère (couche ionisée qui entoure la terre située entre 50 et 800km) qui se propagent à la vitesse de la lumière (300 000 km/s) et atteignent la terre en 8 minutes après avoir parcouru 1 UA et égale à la distance Soleil-Terre ;
- 2) le vent solaire, flot de particules, formé essentiellement de protons et d'électrons, a une vitesse comprise entre 400 et 800 km/s. Les particules du vent solaire atteignent la terre en plusieurs jours.

Dans ce chapitre nous faisons une synthèse des quelques connaissances utiles sur le soleil, l'atmosphère terrestre, le magnétisme de la Terre en vue de mieux comprendre l'impact de l'astre solaire sur le voisinage proche de notre planète.

L'intérêt majeur de ces généralités sur la physique du soleil et la géophysique vise à appréhender les mécanismes majeurs régissant les relations Soleil-Terre et Météorologie de l'espace objet de cette présente thèse de doctorat.

1.1. Soleil et Milieu interplanétaire

1.1.1. Le Soleil : Structure et mécanisme de fonctionnement

Le Soleil est une gigantesque boule de gaz très chaude d'une masse égale à 330 000 fois celle de la Terre pour un volume 1,3 million de fois plus grand que notre planète.

A lui seul, il rassemble 99,8 % de la masse totale du Système Solaire. La puissance rayonnée totale est de l'ordre de 4.10^{26} W soit $2,6.10^8$ W.m⁻² dont la terre ne reçoit au niveau des nuages que $1,743.10^{17}$ W soit 1367 W.m⁻². Cette quantité reçue au niveau des nuages s'appelle constante solaire. L'hydrogène est le composant majoritaire du soleil (93,96%). On y rencontre également l'hélium (5,9190%), l'oxygène (0,0648%), le carbone (0,0395%) et l'azote (0,0082%).

Le soleil tourne sur lui-même. Le modèle rendant compte des petites oscillations observées à sa surface, indiquent que son mouvement est régi par une rotation différentielle de 27 jours (à l'équateur) à 33 jours (aux pôles).

Du fait de cette rotation propre, le soleil, vu de la terre, possède la rotation synoptique et la rotation sidérale qui est sa rotation par rapport aux étoiles. La rotation synoptique a une période de 27,2753 jours terrestres à 16° de latitude avec une moyenne latitudinale de 27,7 jours et une variation d'environ 25 à 35 jours de l'équateur aux pôles.

La moyenne de la rotation sidérale est de 25, 38 jours à 50000 km de la surface.

Par ailleurs, du fait de l'inclinaison de l'équateur solaire, 7°15', par rapport au plan écliptique, la terre dans son mouvement annuel se trouve tantôt au dessus ou tantôt en dessous de l'équateur du soleil. Cette topologie est à l'origine des équinoxes que connaissent les saisons sur notre planète.

Le soleil présente une structure assez complexe. Sa surface appelée photosphère est entourée d'une sorte d'atmosphère, la chromosphère. A l'intérieur on y distingue une zone convective, une zone radiative et un noyau. A la surface apparaissent des protubérances, des filaments et des taches (figure1.1).

La couronne solaire, zone très turbulente qui s'étend de la photosphère (surface solaire d'où sont émis les photons) jusque dans le milieu interplanétaire, est caractérisée par une densité qui décroît très rapidement en fonction de la distance au centre du Soleil. Les zones émissives plus denses sont appelées plateaux coronaux tandis que les plus denses et moins émissives sont appelées trous coronaux.

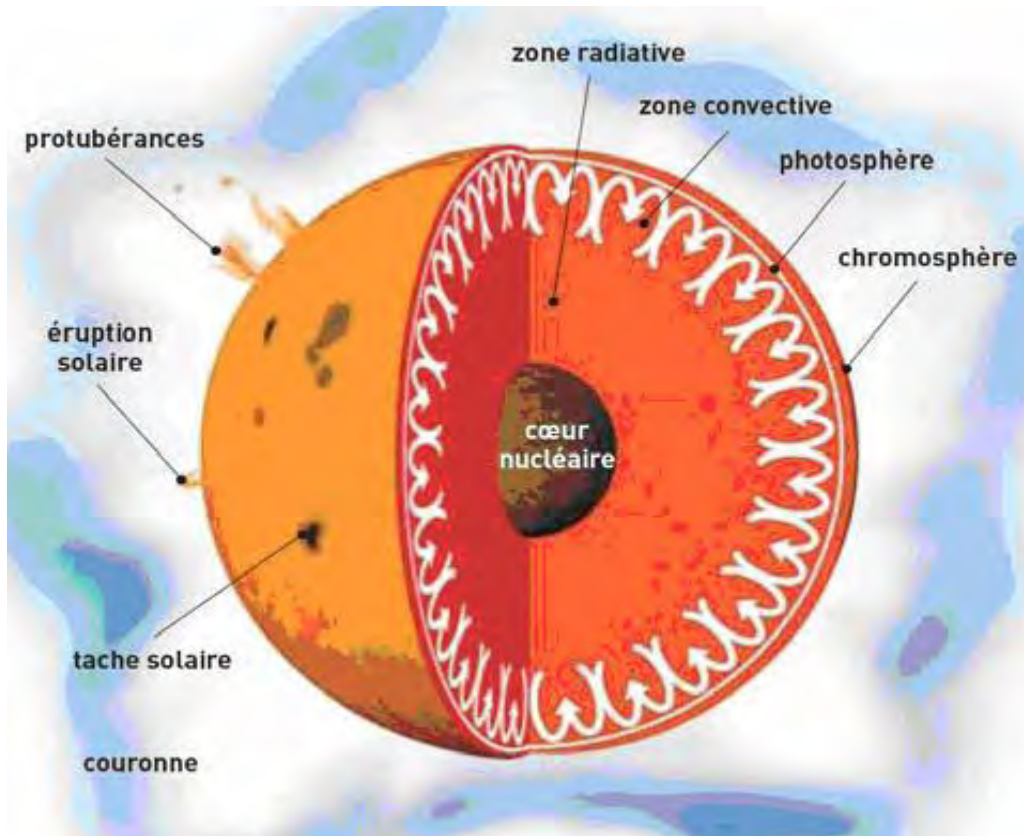


Figure 1. 1 : Les différentes parties du soleil. (Soho)

1.1.2. Le milieu interplanétaire

Le soleil se manifeste dans l'environnement interplanétaire suivant plusieurs mécanismes qui affectent tout l'espace, les principaux sont les rayonnements électromagnétiques et le vent solaire. La figure 1.2a présente le spectre des phénomènes électromagnétiques. Le soleil émet dans toutes les gammes de fréquences. Dans le visible il émet des ondes électromagnétiques de l'infra rouge à l'ultra violet. Il émet aussi des ondes radioélectriques et des rayons X et gammas.

D'autres composantes d'origine solaires (ondes, champ et particules) interagissent de façon permanente avec la Terre et sont à l'origine des différentes perturbations d'effets multiformes observés dans l'environnement terrestre. La figure 2b regroupe l'ensemble de ces phénomènes. Notre étude portera essentiellement sur le vent solaire et le champ magnétique interplanétaire (encadrée sur cette figure).

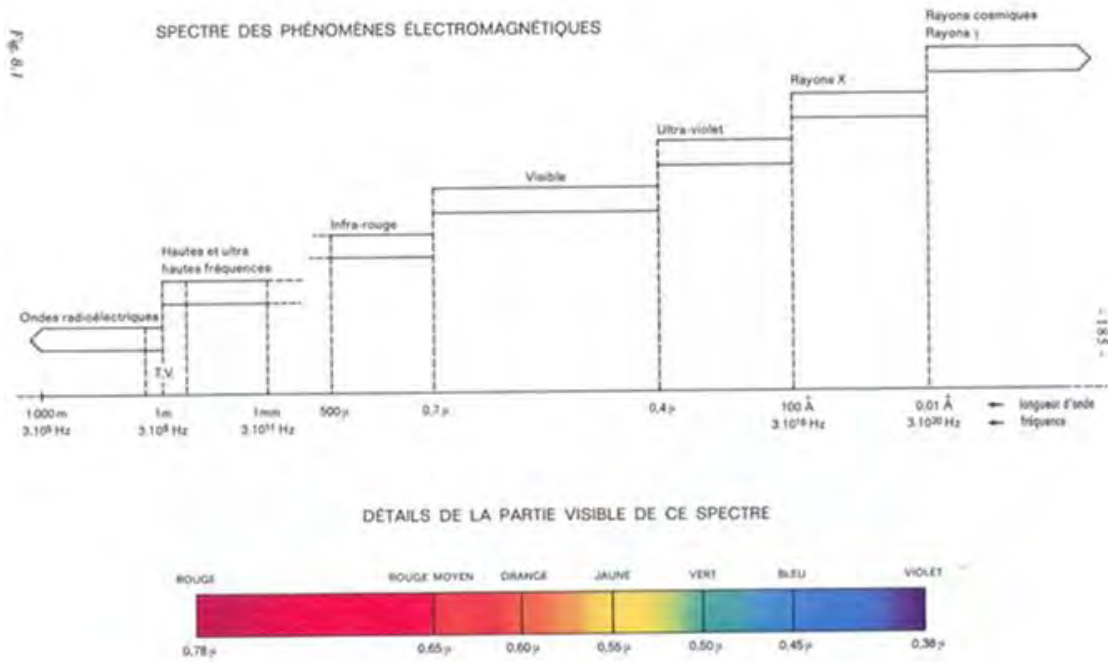


Figure 1. 2a : Phénomènes électromagnétiques solaires (Triplet et Roche, 1977 : Météorologie générale)

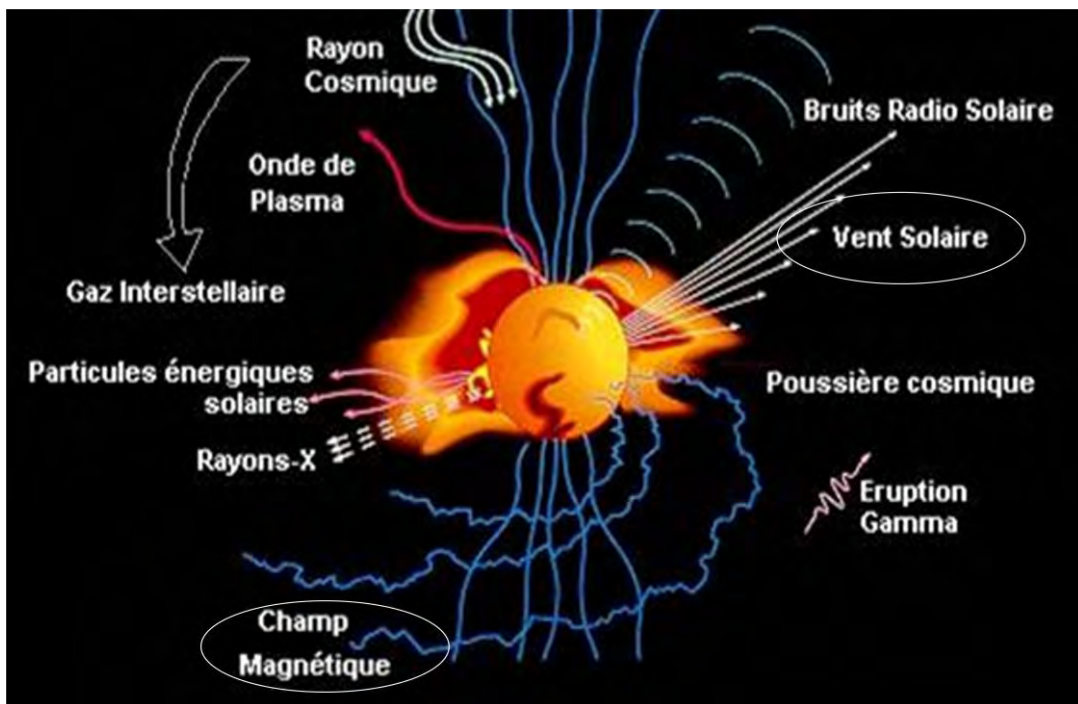


Figure 1. 2b : Phénomènes électromagnétiques

Le Soleil par émission d'ondes se comporte comme un corps noir à une température d'environ 5700 K dont le maximum du spectre est situé dans le visible. Le flux total

de ces ondes est peu variable dans le temps. Il l'est essentiellement du côté des hautes fréquences (rayons UV et au delà) et des basses fréquences (flux radio). La variabilité est reliée aux taches solaires, centres magnétiques actifs dus aux mouvements fluides près de sa surface et qui peuvent générer des éruptions solaires. Selon Legrand (1984), l'ensemble des perturbations qui s'étendent à tous les niveaux de l'atmosphère solaire s'appelle activité solaire. Selon cet auteur, toutes les manifestations de l'activité solaire résultent de l'émergence à travers la photosphère et de la pénétration dans la chromosphère et la couronne, de champ magnétique dont l'origine est à l'intérieur du soleil. Certaines de ces manifestations étant liées à l'évolution de champ magnétique fermé non ouvert sur le milieu interplanétaire et d'autres associées à l'évolution de champ magnétique ouvert sur le milieu interplanétaire.

La figure 1.3 présente les deux composantes magnétiques de la dynamo solaire qui est à l'origine du champ magnétique solaire. Il existe un champ poloidal initial dans une direction donnée (figure 1.3 en haut à gauche). Le fait que Le soleil tourne à des vitesses différentes au pôle et à l'équateur provoque la torsion des lignes du champ poloidal qui engendre un champ multipolaire (champ toroïdal), Legrand et Simon (1991 ; 1992). Sur la figure 1.3 est représentée en haut à gauche les variations temporelles du cycle solaire complet de 22 ans qui est dipolaire puis multipolaire et ensuite dipolaire. En bas à droite nous avons représenté les observations des deux champs magnétiques et nous voyons clairement la succession des phases multipolaires représentées par le célèbre diagramme papillon au centre. La succession des phases dipolaires est observable sur les bords externes de la figure par l'alternance des couleurs jaune et bleue. Au cours d'un cycle complet, il y a deux périodes durant lesquelles le champ magnétique solaire est multipolaire. L'ordre de grandeur de la composante dipolaire du champ magnétique est d'environ 10 Gauss alors que celui de la composante toroïdale est d'environ 3000 à 5000 Gauss.

A sketch of the formation of sunspots and the 22-years sunspot cycle due to the differential rotation of plasma in the photosphere

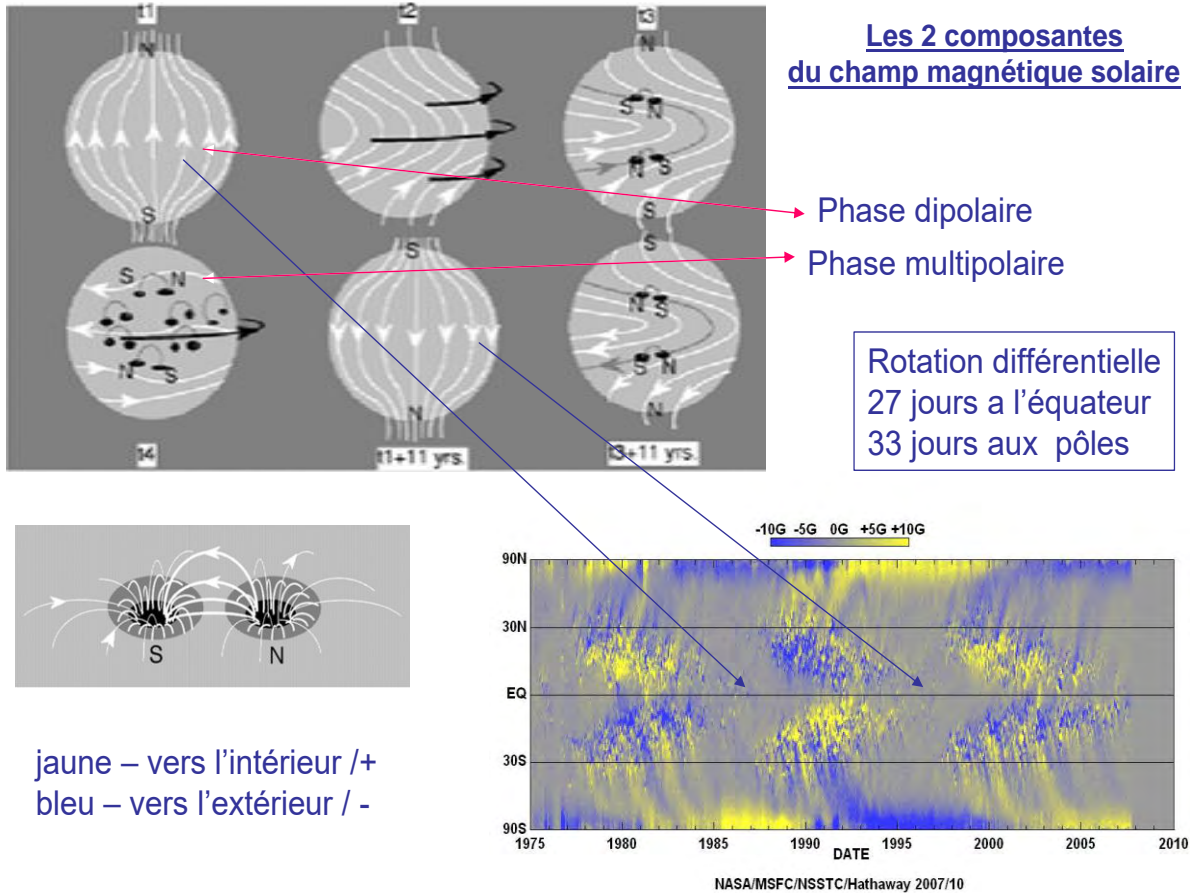


Figure 1.3 : Les deux composantes du champ magnétique solaire

Les phénomènes liés à l'activité du champ toroïdal (ou champs fermé) sont : les taches, les facules, les éruptions chromosphériques, les centres actifs...

Les trous et les jets coronaux sont des phénomènes résultant du champ magnétique ouvert sur le milieu interplanétaire (champ dipolaire).

Ainsi la variabilité de l'activité du soleil se divise en 2 types d'activités :

- 1) l'activité liée au dipôle solaire ou cycle du vent solaire ;
- 2) l'activité liée au champ toroïdal ou activité du cycle de taches (11 ans)

Le champ magnétique fermé et le champ magnétique ouvert vers l'espace présentent une évolution cyclique à long terme. La première manifestation du caractère cyclique de l'activité solaire connue depuis plusieurs siècles est celle des taches avec une périodicité moyenne de 11ans.

1.1.3. Cycle solaire et activité solaire

La morphologie du disque solaire n'est pas uniforme dans le temps et dans l'espace. Si nous faisons une photo du soleil à différentes périodes, il apparaît des différences remarquables au niveau de la photosphère. Les observations les plus connues sont la présence périodique de zones sombres à la surface du soleil. Ces zones sombres sont appelées taches solaires (**figure 1.4a**) et les zones actives entraînent les explosions (**figure 1.4b**).

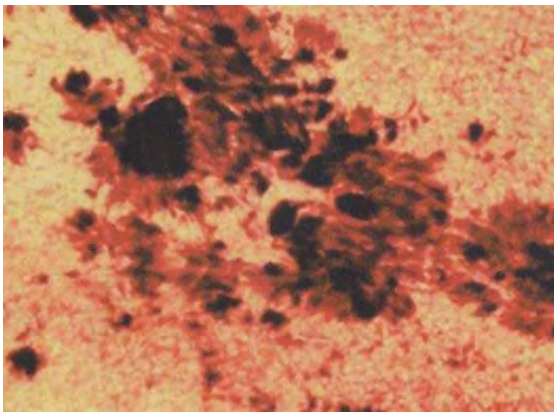


Figure 1.4a : Tache solaire

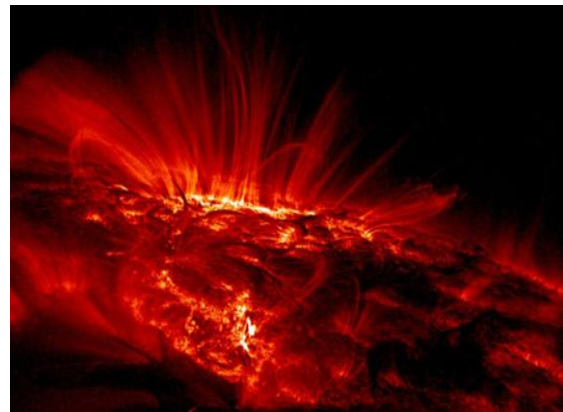


Figure 1.4b : Explosion solaire

Samuel Heinrich Schwabe (1844) a montré que le nombre apparent de taches sur la surface du soleil suivait un cycle périodique d'environ onze (11) ans. Cette description fut complétée par Edward Walter Maunder (1904), qui montra que les taches apparaissaient tout d'abord aux hautes latitudes (maximum 40°) puis de plus en plus bas à mesure que le cycle avançait (minimum 5°). Cette description est connue sous le célèbre nom de « Diagramme Papillon » (figure 1.5 panneau du haut) déjà au centre de la figure 1.3. Sur la figure 1.5, panneau du bas, nous voyons la variation du nombre de taches en fonction du temps de 1870 à 2010. Ce cycle périodique de 11 onze ans défini par ces deux auteurs est connu aujourd'hui sous le nom de cycle solaire. 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.

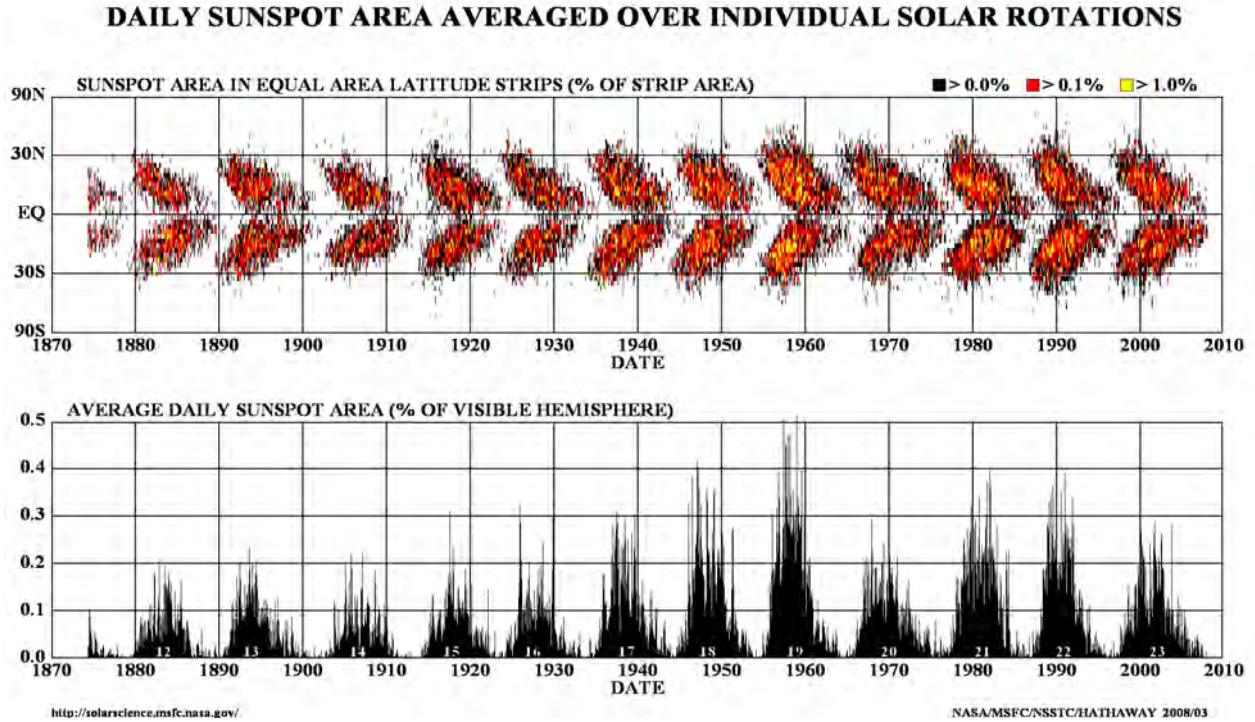


Figure 1. 5 : Variation de la latitude d'apparition des taches solaires en fonction du temps pour les deux hémisphères solaires. EQ : Equateur Solaire ; 30N : 30° de latitude Nord ; 30S : 30° de latitude Sud (NASA).

Vue de la Terre, l'influence du Soleil varie principalement selon une période journalière : rotation de la terre et une période annuelle : révolution de la terre autour du soleil. Dans l'absolu, l'activité solaire de taches est réglée par un cycle d'une période moyenne de 11,2 ans d'un maximum au suivant ; mais la durée peut varier entre 8 et 15 ans et l'amplitude des maxima peut varier du simple au triple. En 1849, l'astronome suisse Johann Rudolf Wolf établit une méthode de calcul de l'activité solaire basée sur le nombre de taches : $R = k(10g + f)$. Dans cette relation R désigne le nombre de taches ou nombre de Wolf, g le nombre de groupes de taches, f le nombre total de taches et k un facteur de normalisation qui dépend de l'observateur et de l'instrument d'observation. Les cycles de Schwabe sont numérotés à partir du maximum de 1762. Nous sommes dans le 24^{ème} cycle solaire depuis 1755, date à laquelle les taches commencèrent à être répertoriées. Chaque cycle rend compte du comportement du soleil (activité solaire) sur une période moyenne de 11 ans

permettant ainsi d'expliquer certains phénomènes qui sont tout à la fois complexes et majestueux (aurores, orages magnétiques ...).

Le plus souvent on définit un cycle solaire de 22 ans dit « vrai » cycle solaire. Ce cycle tient compte de la polarité globale du champ magnétique du soleil. En regardant le Soleil dans sa globalité (grande échelle), il se comporte comme si une barre aimantée, placée en son centre, tournait de façon plus ou moins régulière. Après 11 ans, les pôles nord et sud sont inversés ; il faut attendre de nouveau 11 ans (en moyenne toujours) pour retrouver l'orientation initiale des pôles.

1.1.4. Dynamo et magnétisme solaire

1.1.4.1. Historique

Si les astronomes spécialistes du Soleil peuvent établir de bonnes prédictions de l'activité solaire sur la base des modèles numériques, ils éprouvent néanmoins quelques difficultés à représenter simultanément l'ensemble de l'activité solaire :

- Le cycle de 11 ans des taches solaires
- Le minimum de Maunder (petit âge glaciaire des années 1650-1710)
- Le déplacement des taches selon la loi de Schperer (le diagramme en papillon)
- La loi des polarités de Hale suivant un cycle de 22 ans
- La loi de Joy décrivant l'inclinaison des groupes de taches
- L'inversion des champs magnétiques polaires à l'approche du maximum du cycle

Pour toutes ces raisons les spécialistes pensent que le champ magnétique solaire est généré par une sorte de dynamo magnétique située à l'intérieur du Soleil (champ poloidal primaire). Ils fondent cette hypothèse sur le fait que son champ magnétique change radicalement en l'espace de quelques années mais d'une manière cyclique laissant penser qu'il est généré de façon continue par le Soleil. En quoi consiste donc ce fonctionnement tout à la fois mystérieux et impressionnant ?

1.1.4.2. Le fonctionnement de la dynamo solaire.

Le mécanisme de la dynamo a été proposé dès les années 1950. Le Soleil ne tournant pas comme un corps solide, la rotation équatoriale, plus rapide va déformer les lignes du dipôle magnétique général et créer une composante Est-Ouest, dite azimutale (**Figure 1.3**). C'est l'explication de l'apparition, par paire, des taches qui sont les pôles de petits aimants Est-Ouest libérés en surface. Les couches sous-jacentes sont animées de tourbillons convectifs, pour assurer le transport de l'énergie thermonucléaire, et vont détruire ces aimants azimutaux ; on est alors en période de minimum de taches. Les deux ingrédients pour faire marcher cette dynamo sont, d'une part, la rotation «différentielle" du Soleil, d'autre part, ses mouvements de convection, le cycle étant une compétition entre les deux phases de création et destruction des aimants Est-Ouest. L'enveloppe du Soleil va réagir à ces apparitions et disparitions périodiques des aimants Est-Ouest : il se gonfle et se dégonfle, comme le montrent les variations du diamètre apparent, effectuées à l'Observatoire de Nice-Côte d'Azur par F. Laclare, Revue 191.

Cette pulsation semble s'accompagner des variations du rayonnement total solaire, comme en témoignent les variations à long terme de la "constante solaire". Il apparaît clairement que la variabilité du champ magnétique solaire, avec ses conséquences sur l'énergie rayonnée par notre astre, peut entraîner un forçage de nature "magnéto convectif" sur l'atmosphère terrestre (convection dans un milieu ionisé en présence d'un champ magnétique).

Les vitesses différentielles entre les différentes parties du Soleil et les phénomènes de convection, sont à l'origine du magnétisme solaire, tout comme une dynamo fabrique de l'électricité. Ce brassage entraîne une grande agitation moléculaire, qui en arrachant des électrons aux atomes, les transforme en ions donnant naissance à un courant et générant de ce fait, le magnétisme.

Le magnétisme solaire varie selon un cycle moyen de 22 ans. La polarité s'inverse avec l'évolution des lignes de force qui s'enroulent suivant les mouvements tourbillonnaires de la convection et de la rotation du Soleil sur lui-même.

En s'enroulant, les lignes se rapprochent les unes des autres en accroissant localement le champ magnétique. Lorsque l'intensité magnétique est suffisamment élevée, la pression magnétique l'emporte sur la pression gazeuse et la région, où le champ est concentré, est soumise à une poussée. Elle émerge alors sous la forme d'une boucle dont la base est constituée de deux taches de part et d'autre de l'équateur. Elles émergent tout d'abord à l'endroit où la torsion est la plus élevée, à 40° de latitude. Les zones d'émergences se propagent ensuite vers l'équateur. Elles apparaissent à des latitudes privilégiées et avec une inclinaison par rapport à l'équateur. Sitôt émergés, les champs magnétiques de ces régions se trouvent soumis aux courants de la matière, qui les érodent peu à peu, et, en même temps, étirés par la rotation différentielle. Le champ de la dernière tache, plus proche du pôle et de polarité inverse, diffuse alors préférentiellement vers lui. Au bout de 5 à 6 ans, une quantité suffisante du champ magnétique a diffusé permettant que le champ des pôles s'annule, puis s'inverse peu à peu (Figure 1.3). Le phénomène progresse ainsi pour obtenir une inversion complète du champ en 11 ans. Par conséquent, le cycle complet incluant la polarité, est de 22 ans. La figure 1.6, panneau de gauche (Paterno, 2006) synthétise les mécanismes contribuant au processus de la dynamo solaire. Les deux ingrédients initiaux sont le champ magnétique principal dipolaire et les mouvements de rotation et de convection (à gauche de la figure 1.6). Sous l'effet de la rotation différentielle les lignes du champ dipolaire sont twistées et engendrent progressivement un champ multipolaire composée de multiples boucles apparaissant sombres sur le disque solaire : ce sont les taches solaires ou la composante toroïdale multipolaire du champ magnétique solaire. Le couplage entre ce champ toroïdal, le mouvement de convection interne du soleil et la rotation différentielle du soleil régénère le champ poloidal et le processus recommence. Le panneau de droite de la

figure 1.6 présente une photo du champ magnétique solaire prise par le satellite SOHO.

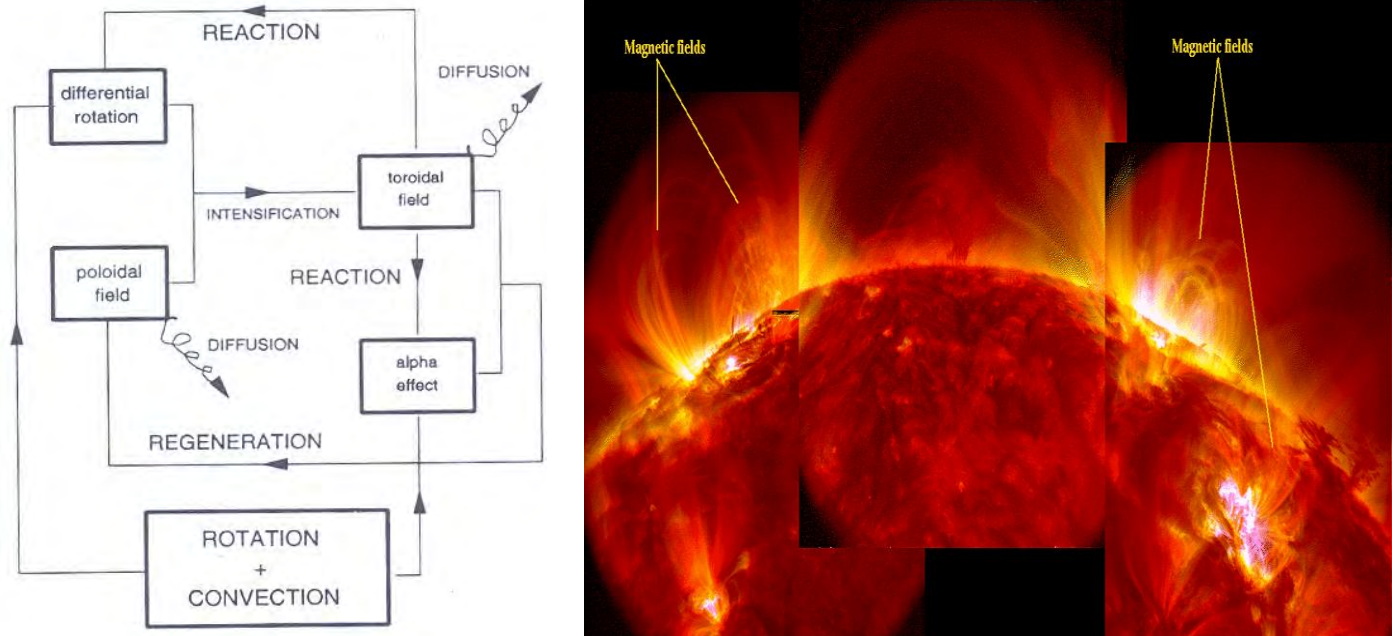


Figure de Paterno 2006,

Figure 1. 6 : Principe dynamo solaire (Soho)

1.2. L'atmosphère terrestre

1.2.1. Définition de l'atmosphère

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui enveloppe tout corps céleste (la Terre ou tout autre astre, par exemple) possédant un champ de gravitation suffisamment fort pour empêcher ce gaz de particules de s'échapper.

Principalement constituée de diazote (N_2), de dioxygène (O_2) et d'argon (Ar), l'atmosphère terrestre renferme des constituants en quantités minimes tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le Néon (Ne). Des traces de nombreux autres gaz sont également présentes : l'hélium (He), le krypton (Kr), le dihydrogène (H_2), le xénon (Xe) et l'ozone (O_3). A ces concentrations dans l'air sec, il faut y ajouter un fort taux

en vapeur d'eau (H₂O), variant de 1% dans les régions polaires à 4 % dans les régions équatoriales. La basse atmosphère est le domaine des pollutions majoritairement d'origine anthropique qui sont à l'origine des dégradations environnementales telles que les effets des pluies acides, le trou de la couche d'ozone ou l'effet de serre.

L'atmosphère terrestre présente une stratification verticale et s'étend sur une épaisseur de l'ordre de 10 000 km

1.2.2. Structure verticale de l'atmosphère

❖ Troposphère

La première couche rencontrée à partir du sol se nomme la troposphère et s'étend sur une altitude moyenne d'environ 13 km jusqu'à la tropopause, sa limite supérieure. L'altitude de la tropopause varie cependant en fonction de la latitude, de 9 km aux pôles (température de - 40 °C) à 17 km au niveau de l'équateur (température de - 80 °C). La densité de l'air y étant élevée, la masse de cette couche représente environ 80% de la masse totale de l'atmosphère, alors que son volume constitue seulement 1,5% du volume total de l'atmosphère. Dans cette couche, le gradient thermique vertical est négatif, de - 6,5 °C en moyenne pour 1 000 m de dénivellation. De puissants vents (jet-stream) y circulent d'Ouest en Est aux latitudes moyennes, entre 9 et 14 km d'altitude, avec des vitesses de l'ordre de 200 à 500 km/h. Les lignes aériennes, qui se positionnent au niveau de la tropopause ou légèrement au-dessus, utilisent d'ailleurs ces vents afin de réduire leur temps de vol. Cette mince couche gazeuse troposphérique, où se produisent les phénomènes météorologiques (formation des nuages, mouvements des masses d'air), joue un rôle essentiel sur Terre.

❖ Stratosphère

Située juste au-dessus de la troposphère avec la tropopause comme transition, la seconde couche est désignée sous le nom de stratosphère. Elle s'élève jusqu'à la stratopause (sa limite supérieure), à une altitude d'environ 50 km, où règne une température voisine de celle rencontrée au niveau de la surface terrestre. La

température reste constante dans la stratosphère inférieure. Cependant, le phénomène d'absorption de la couche d'ozone (aux environs de 20 à 30 km d'altitude), qui filtre les rayons ultraviolets solaires nocifs à la vie, entraîne une augmentation de la température au sein de la troposphère supérieure. Dans cette couche, le gradient thermique y est donc globalement positif.

❖ **Mésosphère**

La troisième couche, située entre 50 et 80 km d'altitude, est appelée la mésosphère. Le gradient thermique y redevient négatif avec une limite de température de l'ordre de -110 à -140 °C au niveau de sa limite supérieure (mésopause). La densité de l'air y est très faible, mais reste cependant suffisante pour brûler les météores extraterrestres (étoiles filantes).

❖ **Thermosphère et ionosphère**

La dernière couche de l'atmosphère s'étend au-delà de 80 km et jusqu'à une altitude de 600 km. Dans cette couche, l'air se fait extrêmement rare (proche du vide physique). Compte tenu des températures élevées qui y règnent (jusqu'à 1200 °C au maximum), cette couche est appelée thermosphère et coïncide également avec l'ionosphère. En effet, la propagation et l'absorption du rayonnement solaire dans cette couche atmosphérique entraînent son ionisation, la rendant ainsi conductrice (formation d'un plasma). Ce plasma, qui présente notamment la propriété d'absorber et de réfléchir une partie des ondes radios émises depuis la Terre, permet ainsi à des radiocommunications de s'effectuer sur de très longues distances. Ce phénomène d'ionisation est également à l'origine des aurores polaires.

❖ **Exosphère**

Elle désigne la région située au-delà de l'ionosphère. Cette couche se prolonge jusqu'à 10 000 km environ, représentant la limite ultime où l'atmosphère terrestre, devenue extrêmement raréfiée en air, se dilue dans le vide de l'espace. C'est dans cette couche que gravitent les satellites artificiels.

La figure 1.7 ci-dessous représente les différentes couches de l'atmosphère.

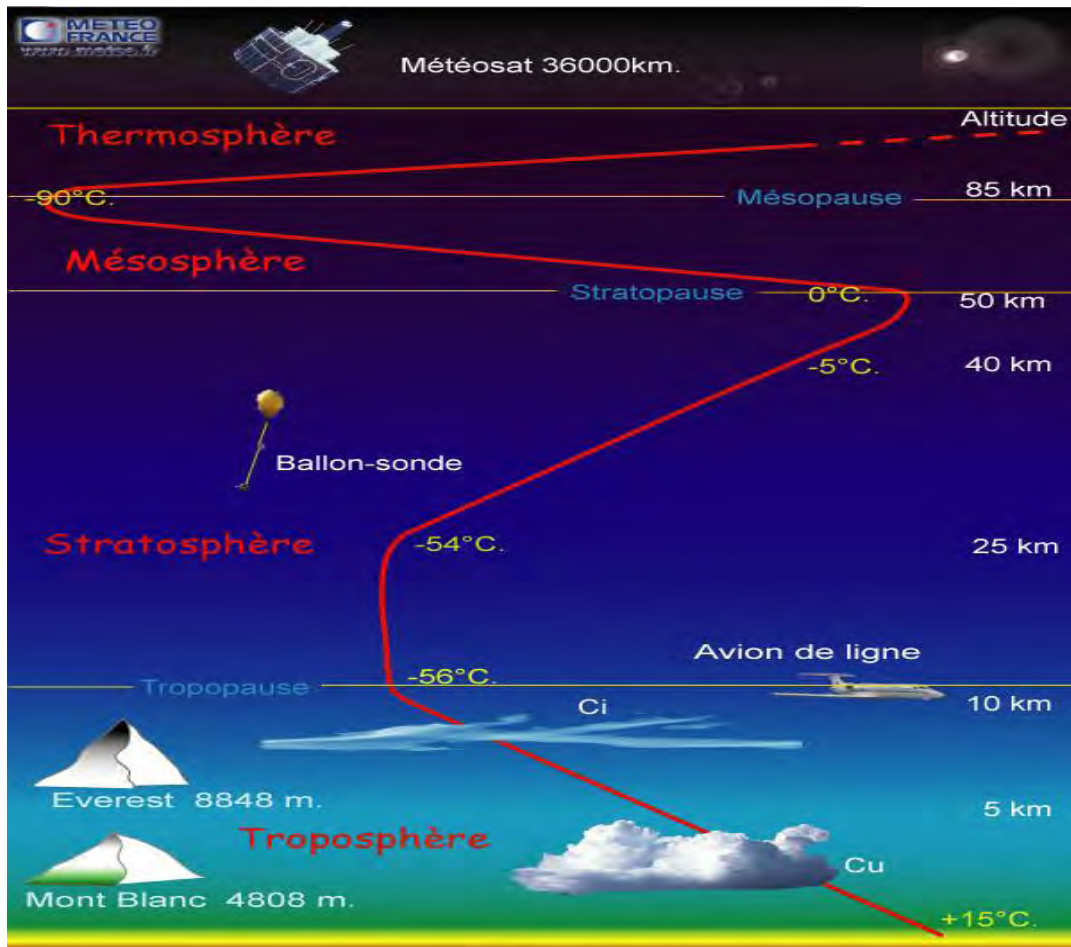


Figure 1. 7 : Les différentes couches de l'atmosphère

(Source : <http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/index.jsp>)

1.3. L'environnement terrestre dans le système ionosphère – magnétosphère-vent solaire

1.3.1. L'ionosphère

L'ionosphère est une région de l'atmosphère située entre la mésosphère et la magnétosphère (cavité du champ magnétique terrestre), c'est à dire entre 60 et 800 km d'altitude. Elle est constituée de gaz fortement ionisés à très faible pression (entre $2 \cdot 10^{-2}$ mbar et $1 \cdot 10^{-8}$ mbar) et à haute température (-20 à +1000°C). On distingue généralement trois couches aux propriétés particulières vis-à-vis de la propagation des ondes :

Couche D : altitude de 60 à 90 km, pression 2 Pascals, température $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$, densité électronique 10^4 . Constituée d'ions polyatomiques. Absorbante pour les ondes de fréquence inférieure à quelques MHz, elle apparaît avec le lever du Soleil et disparaît immédiatement après le coucher de celui-ci.

Couche E : altitude de 90 à 150 km, pression 0,01 Pascals, température $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, densité électronique 10^5 . Constituée d'oxygène et monoxyde d'azote moléculaires ionisés et d'ions météoritiques. Elle est diurne et présente tout au long du cycle solaire. Elle réfléchit les ondes de quelques MHz jusqu'à une fréquence limite qui dépend de l'angle d'incidence de l'onde sur la couche et de la densité de celle-ci. Au cours de l'été, apparaissent parfois pendant quelques dizaines de minutes, voire quelques heures, des « nuages » fortement ionisés dans la couche E (on parle de sporadique E ou Es).

Couche F : altitude de 150 à 800 km, pression 10^{-4} Pascals, température $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$, densité électronique 10^6 . Constituée d'atomes d'oxygène, d'azote et d'hydrogène. Très dépendante de l'activité solaire, elle présente un niveau d'ionisation très important pendant les maxima du cycle solaire. Son altitude fluctue en fonction du rayonnement solaire ; la couche F se décompose pendant la journée en deux sous-couches F1 et F2. Ces deux sous-couches se recombinent la nuit plusieurs heures après le coucher du Soleil mais il arrive qu'elles persistent toute la nuit lors des maxima d'activité solaire. Comme pour la couche E, le rôle de la couche F est essentiel pour la propagation des ondes courtes.

1.3.2. Le Vent Solaire et la magnétosphère

1.3.2.1. La découverte du vent solaire

La théorie de Mairan (Traité de physique et histoire de l'aurore boréale, 1733) sur l'origine des aurores tomba rapidement dans l'oubli au cours de la seconde moitié du 18^{ème} siècle. Il a fallu attendre les travaux du physicien norvégien Birkeland, au cours des années 1896-1910, pour qu'enfin un début d'explication sur le mécanisme engendrant les aurores vît de nouveau le jour. Birkeland, à la suite de très nombreux

travaux de recherche sur les orages et les aurores polaires démontra que des particules chargées parvenaient au voisinage de la Terre. Ces particules étant capturées par le champ magnétique terrestre et guidées le long de ses lignes de force vers la haute atmosphère des régions polaires. La collision des ces particules chargées avec les atomes et les molécules des constituants atmosphériques provoquait une excitation et une ionisation des corpuscules heurtés, qui s'accompagnaient d'une émission de lumière à l'origine des aurores. Pour prouver le bien-fondé de sa théorie, il fit, avec l'assistance de son collègue Störmer, de nombreuses expériences en laboratoire.

Un nouveau progrès important venait d'être réalisé dans la compréhension des phénomènes auroraux. Toutefois, cette théorie souleva une objection de la part de Schuster. Pour ce physicien, les émissions de particules solaires ne pouvant se produire que sous forme de jet, il est difficile d'admettre qu'un faisceau de particules électrisées d'un seul signe puisse atteindre la Terre par suite du phénomène de répulsion électrostatique. En 1916, Vegard introduisit l'idée de faisceau neutre, c'est-à-dire composé de particules des deux signes : protons et électrons.

En dehors de ces périodes où les particules solaires étaient émises, on pensait généralement à cette époque, que le milieu interplanétaire était quasiment « vide », autrement dit « statique ». Mais en 1951, L'astrophysicien allemand Biermann, qui étudiait le comportement anormale des queues des comètes, fut le premier à avancer l'idée qu'un flux de particules devait s'échapper continuellement du soleil et se propager jusqu'à des distances de plusieurs unités astronomiques (1 UA = la distance Soleil-Terre, soit environ 150 millions de kilomètres), pour rendre compte de la position des ces queues toujours opposées à la direction du Soleil.

En 1957, le physicien américain Eugène Newman Parker donna à ce flux continu de particules solaires ses premières bases et introduisit le terme de vent solaire pour le nommer, terme imagé qui indique que « la matière solaire » est « soufflée » vers l'extérieur du Soleil. Il fut ainsi le premier à trouver une explication possible de l'origine du vent solaire.

Toutes ces hypothèses furent confirmées de façon éclatante, à partir de 1958, grâce aux satellites artificiels et aux sondes spatiales qui ont fourni le moyen de mesurer le champ géomagnétique et les caractéristiques du vent solaire dans les zones traversées par ces engins (Legrand, 1984 ; 1985).

Aujourd'hui, on sait que le vent solaire est constitué d'électrons, de protons et à un degré moindre d'héliions ou particules alpha qui forment, rappelons-le, un ensemble électriquement neutre (plasma). Sa densité au voisinage de la Terre est de 8,7 particules par mètre cube et sa vitesse moyenne est de 500 km/s. Ainsi, l'apport de « matière solaire » au niveau de l'orbite terrestre, suggéré par Mairan dans sa théorie et publiée par Legrand dans Legrand (1985), n'était mis en évidence pour la première fois que deux siècles plus tard.

1.3.2.2. Les différentes sources du vent solaire

La Terre reçoit principalement le vent solaire qui se propage dans le plan de l'écliptique. Ce vent est émis généralement par des sources situées près de l'équateur solaire mais parfois ces sources se trouvent nettement en dehors de ce plan.

Les caractéristiques du vent solaire, en particulier sa vitesse et sa densité, varient avec la phase du cycle de taches, c'est-à-dire, en fait, avec la nature des sources de ce vent (Legrand et Simon, 1985).

Les deux principales sources d'émission du vent solaire sont les suivantes :

1) Les trous coronaux, qui correspondent à des régions de champ magnétique unipolaire de faible intensité dont les lignes de forces s'ouvrent sur le milieu interplanétaire. Dans ces régions, l'énergie du champ magnétique est inférieure à l'énergie cinétique des particules chargées positivement et négativement du vent solaire, de sorte que ce dernier ne reste pas piégé dans la couronne comme c'est le cas au-dessus des régions actives se développant parfois au niveau des taches. Il en résulte que les trous coronaux constituent une source de vent solaire de grande vitesse qui est émis sous forme de jets magnétisés dans le milieu interplanétaire. Ces

trous évoluent très lentement et, au cours de chaque rotation solaire, leur jet balaye la Terre.

Il existe deux types de trous coronaux :

- Les trous coronaux polaires, qui prennent naissance près de chaque pôle du Soleil et qui s'étendent vers les moyennes ou basses latitudes. Les jets de vent solaire de faible densité qu'ils émettent sont de grande vitesse ($\sim 800\text{km/s}$) et ils apparaissent durant les deux ou trois années qui précèdent le minimum de taches. Ces jets sont rabattus vers le plan de l'écliptique par la suite de l'augmentation du gradient du champ poloïdal se développant dans ces trous (figure 1.8).
- Les trous coronaux équatoriaux, qui surviennent entre le maximum de taches et le début de l'apparition des jets d'origine polaire. Dans ces trous, le vent solaire est aussi émis sous forme de jets de grande vitesse dont la durée de vie n'excède pas un an (Legrand et Simon, 1981 ; Simon et Legrand, 1985a).

2) L'« heliosheet » ou couche neutre est une couche, située au voisinage de l'équateur solaire. Cette couche est créée par l'inversion des polarités des lignes du champ magnétique poloïdal qui émerge du soleil vers l'espace interplanétaire. Le vent émis par cette source est de faible vitesse ($\sim 300\text{km/s}$) et de forte densité (figure 1.9). Sa contribution est prépondérante aux environs du minimum de taches du fait que l'heliosheet coïncide presque avec l'équateur solaire à cette période du cycle et qu'elle peut atteindre parfois une grande épaisseur (Simon et Legrand, 1985b).

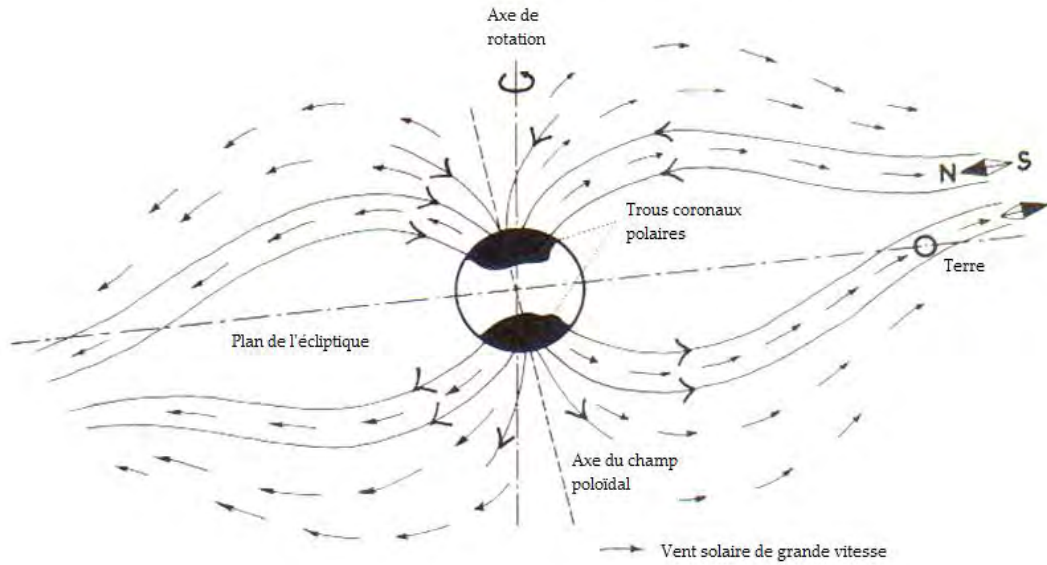


Figure 1.8: Schéma représentant les lignes de force du champ magnétique poloidal et la trajectoire du vent solaire de grande vitesse émanant des trous coronaux polaires, deux ou trois années avant le minimum des taches. Le fort gradient du champ magnétique des trous coronaux polaires tendant à rabattre les lignes de forces vers le plan équatorial du soleil et de l'axe de ce champ étant assez incliné, les jets de vent solaire de grande vitesse balayent régulièrement la Terre à chaque rotation du soleil, soit tous les 27 jours (Legrand, 1985)

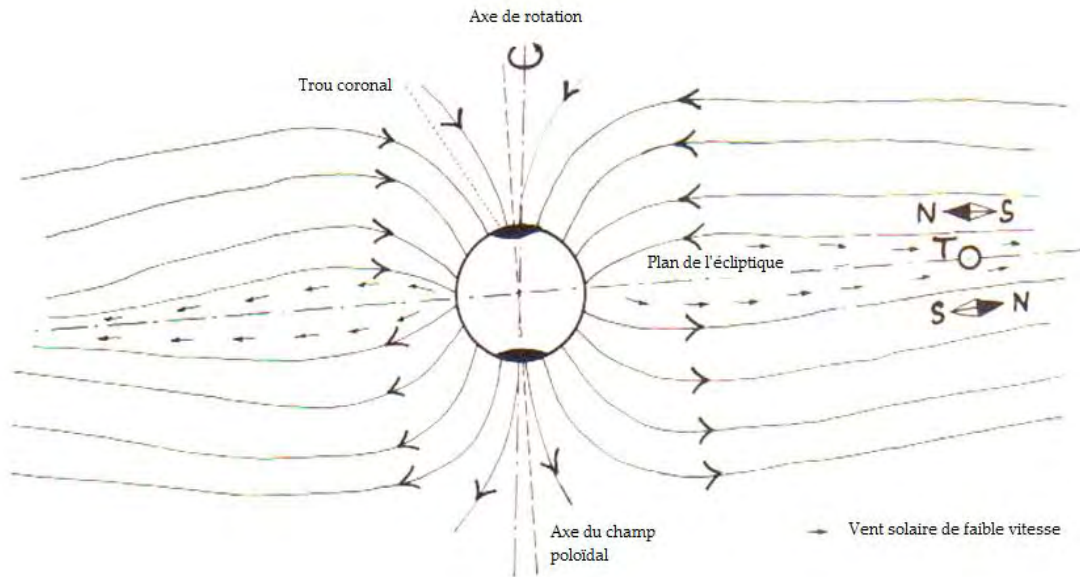


Figure 1.9 : Au minimum des taches, le gradient du champ magnétique poloidal émanant des trous coronaux polaires étant faible, le facteur de divergence des lignes de force diminue et les jets de vent solaire de grande vitesse n'atteignent plus la terre. La couche neutre créée par l'inversion des polarités des lignes de force du champ tend à coïncider avec l'équateur solaire. A cette époque du cycle des taches, la Terre reçoit du vent de faible vitesse et de forte densité émanant de cette région (Legrand, 1985).

1.3.2.3. L'interaction Vent solaire -Magnétosphère

Les conséquences le plus directes de l'existence du vent solaire dans lequel baigne tout le système solaire est de comprimer et de confiner, par suite de son écoulement, le champ magnétique des planètes à l'intérieur d'une cavité dite magnétosphère. La figure 1.10 représente l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre.

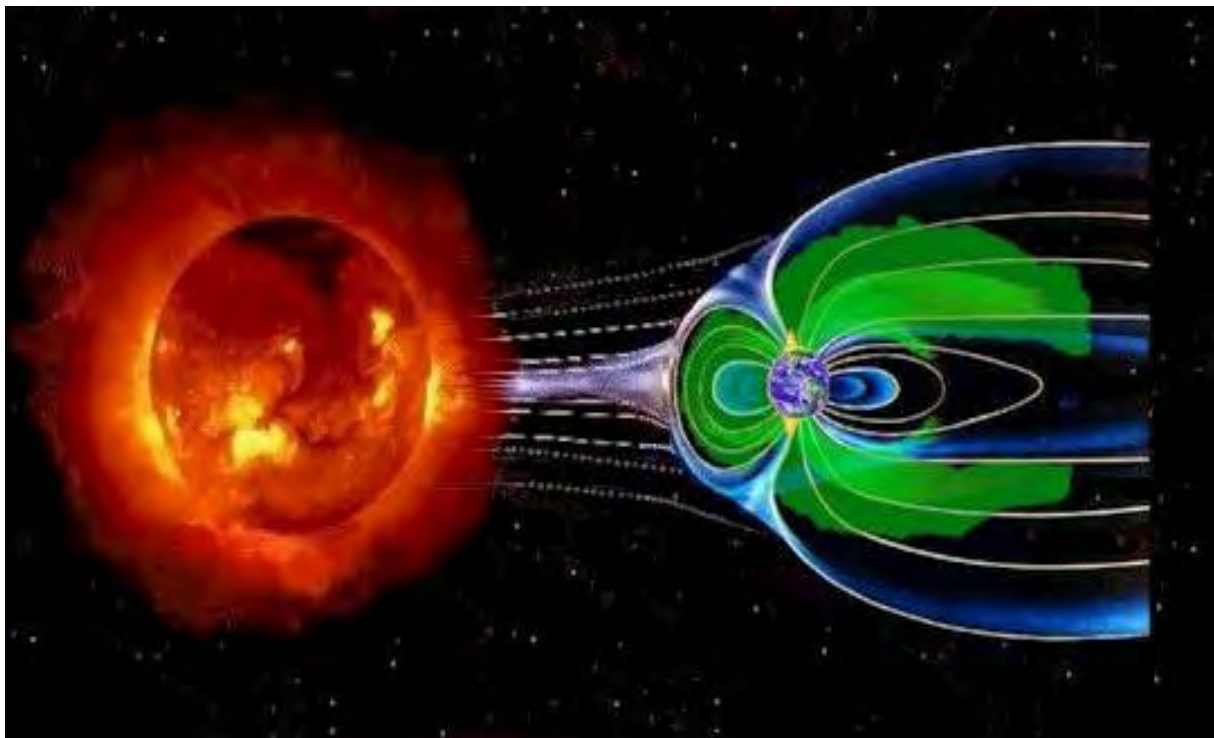


Figure 1. 10: Interaction vent solaire-magnétosphère (Soho)

Sur la frontière de cette cavité, il y a équilibre entre les forces magnétiques liées à la déformation du champ et la pression dynamique exercée par le vent. Dans le cas de la Terre, la frontière magnétosphérique dans la direction subsolaire a été observée pour la première fois par le satellite Explorer 10 en mars 1961 et se situe à une distance d'environ huit rayons terrestres (Meeus, 1962).

Dans la direction antisolaire, les lignes de force du champ magnétique terrestre tendent à s'étirer dans le sens de l'écoulement du vent solaire et donne ainsi naissance à ce que l'on appelle la queue de la magnétosphère. Elle s'étend très loin

dans la direction opposée à celle du soleil. Actuellement, on ignore ses limites exactes à cause du faible nombre des observations, mais sa longueur doit être supérieure à cinq cent fois de rayons terrestres, soit plus de trois millions de kilomètres ! Son diamètre est évalué à une trentaine de rayons terrestres.

A l'intérieur de la magnétosphère, il existe une région dans laquelle le champ magnétique est relativement intense et dont les lignes de forces se referment autour de la Terre. Cette région forme une ceinture autour du globe, dans laquelle des particules électriques et protons, de différentes énergies sont piégées.

Ces particules sont animées de plusieurs mouvements. La figure 1.11 présente ces trois mouvements : 1) l'oscillation qui se produit le long des lignes de force (spirale), 2) le mouvement de va et vient entre les « points miroirs » (petites flèches noires) et 3) le mouvement de dérive (flèche blanche).

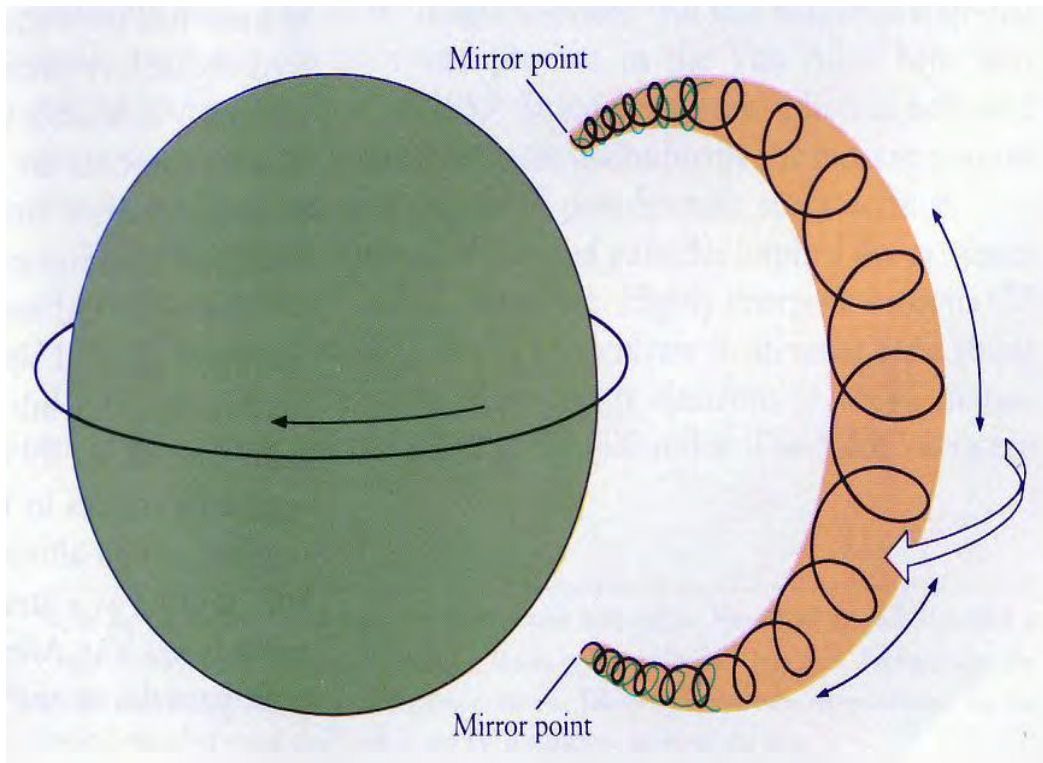


Figure 1.11 : Points miroir, gyrofréquence et dynamo (Source: Sun and Earth, Herbert Friedman)

Jusqu'à cinq rayons terrestres, les particules sont piégées en permanence, d'où la notion de « zone de piégeage stable ». Au-delà et jusqu'à huit à dix rayons terrestres, les trajectoires des particules sont très perturbées, car le champ magnétique terrestre

est soumis à de nombreuses fluctuations : c'est la « zone de piégeage instable ». Les particules de la zone de piégeage instable, proviennent du vent solaire qui pénètre par la queue de la magnétosphère et elles sont accélérées suivant des processus complexes qui ne sont pas tous connus actuellement.

Par suite des fluctuations, les points miroirs de cette zone, parfois, disparaissent et les particules sont précipitées dans la haute atmosphère, donnant ainsi naissance aux phénomènes auroraux (Figure 1.12). La Figure 1.12 présente, à gauche, la face éclairée de la terre et le cercle éclairé de la zone aurorale, région où précipitent les particules. Cette photo a été prise à bord du satellite Dynamics Explorer I. A droite de la figure 1.12 est représentée une aurore boréal droite une aurore boréale.

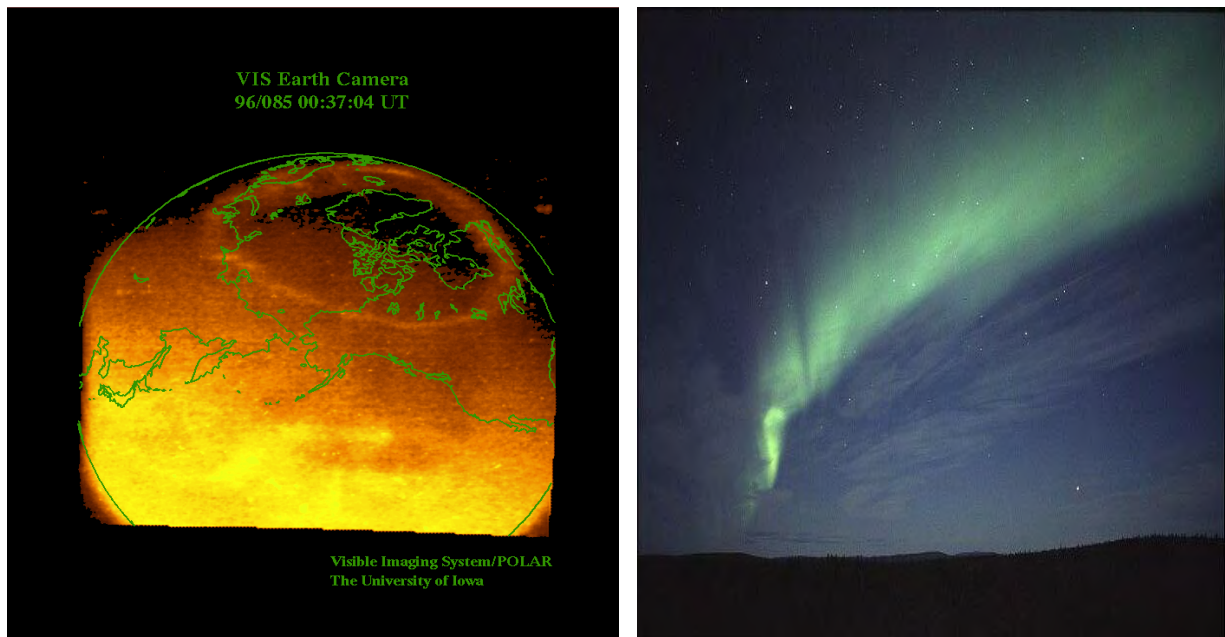


Figure 1.12 : Phénomènes auroraux (source : Dynamics Explorer I)

Les aurores se développent en général entre 100 et 200 km d'altitude. Elles s'étendent sur plusieurs milliers de kilomètres et leur épaisseur ne dépasse pas quelques centaines de mètres, du fait qu'elles sont engendrées par des faisceaux de particules inclinés suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre. La plupart des aurores apparaissent ou bleu-vert et présentent parfois de franges rouges (Legrand, 1984).

1.4. Dynamo terrestre : Géomagnétisme

1.4.1. Historique

Le magnétisme fut connu dès l'Antiquité par le phénomène d'attraction d'objets contenant du fer qu'exercent certaines roches. L'homme se rendit ensuite compte que la Terre elle-même se comportait comme un aimant géant et utilisa cette faculté pour s'orienter grâce à la boussole. En effet, l'aiguille aimantée de la boussole indique une direction proche du pôle Nord géographique : le pôle Nord magnétique. Quelle est l'origine du magnétisme de la Terre, également appelé géomagnétisme ? Quelles sont ses manifestations ? Comment peut-on mesurer la valeur du champ magnétique terrestre ?

1.4.2. Champ magnétique terrestre

1.4.2.1. *Origine : dynamo terrestre*

Le champ magnétique terrestre est créé et entretenu par un processus d'induction. En effet, des courants électriques intenses circulent dans le noyau extérieur ($1300 < r < 3500$ km) qui possède une conductibilité électrique très forte. Le modèle utilisé est dit auto-excité : un fluide de grande conductivité bouge dans un mouvement complexe et engendre des courants électriques qui produisent un champ magnétique (figure 1.13). Autrement dit, la dynamo terrestre est un phénomène physique expliquant la formation du champ magnétique, par l'induction produite par les mouvements des alliages de fer et de nickel en fusion dans la partie liquide du noyau de la Terre. Schématiquement, le champ magnétique terrestre ressemble à celui d'un énorme aimant. Il est explicable à plus de 90% par un dipôle au centre de la Terre.

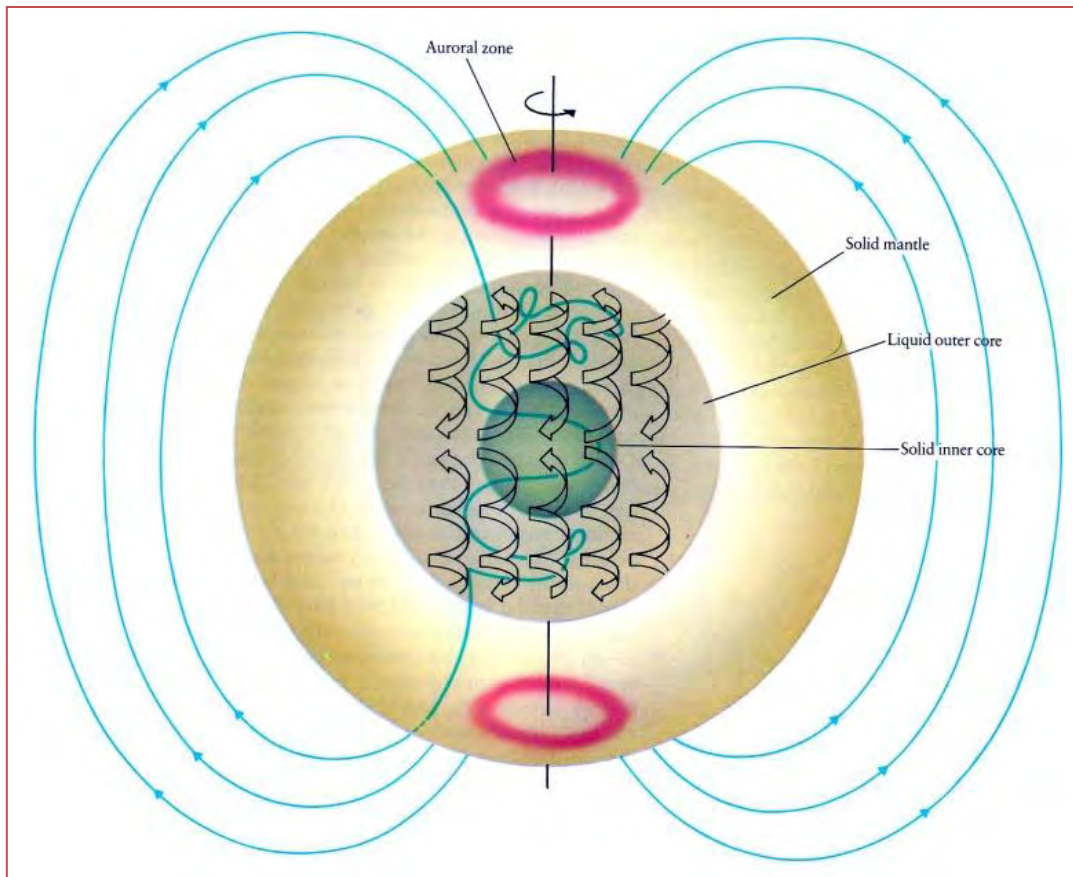


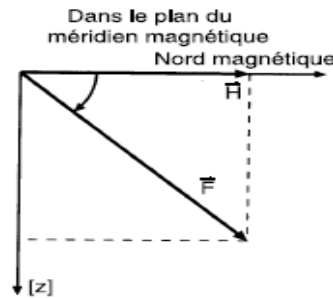
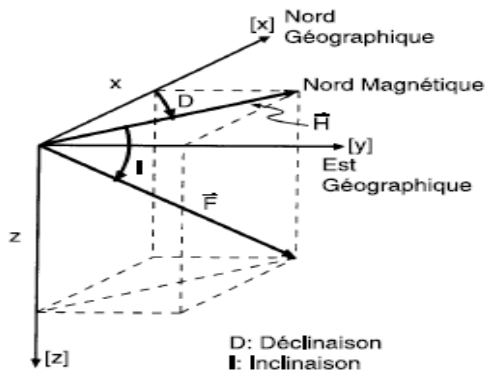
Figure 1.13 : Principe de la dynamo terrestre (Source: Sun and Earth, Herbert Friedman)

1.4.2.2. Caractéristiques du champ magnétique terrestre

La direction du champ varie avec la localisation. Verticale aux pôles et horizontale à l'équateur, le champ varie également dans le temps sous l'effet de phénomène d'origine externe (vent solaires).

Les variations en intensité et en direction sont de l'ordre de quelques dizaines de nano Tesla en période calme et quelques centaines (voire milliers) de nano Tesla en période agitée (tempêtes magnétiques). D'où la nécessité d'appliquer une correction diurne.

Le champ magnétique terrestre peut être défini par 3 composantes en tout point donné : l'Intensité (F), l'Inclinaison (I) et la Déclinaison (D).



$$F = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\tan I = \frac{z}{H}$$

$$x = H \cos D$$

$$y = H \sin D$$

$$z = F \cos I$$

1.4.2.3 . Schématisation du champ magnétique terrestre

En première approximation, le champ magnétique terrestre est généré par un dipôle situé au centre de la Terre .Ce dipôle "fictif" est placé suivant une droite faisant un axe de $11,5^\circ$ avec l'axe de rotation. Une telle structure schématique du champ magnétique terrestre est appelé champ de Gauss.

Le champ réel est irrégulier et les pôles magnétiques vrais ne coïncident pas avec les pôles géomagnétiques et ne sont pas diamétralement opposés.

	Latitude	Longitude
Pôles géomagnétiques		
Nord	$78,5^\circ$ N	111° Ouest
Sud	$78,5^\circ$ S	111° Est
Pôles magnétiques vrai		
Nord	75° N	101° Ouest

La ligne où l'inclinaison $I = 0$ n'est jamais à plus de 15° de l'équateur.

Le champ magnétique terrestre à des sources internes et externes ; ce magnétisme peut être rémanent ou engendré par un flux de courant. Des analyses mathématiques ont montré qu'au moins 99% du champ (champ magnétique principal) observé en surface est causé par des sources internes. La majeure partie du 1% du champ magnétique provenant de l'extérieur de la Terre apparaît être associée aux courants électriques circulant dans les couches ionisées de la haute atmosphère et dans la magnétosphère.

Les variations, tant temporelles que spatiales, de ce champ d'origine externe sont beaucoup plus rapides que celles du champ dit "permanent".

1.4.2.4. Variation diurne régulière du champ magnétique terrestre

La variation diurne régulière du champ magnétique terrestre est engendrée par les courants électriques qui circulent dans la couche ionisée E. Cette couche a une variation diurne

Le phénomène d'ionisation de la région E est dû essentiellement au rayonnement électromagnétique du soleil principalement les UV et EUV et de rayons X.

- L'ionisation augmente le jour et diminue la nuit ; la variation diurne suit le rythme solaire
- L'amplitude de la variation est influencée par le cycle d'activité solaire (taches solaires) qui passe par un maximum tous les 11 ans.

L'ionosphère se déplace par rapport au globe solide.

- Circulation atmosphérique qui rétablit l'équilibre entre hémisphères "nuit" et "jour"
- "Marée" atmosphérique

1.4.2.5. Variations perturbées du champ magnétique terrestre : les Orages

Ce sont des perturbations magnétiques dont les amplitudes peuvent atteindre 2000 nT. Elles se retrouvent à toutes les latitudes, mais sont plus importantes dans les régions polaires et aurorales, où elles sont à l'origine des aurores boréales (hémisphère nord) ou australes (hémisphère sud). Elles sont dues à l'émission de particules électriques par le Soleil qui constituent le vent solaire.

Ces tempêtes peuvent durer plusieurs jours, entraînant des perturbations magnétiques qui troublent les communications radios à grande échelle. La figure 1.14 résume les principaux mécanismes des relations Soleil-Terre.

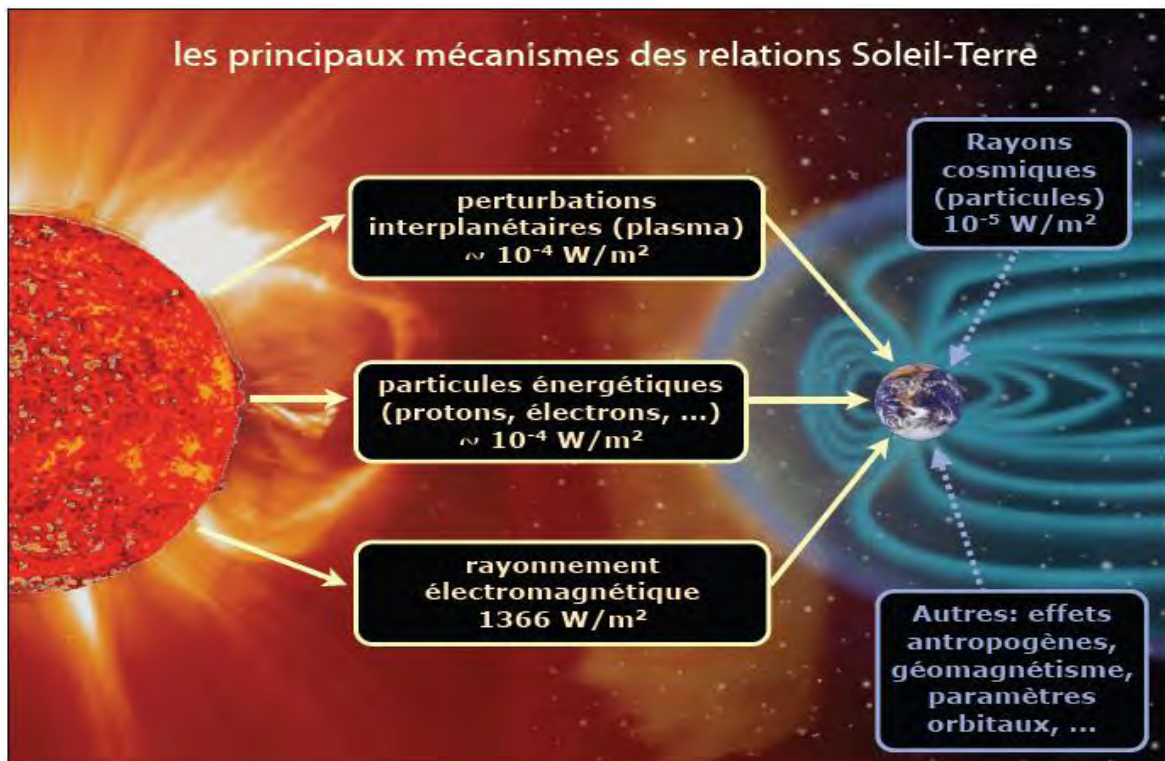


Figure 1.14: Principaux mécanismes des relations Soleil-Terre (Soho)

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté 1) le soleil et les différents processus physiques solaires qui impactent l'environnement terrestre, 2) l'environnement proche de la terre (atmosphère et ionosphère) et 3) quelques relations soleil environnement terrestre proche. Les différentes connaissances développées dans ce chapitre sur les mécanismes de fonctionnement de l'astre solaire et le magnétisme terrestre constitueront le fondement des analyses et interprétations des différentes activités solaires qui raffinent les relations Terre-Soleil. Pour notre thèse, nous nous intéressons essentiellement aux phénomènes induits par le vent solaire (V_s), le champ magnétique interplanétaire (B_i) qui forme la dynamo vent solaire-magnétosphère (V_s, B_i).

Dans le chapitre suivant nous présenterons les différents plasmas du système terre soleil en insistant sur le plasma ionosphérique.

CHAPITRE 2 : LES PLASMAS DANS LE SYSTÈME SOLEIL-TERRE ET LA PHYSIQUE DE L'IONOSPHERE ÉQUATORIALE

Introduction

Le plasma est un gaz ionisé constitué majoritairement de particules chargées (ions et électrons) qui subissent des interactions mutuelles. Ce gaz ionisé correspond au quatrième état physique de la matière. Il se distingue des trois autres états de la matière (Solide, liquide, gaz) par sa formation qui résulte de processus progressifs (température variable pour une pression et une chaleur latente donnés). Ainsi un plasma peut être formé même à basse température (cas de l'ionosphère).

Le plasma est le plus commun dans l'Univers et constitue l'essentiel de sa masse : il se rencontre dans les étoiles, dans le milieu interstellaire et aussi dans la Terre (ionosphère).

Le plasma se rencontre également dans les tubes fluorescents, les propulseurs spatiaux et sont couramment utilisés dans l'industrie (micro-électronique). Nous donnerons, dans ce chapitre, un aperçu général des types de plasmas existant en nous intéressant beaucoup plus au plasma ionosphérique qui entre dans le cadre de notre travail.

2.1. Plasma solaire, interplanétaire et magnétosphérique

Pour rappel, le terme plasma fut introduit en physique en 1928 par le physicien américain Irving Langmuir en faisant une analogie entre un gaz ionisé (« soupe d'électrons et d'ions ») et le plasma sanguin. Actuellement, la définition physique du mot plasma est : « ensemble de particules suffisamment excitées pour ne pas pouvoir

se combiner de manière stable et former les particules qui sont observées dans l'état fondamental ».

Près de 99% de la matière connue de l'Univers est constitué de plasmas qui sont de plusieurs types (Figure 2.1) :

les plasmas naturels : les étoiles, aurores boréales, les éclairs, l'ionosphère, le vent solaire...

les plasmas industriels : (1) dans les téléviseurs ; (2) les décharges (comme dans un disjoncteur à haute-tension), ou tube à décharges (lampes, écrans, torche de découpe, production de rayon X) ; (3) les plasmas de traitement pour dépôt, gravure, modification de surface ou dopage par implantation ionique ; (4) la propulsion par plasmas ; (5) la fusion nucléaire et de nombreuses autres applications qui ne sont encore que des expériences de laboratoire ou des prototypes (radar, amélioration de combustion, traitement des déchets, stérilisation, etc.).

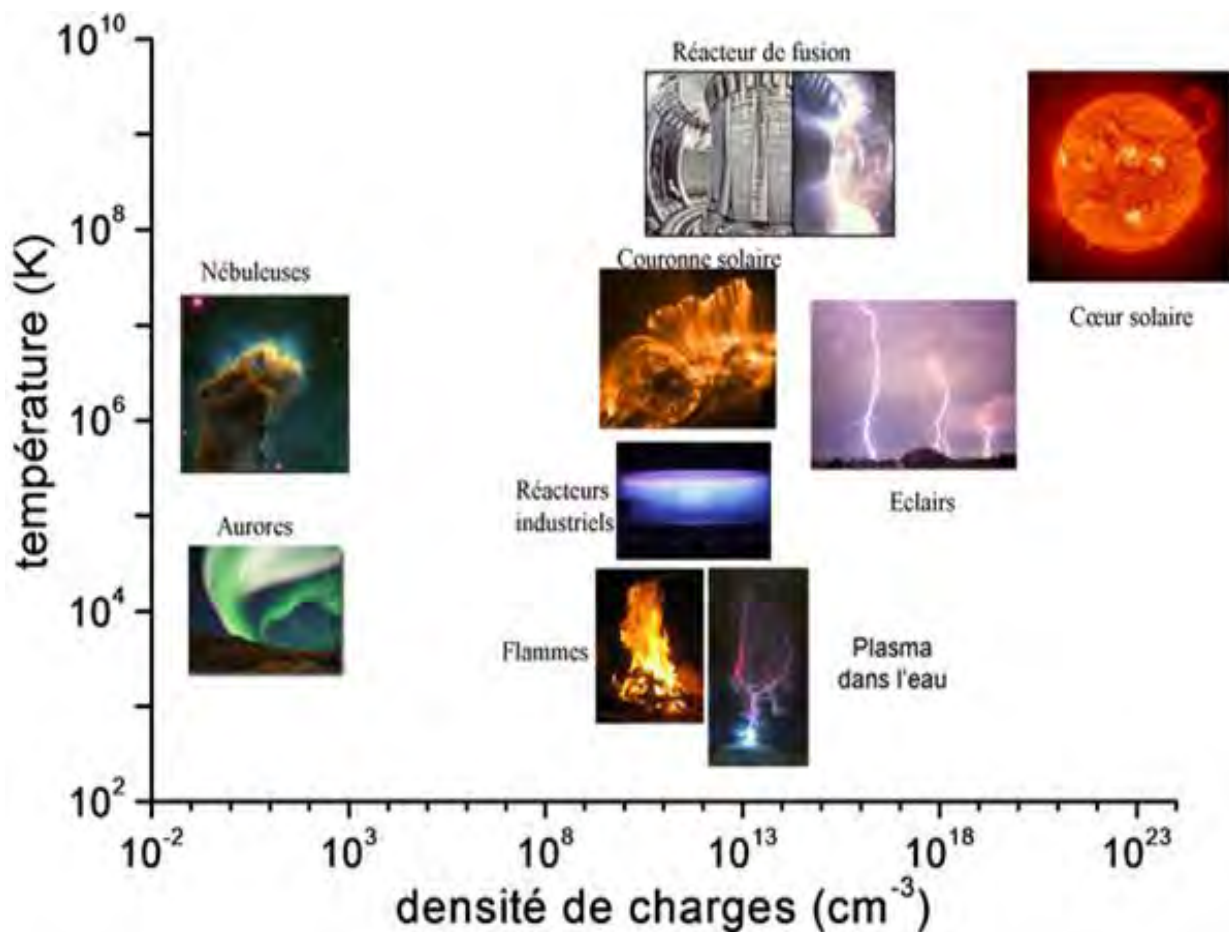


Figure 2. 1 : Aperçu des différents plasmas existant (Soho)

Il convient cependant de signaler que les plasmas sont longtemps passés inaperçus dans notre environnement, en ce que leurs conditions d'existence et de formation sont éloignées des conditions nécessaires à la vie terrestre. Pour notre part, nous intéressons plus au plasma naturel.

2.1.1 Température des espèces : « plasma chaud », « plasma froid »

Dans un plasma, il est habituel de constater en plus des espèces ionisées, l'existence d'électrons libres. En raison de leur rapport de masse, les électrons ont moins d'inertie et sont par conséquent plus « réactifs ». Cet état de fait conduit à une distinction des plasmas : "le plasma froid" (non thermique) et "le plasma chaud" (thermique).

le « plasma froid » ou « plasma non thermique » ou encore « plasma bi température » ou encore « plasma hors équilibre ».

Ce type de plasma se forme sous des pressions réduites (environ 10^4 Pa). Sous ces conditions, les transmissions d'énergie importantes entre les particules se fait essentiellement par collision d'électrons. Du point de vu macroscopique, le système est à température ambiante avec des réactions chimiques dans l'enceinte du système. Comme les ions acquièrent plus difficilement de l'énergie en raison de leur masse, leur température (T_i) reste très inférieure à celle des électrons (T_e). Alors, les ions sont considérés comme « froids », non réactifs. D'où la caractéristique de ce plasma.

le « plasma chaud » ou « plasma thermique ».

Dans les plasmas thermiques, le nombre des collisions entre les particules est très élevé à cause de la pression élevée du gaz. Ceci à pour effet de favoriser et d'entretenir une importante transmission de l'énergie. Il en résulte alors un plasma en équilibre thermodynamique : toutes les particules ont pratiquement la même

quantité d'énergie (les ions sont « chauds », réactifs : $T_i \sim T_e$). D'où l'appellation plasma "chaud".

2.1.2. Les principaux plasmas spatiaux

Nous présentons trois principaux plasmas :

-Le plasma ionosphérique : plasma collisionnel, froid, réactif, non-relativiste, principalement ionisé par l'action des rayons ultra-violettes provenant du Soleil. Suivant les altitudes, il est mélangé à du gaz neutre, avec lequel il est mécaniquement couplé.

-Le plasma magnétosphérique : plasma non collisionnel, composé d'électrons, de protons, de traces de He^+ , He^{++} , et d'une proportion très variable d'ions oxygène (O^+). C'est un plasma non réactif, non thermique, peu ou pas relativiste. C'est un plasma hors équilibre thermodynamique local.

-Le plasma du vent solaire : plasma non collisionnel, composé d'électrons, de protons, et de traces He^{++} . C'est un plasma non réactif, non thermique, peu ou pas relativiste. C'est un plasma hors équilibre thermodynamique local. Le vent solaire est un formidable laboratoire de physique des plasmas. Les conditions physiques qui y règnent (température, vitesse, composition, pression) sont en effet impossibles à reproduire en laboratoire sur Terre. Les mesures dans le vent solaire permettent ainsi de mieux étudier des sujets comme : la propagation d'ondes, les interactions ondes-particules, les ondes de choc, les phénomènes de turbulence, la reconnexion magnétique, le transfert d'énergie. Ces sujets intéressent tous les domaines de l'astrophysique (onde de choc des supernovae, turbulence dans les nuages magnétiques interstellaires, vent stellaire, etc.). Les mesures directes dans le vent solaire permettent des progrès rapides en contraignant les modèles théoriques.

Cependant, les astrophysiciens ne sont pas les seuls à être intéressés par ces études. Les recherches sur la fusion contrôlée, par exemple, confrontent les physiciens à des

questions sur le transfert d'énergie, la turbulence ou les interactions ondes-particules équivalentes à celle des astrophysiciens. C'est donc une approche complémentaire : l'un contrôle les paramètres de son expérience (les physiciens) tandis que les autres apportent des éléments de réponse sur des échelles de temps et d'espace inaccessibles sur Terre (les astrophysiciens).

2.2. Le plasma ionosphérique

L'ionosphère, région ionisée de l'atmosphère terrestre a été découverte par Marconi en 1901 au cours d'une liaison radio transatlantique.

Les sondages radioélectriques verticaux, effectués depuis 1922 (Breit et Tuve, 1925) ont permis de caractériser les différentes couches dans l'ionosphère (cf. Chapitre 1) :

La couche D : de 60 à 90 km,

La couche E : de 90 à 150 km et

La couche F : de 250 à 400 km.

Comme, la plus part des strates de l'atmosphère, l'ionosphère peut être définie comme étant un milieu ionisé. La principale source du plasma ionosphérique est le rayonnement solaire. Cependant, il convient de signaler que les particules énergétiques d'origine solaire et le rayonnement cosmique sont également deux sources d'ionisation même si elles sont moins importantes.

Ce plasma ionosphérique est composé d'un ensemble de particules neutres et particules chargées dont la densité varie avec l'altitude. La figure 2.2 présente les variations, en fonction de l'altitude des apports de concentrations de principaux constituants de l'atmosphère.

Il est facile de constater que les densités électroniques(n_e) sont très inférieures aux densités de l'atmosphère notamment dans la région E. il est bien connu que la photochimie de l'atmosphère est régie par les processus de création et de destruction.

Chapman (1931) a basé ses travaux sur la production et la perte électronique pour expliquer la formation et l'évolution des couches E et F1 de l'ionosphère. Cette théorie ne pourrait s'appliquer à la couche F2, qui en plus de ces deux mécanismes, est le siège de mouvement de dérive et de diffusion de l'ionisation.

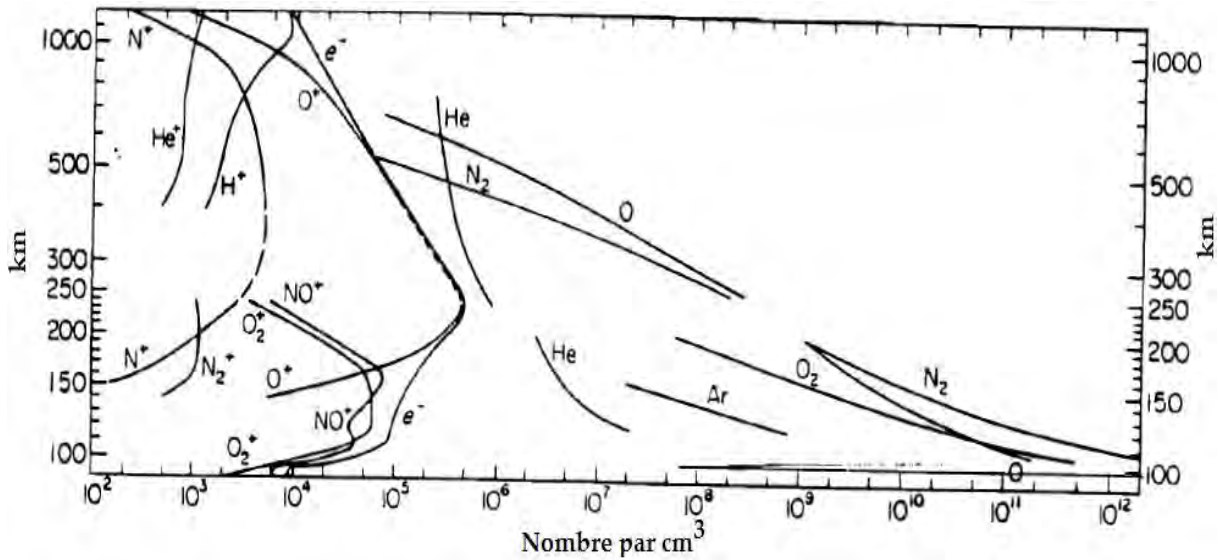


Figure 2.2 : Profil en fonction de l'altitude des constituants ionisés et neutres (Rishbeth et Garriott, 1969)

2.2.1. Les équations de continuité

La théorie de la formation de l'ionosphère est principalement fondée sur l'équation de continuité. Celle-ci décrit le mécanisme de la variation d'un composant ionisé en fonction de trois processus principaux : la production, les pertes et le transport des ions et des électrons. Si nous désignons par \vec{V} la vitesse de transport et N la concentration des particules chargées, l'équation de continuité peut s'exprimer en fonction du taux de production ou de perte et on obtient :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - l(N) - \text{div}(N\vec{V}) \quad (2.1)$$

Où q est la production, $l(N)$ la perte. L'importance des termes de cette équation est fonction de l'altitude et est caractéristique de chaque région de l'ionosphère.

2.2.2. Mouvement du plasma

L'ionosphère étant constituée d'électrons, d'ions, de neutrons. Ainsi pour une particule de type q de masse m , de vitesse V_q , soumise à la force de Lorentz, l'équation de son mouvement dans le référentiel terrestre s'écrit :

$$m \frac{d\vec{V}_q}{dt} = -\frac{1}{N_q} \vec{\nabla} P_q + m_q g + q(\vec{E} + \vec{V}_q \times \vec{B}) - m_q \vartheta_{qn} (\vec{V}_q - \vec{V}_n) - m_q \vartheta_{qp} (\vec{V}_q - \vec{V}_p) \quad (2.2)$$

Où ϑ représente la fréquence de collision.

A cette équation de continuité s'ajoutent d'autres équations non moins importantes dans les études ionosphériques.

En rappel l'équation basique de la densité de courant électrique dans un plasma est donnée par $\vec{j} = \sum_q N_q e_q \vec{V}_q$. Cette équation se réduit à :

$$\vec{j} = N_e \cdot e (\vec{V}_i - \vec{V}_e) \quad (2.3)$$

Où j s'exprime en A/m^2 , e : charge de l'électron s'exprime en coulomb (C), \vec{V}_i et \vec{V}_e les vitesses (en m/s) des ions et des électrons, respectivement et N_e la densité d'électrons (p/m^3)

La loi d'Ohm ionosphérique s'exprime de la façon suivante :

$$\vec{j} = \bar{\sigma} (\vec{E} + \vec{V}_n \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

Dans les conditions suivantes :

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad (2.5)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (2.6)$$

Dans l'équation 2.4, $\vec{\sigma}$ est le tenseur de conductivité électrique (ohm /m), \vec{V}_n la vitesse du vent neutre (m/s), \vec{B} le champ magnétique terrestre (en Tesla), \vec{E} le champ électrostatique dû aux charge de l'espace (V/m).

Pour des phénomènes de grande échelle (Espace et temps) on admet un état quasi stationnaire :

$$\frac{dV_i}{dt} \sim 0 \quad (2.7)$$

- Pour un mouvement perpendiculaire au champ magnétique terrestre, l'équation de mouvement des ions se réduit à l'expression simplifiée suivante :

$$e(\vec{E}_\perp + \vec{V}_1 \times \vec{B}) - m_i \vartheta_{in}(\vec{V}_1 - \vec{V}_n) = \vec{0} \quad (2.8)$$

La gravité, les collisions entre les particules chargées et les gradients de pression sont négligeables.

Pour les électrons, l'équation de mouvement est semblable à la précédente sauf que dans ce cas les collisions entre ions et électrons ne sont pas négligées.

$$\frac{e}{m_i} (\vec{E}_\perp + \vec{V}_1 \times \vec{B}) - \vartheta_{in}(\vec{V}_1 - \vec{V}_n) = \vec{0} \quad (2.9)$$

La direction du mouvement dépend de la fréquence de collision ϑ et de la fréquence gyromagnétique Ω ($\Omega_i = \frac{eB}{m_i}$).

Comme ϑ décroît de façon exponentielle avec l'altitude, le rapport $\frac{\vartheta}{\Omega}$ décroît rapidement avec l'altitude (Ω étant presque constante). Le comportement des ions et des électrons ne sera donc pas le même partout.

Pour $\vartheta \gg \Omega$ (au-dessus de 85 km pour les ions et 60 km pour les électrons), le vent entraîne les ions et les électrons dans son mouvement. Le champ magnétique n'a aucun effet sur les particules. Un champ électrique déplace les ions parallèlement et les électrons anti-parallèlement au champ. Ces mouvements sont limités par les forces de collisions. Nous aurons donc une faible conductivité.

Pour $\vartheta = \Omega$ (125 km environ pour les ions, 75 km pour les électrons), un vent ou un champ électrique déplace les ions et les électrons dans des directions obliques par rapport à la force appliquée.

Pour $\vartheta \ll \Omega$ (au-dessous de 150 km pour les ions et 90 km pour les électrons), les particules se déplacent perpendiculairement à la force appliquée. Un champ électrique se déplace à la vitesse $\frac{E}{B}$ dans la même direction : c'est la vitesse de dérive électromagnétique ou dérive de Hall $\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$. Dans ce cas, il n'y aura pas de courant.

Pour un mouvement parallèle au champ magnétique terrestre \vec{B} : si la vitesse \vec{V}_{\parallel} des particules neutres est la composante le long de \vec{B} les ions et les électrons se déplacent avec cette vitesse. Si le champ électrique possède une composante E_{\parallel} le long de \vec{B} ; les électrons et les ions se déplacent en sens opposé, créant ainsi une grande conductivité.

2.2.3. Influence de la pression et de la gravité : la diffusion ambipolaire dans la région F

Le gradient de pression et le champ de gravité créent des vitesses de dérive. Il apparaît alors un champ de polarisation, donc une force électrostatique, qui tend à écarter le plasma de la neutralité. Ce champ de polarisation retient les électrons et ne leur permet pas de s'écarter des ions, tout en les entraînant très faiblement : diffusion ambipolaire. La vitesse \vec{V}_{\perp} étant inférieure à la vitesse \vec{V}_{\parallel} dans la région F, cela nous amène à considérer seulement la projection de l'équation du mouvement des particules dans la direction du champ magnétique, faisant un angle I avec l'horizontal (inclinaison magnétique).

On a :

$$m_e \vartheta_e V_{\parallel} = -eE_{\parallel} + m_e g \sin I - n^{-1} \nabla_{\parallel} P_e \rightarrow \text{Pour les électrons} \quad (2.10)$$

$$m_e \vartheta_i V_{\parallel} = eE_{\parallel} + m_i g \sin I - n^{-1} \nabla_{\parallel} P_i \rightarrow \text{Pour les ions} \quad (2.11)$$

Dans la région où $n_i = n_e = n$ et $V_{i\parallel} = V_{e\parallel} = V$ il y'a une impossibilité d'accumulation des charges dans la magnétosphère.

$$P_e = nkT_e \quad T_e : \text{Température des électrons en kelvin}$$

$$P_{ei} = nkT_i \quad T_i : \text{Température des ions en kelvin}$$

k : constante de Boltzmann

En faisant la somme des équations 2.10 et 2.11 et en tenant compte des expressions de P_e et P_{ei} , nous obtenons :

$$V_{\parallel}(m_e \vartheta_e + m_i \vartheta_i) = g \sin I (m_e + m_i) - n^{-1} \parallel [n(T_e + T_i)] \quad (2.12)$$

$$m_i \gg m_e \quad m_i \vartheta_i \gg m_e \vartheta_e$$

Pour $T_e = T_i = T$

$$V_{\parallel} m_i \vartheta_i = g \sin I m_i - 2n^{-1} k \parallel (nT) \quad (2.13)$$

$$V_{\parallel} = \frac{g}{\vartheta_i} \sin I - 2n^{-1} \frac{k}{m_i \vartheta_i} \parallel (nT) \quad (2.14)$$

Si l'ionosphère est stratifiée horizontalement nous aurons donc :

$$\parallel (nk) = \sin I \frac{d}{dz} (nT) \quad z \text{ étant la côte}$$

$$V_{\parallel} = \frac{g}{\vartheta_i} \sin I - 2n^{-1} \frac{k}{m_i \vartheta_i} \sin I \frac{d}{dz} (nT) \quad (2.15)$$

$$V_{\parallel} = \frac{\sin I}{\vartheta_i} \left[g - \frac{2kn^{-1}}{m_i} \frac{d}{dz} (nT) \right] \quad (2.16)$$

Si ϑ_i tend vers zéro (en haute altitude), pour que V_{\parallel} reste fini, il faut que le terme $\left[g - \frac{2kn^{-1}}{m_i} \frac{d}{dz} (nT) \right]$ soit nul caractérisant ainsi une ionisation suivant l'altitude.

2.3 Caractéristiques de l'ionosphère équatoriale

D'une importance capitale dans le domaine des télécommunications, l'ionosphère équatoriale est l'une des régions de l'atmosphère la plus nettement structurée,

surtout en couche F. Elle se caractérise par des valeurs très élevées de la densité électronique avec des amplitudes prononcées et d'importants effets de scintillation.

La région est sous influence permanente des effets conjugués d'un niveau élevé de radiation solaire, du champ électrique de la couche E et du champ magnétique terrestre. Ce qui a pour conséquence la naissance d'un mouvement ascendant le long des lignes horizontales de force du champ magnétique et d'une vitesse de dérive vers le haut. Cette diffusion et cette dérive entraînent « l'effet de fontaine équatoriale ». Les électrons redescendent dans ces conditions à des latitudes comprises entre ± 10 et ± 20 degrés renforçant ainsi la densité électronique de ces latitudes et diminuant celle de l'équateur. Ce principe explique la formation de l'anomalie équatoriale.

2.3.1. La fontaine équatoriale

2.3.1.1 Principe

Le profil des densités électroniques de l'ionosphère présente, à l'équateur magnétique, une allure différente des profils observés aux moyennes latitudes. A l'équateur, le champ magnétique est horizontal et dirigé vers le Nord magnétique. Au cours de la journée, il est créé un champ électrique dirigé vers l'est dans la couche E équatoriale. Un effet croisé de ce champ électrique avec le champ magnétique terrestre horizontal engendre une dérive verticale ascendante (Bramley et Peart, 1964) appelée dérive Hall. Aux altitudes supérieures notamment en région F, la vitesse de dérive $\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$ soulève le plasma ionosphérique jusqu'aux altitudes de plus 700 km où le plasma rencontre des lignes de champ qui connectent les deux hémisphères. Le plasma sera ensuite diffusé le long des lignes de force sous l'action de la gravité (**figure 2.3**). L'effet conjugué de cette dérive et de la diffusion ambipolaire ($\vec{V} = \vec{g} - \frac{1}{B} \nabla P$) le long des lignes de force est à l'origine du phénomène

de «fontaine équatoriale» qui produit les renforcements de l'ionisation aux tropiques.

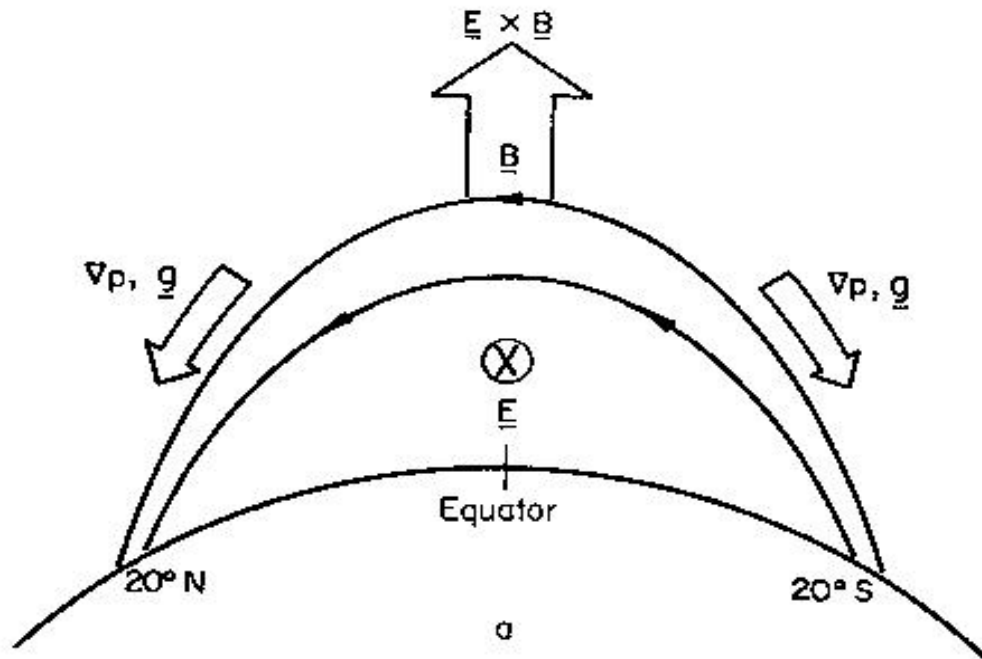


Figure 2.3 : Formation de la fontaine

2.3.1.2 Rappels de quelques résultats

L'épaisseur de la couche F2 de l'ionosphère équatoriale présente, aux basses latitudes, une variation très spectaculaire et impressionnante : souvent la densité électronique à minuit est nettement plus élevée que celle de midi. Cela trouve son origine dans un processus photochimique prenant en compte la variation journalière de la température de l'atmosphère (Northon et Van Zandt, 1964). Seule, la diffusion verticale est négligeable car l'ionisation ne peut passer à travers les lignes de force du champ. Ce qui a pour effet d'affecter la distribution latitudinale de l'ionisation. De nombreux auteurs tels que Hirono et Maeda (1955) montrèrent que la dérive électromagnétique peut aussi influencer la variation diurne de la densité électronique.

Les variations en altitude des valeurs à midi de la densité électronique 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 ou pics qui sont symétriques et situés de part et d'autre en latitude de l'équateur (**figure 2.4.a**). 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 travaux de Balan et Bailey (1995) montrent 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 2.4.b**). En dehors des périodes proches des équinoxes, le creux équatorial présente une asymétrie par rapport à l'équateur dont les valeurs sont plus élevées que celles dues à la variation de l'angle solaire zénital. Hanson et Moffett (1966) ont établi qu'un vent horizontal soufflant à travers le creux avec une valeur d'environ 50 m/s peut produire cette asymétrie.

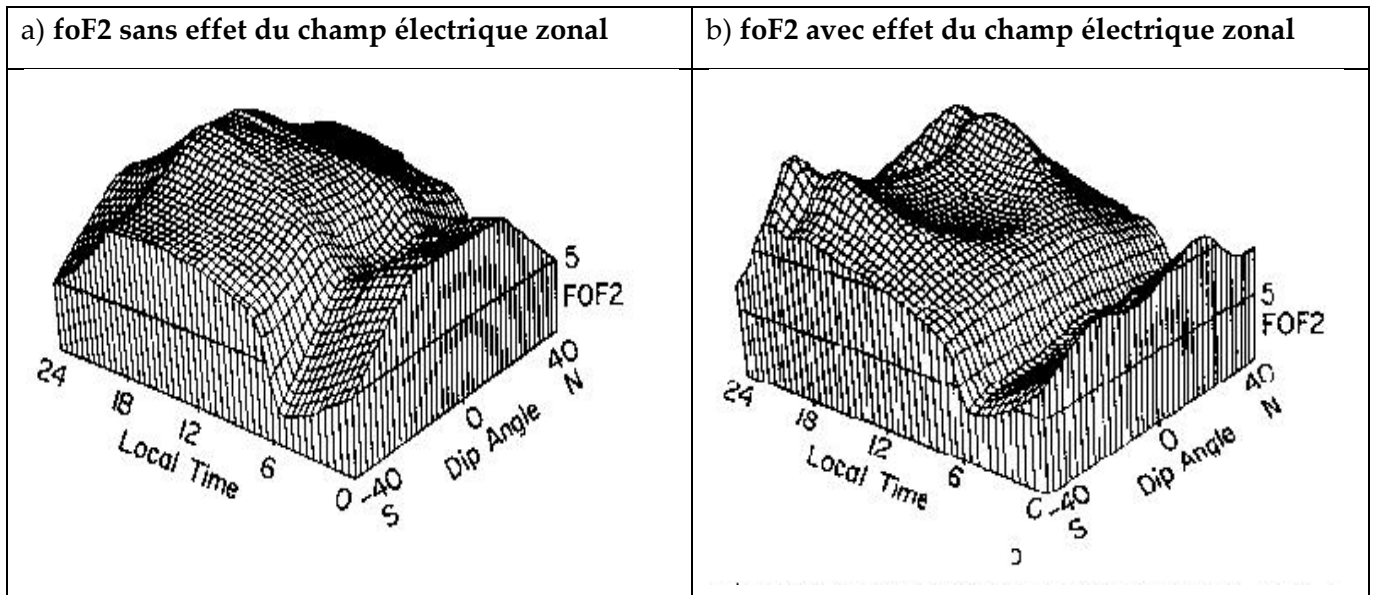


Figure 2. 4 : Contour de foF2 (Rishbeth et Garriot, 1969)

De nombreux travaux furent faits pour expliquer l'anomalie équatoriale. Mitra (1946) soutient par exemple qu'elle résulte d'une ionisation qui s'éloigne de l'équateur et cause une accumulation d'électron au Nord et au Sud. Quant à Martyn (1947) et Ducan (1960), ils proposèrent chacun une théorie alternative d'explication de l'anomalie équatoriale. Leurs théories à tous les deux, reposent 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. Dérive électromagnétique ($\perp B$) et de la diffusion ($\parallel B$) entraînent le mouvement de plasma agissant comme une fontaine d'où l'anomalie d'Appleton.

Dans la théorie de Mitra (1960), 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 résultats proposés par Martyn (1947) montrent un taux de production de l'ionisation très élevé et 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 basé l'existence d'un tel champ sur un effet dynamo dans la basse ionosphère avec une vitesse de dérive journalière voisine 10 m/s. Des observations faites par Bramley et Peart (1965) et Hanson et Moffett (1966), révèlent que la prise en compte de la diffusion et de la dérive dans l'équilibre de l'équation de continuité d'une telle dérive du plasma est suffisante pour un creux équatorial.

Selon Balan et Bailey (1995), la convergence de plasma crée une couche additionnelle G située à 10° de latitude de part et d'autre de l'équateur magnétique durant les heures avant midi et ceci pour de très grandes vitesses de dérives. Les mêmes auteurs notent qu'à l'équateur magnétique la concentration de plasma due à la couche G est plus grande que celle de la couche F pour une courte période juste avant midi lorsque la dérive entame sa phase de décroissance.

Le soir, peu de temps après le coucher du 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 mécanisme, le plus courant expliquant l'anomalie repose sur un transport ascendant de l'ionisation par la force $\vec{E} \times \vec{B}$ au-delà de l'équateur magnétique. Dans ce cas le champ électrique E , est de direction Est et la diffusion est descendante le long des lignes de force du champ magnétique depuis les hautes latitudes (Sterling et al., 1969).

L'asymétrie de la position des crêtes (Rajaram, 1977) serait causée par la composante méridionale du vent neutre (Rishbeth, 1972). Il convient néanmoins de souligner que la variation de la composition locale atmosphérique peut affecter la production ou la perte locale d'ionisation.

2.3.2. L'électrojet équatorial

La circulation des courants électriques ionosphériques dans la région E (90-160 km) résulte de la conjugaison de deux effets dynamo dans l'environnement terrestre :

- un effet du champ magnétique, résultant du mouvement de l'atmosphère neutre à travers les lignes de force du champ magnétique terrestre dans la région dynamo ionosphérique,
- un effet d'entraînement dû à l'écoulement du vent solaire aux confins de la magnétosphère, où règne le champ magnétique interplanétaire.

La vitesse d'équilibre résultant de ces deux effets est le plus souvent différente pour les électrons et les ions. Cette différence de vitesse donne naissance à un courant électrique dans le circuit connectant le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère. Ceci contribue aux variations du champ magnétique terrestre observé au sol et à bord des satellites. L'électrojet équatorial (**figure 2.5**) est une composante de ce circuit.

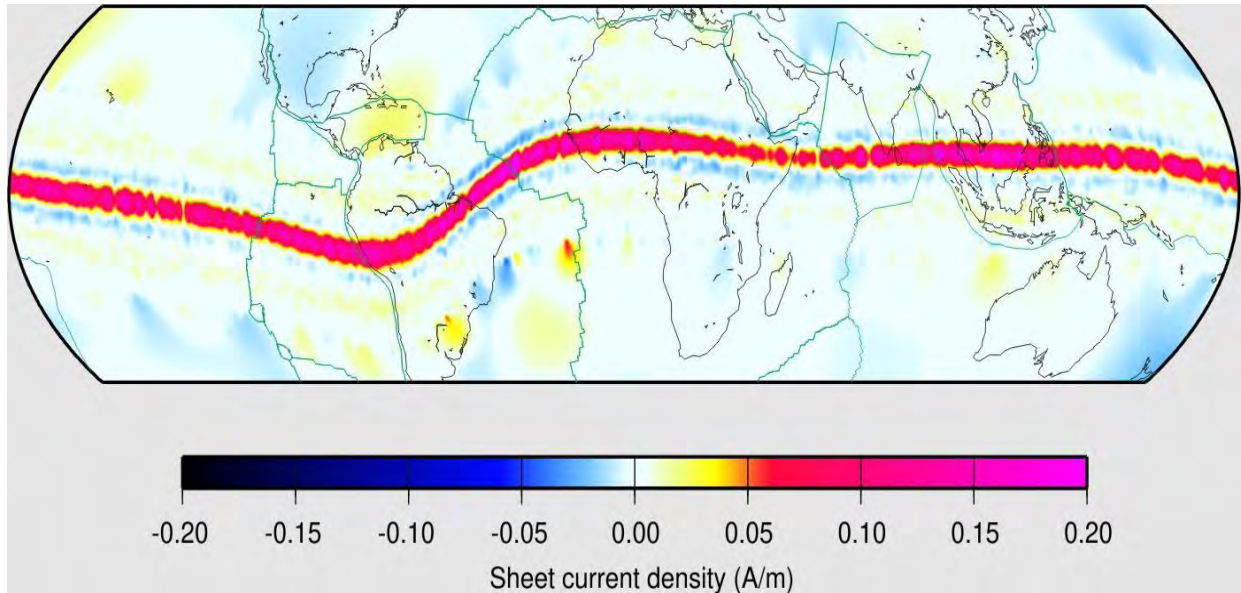


Figure 2.5 : L'électrojet équatorial (NOAA, NGDC)

2.3.2.1. Définition

Le processus réel de la circulation de courant dans le rayon équatorial est beaucoup plus complexe, car les charges s'accumulent à la suite de la mise en mouvement des ions et des électrons ce qui entraîne la production d'un champ électrique supplémentaire, appelé champ de polarisation. Ce champ agit de façon différente sur les ions et les électrons, modifiant ainsi leur circulation.

Parmi toutes les couches de l'ionosphère, la région E est la seule qui présente une conductivité importante pour entretenir la circulation du courant se refermant à l'équateur magnétique : l'électrojet équatorial (**figure 2.5**). C'est un système de courant circulant, d'Ouest en Est pendant le jour, dans une bande relativement étroite (600 km) centrée sur l'équateur magnétique. L'existence d'un tel système de courant a été mise en évidence par Chapman en 1951. L'électrojet équatorial est créé par l'amplification anormale de la variation diurne régulière S_R dans la composante horizontale (H) aux latitudes équatoriales pour tous les secteurs de longitude. 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).

Le phénomène doit son existence à l'augmentation de la conductivité électrique à l'équateur magnétique due à la configuration spéciale du champ magnétique et du champ électrique : le champ magnétique est horizontal et dirigé vers le Nord pendant que le champ électrique est dirigé vers l'Est (figure 2.6). Le champ électrique Ouest-Est et le champ magnétique crée un courant de Hall (vertical) qui accumule des charges à la frontière supérieure de la région E. Il apparaît alors un champ de polarisation vertical. Des auteurs tels que Cowling (1932), Martyn (1948) et Baker and Martyn (1953) ont montré que l'inhibition de la circulation du courant Hall par les couches moins conductrices au dessus et en dessous de la région dynamo [90 – 150 km] 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 Sq observé dans la ceinture équatoriale. Cette polarisation se produit à toutes les latitudes. Seulement, ce n'est qu'au voisinage de l'équateur magnétique où B est horizontal et où les charges de polarisation ne peuvent s'échapper le long des lignes de force du champ magnétique que le phénomène a lieu tel que décrit. Au-delà de l'équateur magnétique, ce renforcement de conductivité est quasi-inexistant à cause des pertes de charges le long des lignes de champ.

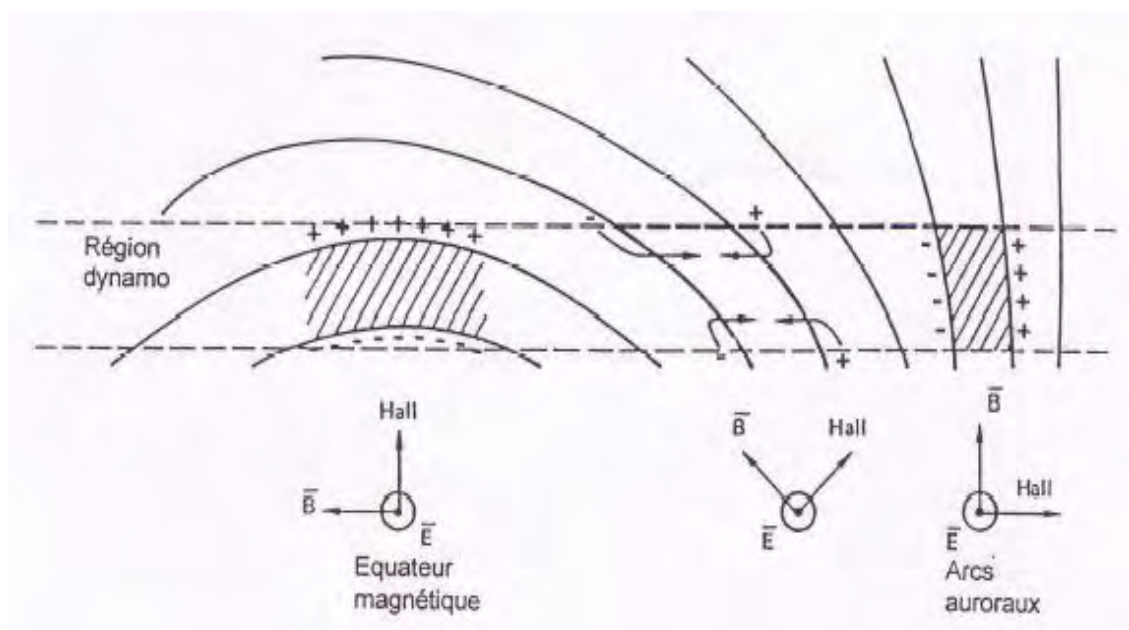


Figure 2. 6 : Champs magnétique et électrique en région F équatoriale

2.3.2.2. Expression du courant de l'électrojet équatorial

En région équatoriale, le champ électrique Ouest-Est et le champ magnétique créent un courant Hall verticale $\sigma_2 \vec{E}$ qui accumule des charges à la frontière supérieure de la couche E. Il en résulte un champ \vec{E}_p de la polarisation verticale. Le courant vertical résultant sera la somme des courants de polarisation et de courant Hall. Il s'écrit

$$\vec{J}_z = \sigma_2 \vec{E} + \sigma_1 \vec{E}_p \quad (2.17)$$

$\sigma_1 \vec{E}_p$: Courant Pedersen parallèle au champ électrique Ouest-Est.

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

$$\vec{J} = \sigma_1 \vec{E} - \sigma_2 \vec{E}_p \quad (2.18)$$

La condition d'équilibre permet d'écrire :

$$\vec{J} = \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \right) \vec{E} = \sigma_3 \vec{E} \quad (2.19)$$

La conductivité σ_3 dans la direction Ouest-Est est appelée conductivité de Cowling. Cette conductivité est importante à 100 km d'altitude environ et explique l'existence de l'électrojet équatorial qui circule à cette même altitude. Des études réalisées dans diverses régions : au Pérou (Forbush et Casaverde, 1961), au Nigéria (Onwumechili, 1959 a, 1959 b ; Ogbuehi et Onwumechili, 1964) ; au Tchad (Godivier et Creen, 1965) permirent de bien décrire la topologie de l'électrojet équatorial : une veine centrale (jet principal) et deux ailes latérales (jet auxiliaire). Le jet principal est centré à l'équateur magnétique. Cette nappe peut atteindre parfois une largeur supérieure ou égale à 400 km pour une épaisseur comprise entre 100 km et 112 km.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de plasma : chauds, froids avec ou sans collision, et détaillé plus particulièrement le plasma ionosphérique. Pour poser la base de nos travaux, nous avons donné la morphologie générale de l'ionosphère et les principales caractéristiques de l'ionosphère équatoriale: l'électrojet équatorial et la fontaine équatoriale. L'intérêt majeur de ce chapitre est de mieux comprendre : (1) l'évolution temporelle de l'ionosphère en fonction des événements solaires et des conditions géomagnétiques, (2) de mieux cerner la morphologie générale de l'ionosphère équatoriale en région ouest africaine, (3) étudier les paramètres du plasma ionosphériques et interplanétaire que nous développerons dans les chapitres 4 et 5. Dans le chapitre 3, nous faisons l'inventaire de quelques données essentielles pour notre travail ainsi que quelques analyses fondamentales.

CHAPITRE 3: LES DONNÉES ET INDICES D'ACTIVITÉ SOLAIRE ET GÉOMAGNÉTIQUE

Introduction

L'essentiel des perturbations observées dans l'environnement proche de la Terre est attribué aux différentes variations du soleil : activité solaire et événements solaires (voir chapitre 1).

A partir de l'indice d'activité géomagnétique aa établi par Mayaud (1973) et disponible sur la période allant de 1868 à nos jours, Legrand and Simon(1989,1990) et Simon and Legrand (1989) ont établi que l'une des meilleures signatures de l'activité solaire sur la terre est la fluctuation de l'activité géomagnétique. Dès lors, explorer les différents indices de l'activité solaire et géomagnétique est devenu une préoccupation majeure pour la compréhension des relations Soleil-Terre. Dans ce chapitre, nous faisons l'inventaire des indices d'activité solaire et d'activité géomagnétique importants, notamment leur mode d'acquisition et leur morphologie globale. Nous insisterons particulièrement sur l'indice géomagnétique Aa et l'ionisation ionosphérique.

3.1. Les indices d'activité solaire

3.1.1. Les taches solaires

Depuis la Terre, l'influence du soleil varie essentiellement de façon journalière et annuelle. Les taches solaires sont l'une des indications des variabilités observées dans l'activité solaire. Une tache solaire, zone sombre à la surface du soleil, est caractérisée par une température inférieure à celle de son environnement proche et présentant une intense activité magnétique. C'est cette différence de température d'avec son environnement qui la rend visible (cf. Chapitre 1).

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. Aujourd'hui, il est bien connu grâce aux travaux de l'astronome allemand Heinrich Schwabe (1843), que l'évolution des taches solaires suit un cycle de 11 ans (cf. Chapitre 1)

En 1848, l'astronome suisse Rudolph Wolf établit une méthode d'estimation quotidienne de l'activité solaire et parvient à calculer le nombre de taches solaires. La **figure 3.1** montre l'évolution du nombre de taches solaires sur 400 ans environ.

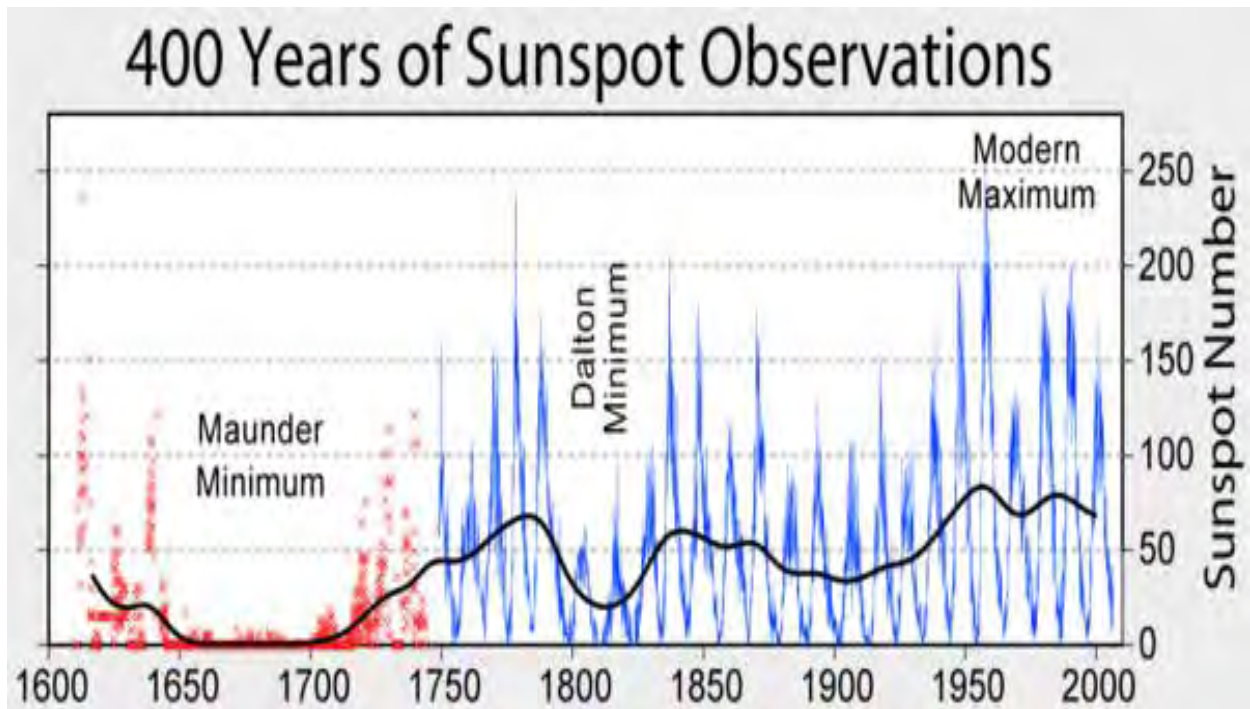


Figure 3. 1: Variation du nombre de taches solaire sur près de 400 ans (NASA)

Aujourd'hui, grâce à des nombreuses observations et aux mesures faites à bord de plusieurs satellites de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et de l'ESA (European Space Agency), il est mis à la disposition de tous, une compilation de base de données permettant d'explorer le soleil, l'activité solaire et le milieu interplanétaire. La **figure 3.2** présente une page d'acquisition de données (exemple du nombre de taches) prises depuis <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

The screenshot shows the OMNIWeb interface with the following elements:

- Header:** NASA logo, OMNIWeb title, and SPDF • Goddard Space Flight Center.
- Navigation:** About, Browse, FTP, Input-Data, News, Feedback.
- Main Content:**
 - Interface to produce plots, listings or output files from OMNI 2
 - How to get data from command line
 - Radio buttons for: Plot data (selected), List data, Create file (file?)
 - Select resolution:
 - Hourly averaged (selected)
 - Daily averaged
 - 27-day averaged
 - Click [here](#) to specify Y scale ranges for data plots (optional)
 - Click [here](#) to get time spans for individual parameters.
 - Enter start and stop dates (Use yyyyddd or yyyyymmdd):
 - Start: 20050101
 - Stop: 20050301
 - Select variables:
 - Indices**
 - Kp*10 Index
 - R Sunspot Number
 - Dst Index, nT [provisional or quick look, when?](#)
 - AE Index, nT [provisional or quick look, when?](#)

Figure 3. 2 : Exemple d'acquisition du nombre de taches solaires

3.1.2. Ejection de masse coronale ou Coronal Mass Ejections (CMEs)

Les CMEs sont les conséquences de puissantes explosions dans la couronne solaire qui projette dans le milieu interplanétaire du plasma ionisé (**figure 3.3**). Les éjections de masse coronale transportent des milliards de tonnes de matière et perturbent fortement le milieu interplanétaire. Les CMEs jouent donc un rôle important dans la météorologie solaire. Elles surviennent à toutes les phases du cycle solaire. On observe une CME par semaine au minimum solaire tandis qu'on a deux ou trois CMEs par jours au cours du maximum solaire. Toutes les CME ne sont pas dirigé vers la Terre, mais celles qui y parviennent sont susceptibles d'engendrer des orages magnétiques. Les CMEs jouent un rôle important dans la caractérisation de

l'activité solaire se manifestant par les ondes de choc (les CMEs suivent le cycle de taches).

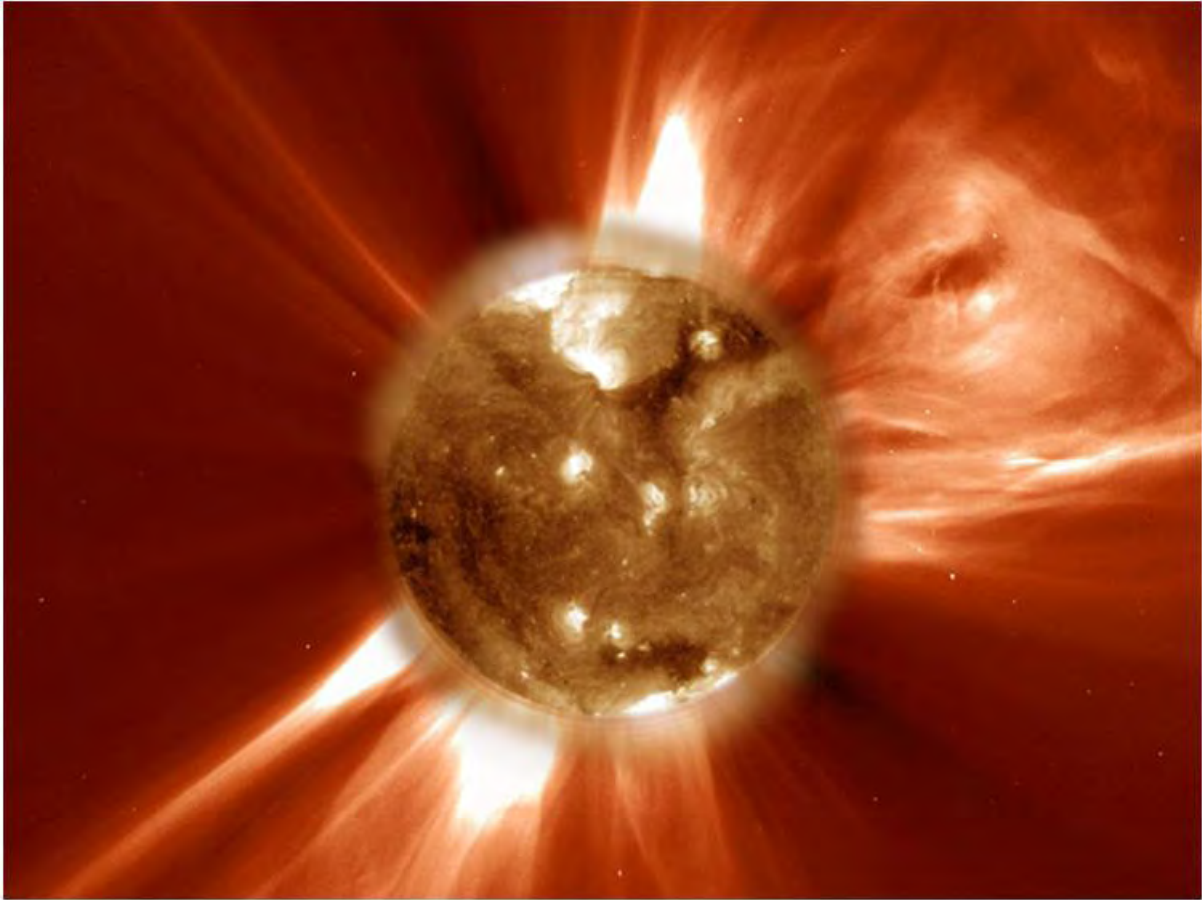


Figure 3. 3 : Ejection de masse coronale (CME) : SOHO Consortium, ESA, NASA

La détermination des dates de CMEs est possible à partir d'un catalogue qui est sous la forme d'une matrice Années X Mois (**figure 3.4**). Chaque élément de la matrice est un lien vers toutes les CMEs identifiées au cours du mois correspondant. Ce catalogue est obtenu grâce à LASCO (the Large Angle and Spectrometric Coronagraph) qui se trouve à bord de SOHO (the SOLar and Heliospheric Observatory). LASCO possède trois télescopes C1, C2 et C3. Toutefois, seules les données de C2 et C3 sont utilisées pour uniformité parce que le télescope C1 est en panne depuis juin 1998.

SOHO LASCO CME CATALOG

YEAR	MONTH											
1996	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1997	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1999	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2001	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2002	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2004	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2005	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2006	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2007	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2009	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2010	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep			

Cliquer sur un mois pour obtenir la liste de toutes les CMEs de ce mois

Figure 3. 4: catalogue donnant les dates des CME

3.1.3. Les débuts brusques d'orages : Sudden Storm Commencement : SSC

Longtemps considéré comme début brusque d'un orage magnétique, la définition du SSC a changé depuis les travaux de Mayaud (IAGA Bulletin 33 : "A Hundred Years Series of Geomagnetic Data, 1868-1967. Indices aa and storm sudden commencements). Aujourd'hui, un SSC correspond à un changement brusque suivi d'un orage magnétique ou d'une augmentation de l'activité magnétique qui dure moins d'une heure. La connaissance exacte des dates de SSC permet une meilleure estimation de la signature magnétique des différentes éruptions solaires dans le milieu interplanétaire et dans l'environnement proche de la Terre. La figure 3.5

présente une page permettant l'acquisition des dates de SSC. Les SSC sont très importants dans la classification de l'activité géomagnétique (Legrand et Simon, 1989 ; Zerbo et al., 2012).

Figure 3. 5 : Exemple de page permettant l'acquisition des dates des SSC

3.1.4. Vent solaire

Le vent solaire est un flot de particules, émis de façon continue depuis le soleil et s'écoulant dans le milieu interplanétaire. L'existence de flux continu de particules fut évoquée par Mairan au 18^{ème} siècle, mais c'est en 1957 que le physicien Parker lui donna le nom de vent solaire. Depuis les mesures à bord des satellites en 1958, le vent solaire constitue le meilleur laboratoire d'étude de plasmas spatiaux. La mesure des différents paramètres du vent solaire (Vitesse, pression, densité, etc.) permettent de comprendre les différentes variabilités du soleil et les influences du champ

magnétique solaire sur le champ magnétique terrestre. Les premières mesures dans le vent solaire datent seulement de 1962. Depuis cette date une base de données constituée à partir de la compilation de données prises à bord de plusieurs satellites est disponible et permet d'obtenir les différents paramètres du vent solaire (Figure 3.6).

The screenshot shows the OMNIWeb interface from NASA's Goddard Space Flight Center. The page title is "Interface to produce plots, listings or output files from OMNI 2". It includes a navigation menu with "About", "Browse", "FTP", "Input-Data", "News", and "Feedback". The main content area has several sections:

- How to get data from command line**: Includes radio buttons for "Plot data", "List data", and "Create file (file?)".
- Select resolution**: Includes radio buttons for "Hourly averaged", "Daily averaged", and "27-day averaged".
- Instructions: "Click [here](#) to specify Y scale ranges for data plots (optional)" and "Click [here](#) to get time spans for individual parameters."
- Enter start and stop dates (Use yyyyddd or yyyyymmdd)**: Shows input fields for "Start 20050101" and "Stop 20050301".
- Plasma**: A section with two columns of checked checkboxes:
 - Proton Temperature, K
 - Proton Density, n/cc
 - Flow Speed, km/sec
 - Flow Longitude, deg.
 - Flow Latitude, deg.
 - Alpha/Proton Density Ratio
 - Flow Pressure, nPa
 - Sigma-T
 - Sigma-Np
 - Sigma-V
 - Sigma-Flow-Longitude
 - Sigma-Flow-Latitude
 - Sigma-Alpha/Proton Ratio

Figure 3. 6 : Acquisition des paramètres du vent solaire

3.1.5 L'indice de flux radio solaire $F_{10.7}$

Cet indice est très utile dans les études magnétosphériques et en météorologie de l'espace, c'est un important indice d'activité solaire. L'indice $F_{10.7}$ représente l'intensité du flux radio solaire à la fréquence de 2800 MHz, soit une longueur d'onde

$\lambda = 10.7$ nm. Il est exprimé en $\text{watt/m}^2/\text{Hz}$ et sa valeur est mesurée en raison d'une par jour. Le rayonnement radio à la longueur d'onde 10.7 trouve son origine dans les régions éloignées de la chromosphère. 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 soit 17h00 TU. Ces valeurs sont ensuite corrigées du gain de l'antenne, de l'absorption atmosphérique et de la température du fond du ciel. Les données de $F_{10.7}$ sont archivées depuis 1947 sur omni web data (**figure 3.7**)

The screenshot shows the OMNIWeb interface with the following elements:

- Header:** NASA logo, OMNIWeb title, and SPDF • Goddard Space Flight Center.
- Navigation:** About, Browse, FTP, Input-Data, News, Feedback.
- Main Content:**
 - Interface to produce plots, listings or output files from OMNI 2
 - [How to get data from command line](#)
 - Radio buttons for: Plot data (selected), List data, Create file ([file?](#))
 - Select resolution:**
 - Hourly averaged (selected)
 - Daily averaged
 - 27-day averaged
 - Click [here](#) to specify Y scale ranges for data plots (optional)
 - Click [here](#) to get time spans for individual parameters.
 - Enter start and stop dates (Use yyyyddd or yyyyymmdd)**
 - Start: 20050101
 - Stop: 20050301
 - Select variables:**
 - ap index, nT
 - Solar index F10.7
 - Polar Cap (PC) index from Thule
 - AL Index, nT
 - AU Index, nT

Figure 3. 7 : Acquisition de l'indice de flux solaire F10.7

3.3. Les données ionosphériques

3.3.1. Sondage de l'ionosphère

Les moyens d'étude par sondage de l'ionosphère sont variés, depuis les techniques de sondage électromagnétique au sol, jusqu'aux mesures in-situ par satellite. Le premier sondage ionosphérique a été fait par Breit et Tuve (1926).

Dès les années 60, les radars ont été utilisés intensivement dans l'optique de mesurer des paramètres caractéristiques comme la densité électronique, la température ou l'intensité des fluctuations observées sur le signal. Dans ces sondages, les cibles qui diffusent les ondes électromagnétiques incidentes sont les irrégularités d'ionisation de petite taille (comparable ou inférieure à la longueur d'onde) causées par les fluctuations thermiques (Evans, 1969) ou par les mécanismes d'instabilité (Basu et Kelley, 1979). Les mesures reposent sur le fait que, dans les deux cas, les sections efficaces de diffusion sont suffisamment élevées par rapport au niveau du bruit pour que les ondes diffusées soient détectées. Les sondages électromagnétiques de l'ionosphère donnent donc lieu à deux types de diffusion : la diffusion incohérente par les fluctuations thermiques et la diffusion cohérente par les fluctuations dues aux instabilités. Dans les deux cas, ce sont les électrons qui diffusent l'onde selon le principe de la diffusion Thomson. L'agitation thermique des électrons du plasma (les plus mobiles) impose aux spectres de diffusion incohérente sa forme gaussienne et sa largeur. Ce type de diffusion est toujours présent dans le plasma ionosphérique, même dans le cas d'équilibre thermodynamique.

La diffusion cohérente, elle, est le résultat des ondes excitées au dessus de leur niveau naturel par les mécanismes d'instabilité. Dès, 1950, Booker et Gordon montrent que la section efficace de diffusion est proportionnelle à la valeur du spectre de puissance des irrégularités prise au vecteur de Bragg, c'est à dire:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin(\theta/2)} \quad (3.1)$$

Où λ_0 représente la longueur d'onde incidente et θ l'angle entre la direction incidente et la direction de diffusion. En particulier, dans le cas d'une diffusion vers l'arrière (ou rétrodiffusion), on aboutit à l'équation :

$$= \frac{0}{2} \quad (3.2)$$

Les temps de corrélation et les sections efficaces de ces deux types de diffusion sont très différents ; celui de la diffusion cohérente étant bien plus long que celui de la diffusion incohérente. En pratique, cela se traduit par des radars différents dans leur nature et leur fonctionnement. Par exemple, les radars à diffusion incohérente fonctionnent avec des puissances de quelques mégawatts contre quelques centaines de watt pour les radars à diffusion cohérente. Expérimentalement, dans le cas d'une diffusion cohérente, la rétrodiffusion présente l'avantage d'observer les irrégularités depuis le lieu d'émission au sol. Les irrégularités ionosphériques étant alignées au champ géomagnétique, cette diffusion doit se faire dans le plan perpendiculaire au champ. S'il est aisé de satisfaire cette condition en région équatoriale par un sondage vertical depuis le sol, l'étude des régions aurorales, où le champ magnétique est quasi-vertical, est beaucoup plus délicate. En pratique, ces problèmes sont résolus par l'utilisation des propriétés de réfraction de l'ionosphère. En envoyant une onde depuis des régions subaurorales et en utilisant la propriété de réfraction de cette onde dans les couches ionosphériques, il est possible d'atteindre la perpendicularité au champ magnétique au-dessus des zones aurorales. Ces chemins de propagation dans l'ionosphère nécessitent une gamme de fréquences particulières, proches de la fréquence plasma et imposent donc l'utilisation de la bande HF. Ainsi, Weaver (1965) obtient des échos radars de diffusion cohérente en région F, puis Hanuise et al. (1981) observent les spectres Doppler des irrégularités de région F à haute latitude par radar HF. Dans la pratique, les échos cohérents peuvent être observés jusqu'à des angles de l'ordre de 10 à 15 degrés (Moorcroft et Schlegel, 1990; Foster et al., 1992). Ainsi, la diffusion des ondes HF sur les irrégularités transportées permet l'étude et le diagnostic du plasma ionosphérique. En particulier, la vitesse mesurée permet de

connaître la vitesse du plasma. En effet, la vitesse de phase des irrégularités dans le référentiel du plasma est négligeable en région F et moins souvent en région E. Les irrégularités peuvent être vues comme des traceurs des mouvements convectifs et par leur étude, permettent celle de la dynamique du plasma ionosphérique.

De nombreuses expériences utilisent la diffusion sur les irrégularités comme moyen d'analyse des mouvements à grande échelle du plasma et en particulier, à haute latitude où ces mouvements reflètent les conditions du couplage entre le vent solaire et la magnétosphère (reconnexion magnétique).

3.3.2. Données des ionosondes

Sondages verticaux

Le sondage vertical est l'un des moyens les plus répandus pour l'étude de l'ionosphère. C'est grâce à cette méthode qu'a été acquis l'essentiel des connaissances sur la morphologie du comportement de la concentration électronique dans les régions E et F de l'ionosphère : profil vertical d'ionisation ou variation en fonction de l'altitude, variation diurne, variation saisonnière, variation en fonction de la latitude magnétique.

Principe

Le sondage à fréquence variable est la méthode la plus utilisée. Une onde de fréquence convenable est réfléchiée par l'ionosphère, lorsque sa fréquence est inférieure ou égale à la fréquence critique au milieu. Pour une impulsion émise, le temps au bout duquel l'écho est reçu dépend de l'altitude à laquelle a lieu la réflexion. Cette altitude correspondra au lieu où la fréquence sera égale à la fréquence critique. Si la concentration électronique est croissante avec l'altitude, la réflexion se fera à des altitudes croissantes et l'écho mettra plus de temps à revenir :

$$f_p^2 = \frac{q^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m} N \text{ (Fréquence plasma).}$$

La concentration électronique croît en général de façon monotone depuis le sol jusqu'au maximum de la couche F. Les sondages depuis le sol peuvent fournir les profils verticaux de cette région de l'ionosphère. L'ionosphère au dessus de la couche F est explorée par les satellites.

Fréquence critique d'une couche : fo

C'est la fréquence pour laquelle la couche ne réfléchit plus, car l'onde est infiniment retardée ou entièrement absorbée. Lorsque la couche est épaisse (cas des régions E et F), le retard provoque une élévation brusque de l'altitude de réflexion, ce qui permet un repérage précis de cette fréquence.

Le champ magnétique terrestre rend le plasma ionosphérique anisotrope. Ainsi, lorsque l'onde pénètre dans l'ionosphère, elle se divise en deux ondes de polarisation différentes qui se réfléchissent indépendamment donnant deux traces : une première dite « ordinaire » et une seconde de mode dite « extraordinaire » sur l'ionogramme nous aurons un 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 F2 est approximativement égal à la demi-gyrofréquence.

foE : fréquence critique de la couche E : sa mesure se fait à partir de l'estimation de l'asymptote verticale de la pointe de retard de la trace correspondante.

foEs : fréquence critique de la couche E sporadique : elle se détermine par l'extrémité d'une trace horizontale qui le jour, se raccorde à la trace de la couche E

foF₂ : fréquence critique de la couche F₂.

3.3.3. Ionogramme et hauteur virtuelle h'

Les résultats bruts de mesures sont généralement présentés sous forme d'un "ionogramme". L'ionogramme est l'enregistrement photographique du sondage. Les ionosondes présentent toujours plusieurs modes de traces. L'onde émise peut être

considérée comme comportant plusieurs modes et chaque mode a son propre niveau de réflexion. Les ionogrammes présentent en général des structures plus complexes : traces multiples dues à des réflexions successives entre l'ionosphère et le sol, traces à cause des structures irrégulières. Tous les paramètres ionosphériques sont déterminés au cours d'une séquence de dépouillement. Dans l'ionogramme la fréquence émise et reçue est portée en abscisse, tandis que l'ordonnée porte le temps de propagation qui s'écoule entre l'émission de l'impulsion et le retour de l'écho. Ce temps est plus souvent remplacé par une hauteur : c'est la hauteur virtuelle $h'(f) = ct/2$ (où c est la célérité de la lumière). La hauteur $h'(f)$ représente l'altitude de réflexion si la propagation se fait avec la vitesse c . C'est la hauteur pour laquelle la trace présente une tangente horizontale.

La Figure 3.8 est un ionogramme représentant la hauteur virtuelle d'une couche en fonction de la fréquence de l'onde incidente. En plus de données des hauteurs h' et des fréquences critiques f_0 , son exploitation donne également les hauteurs réelles des couches et le profil vertical de la densité électronique.

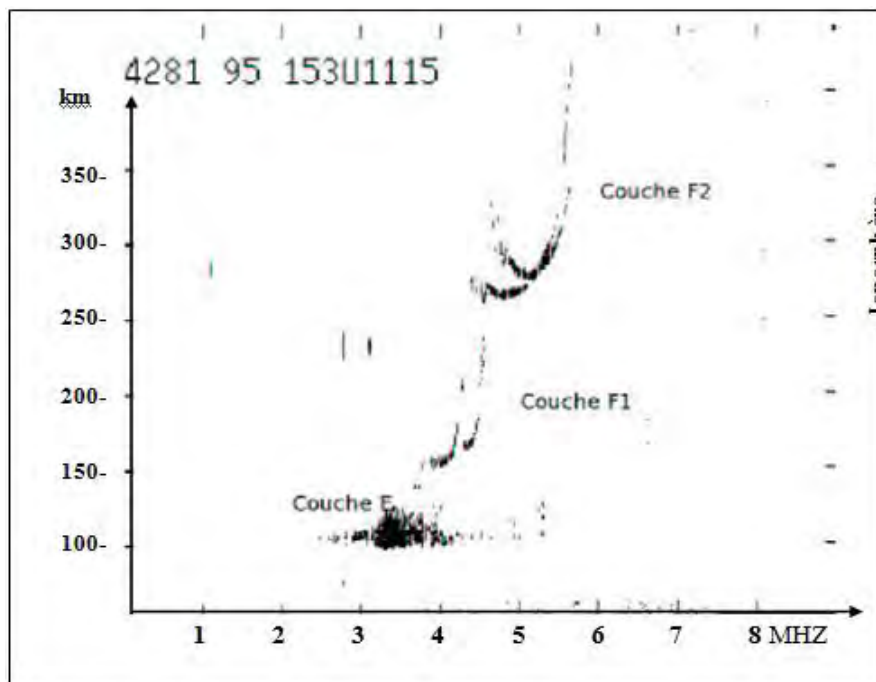


Figure 3. 8 : Exemple d'ionogramme de jour avec les couches E, F1 et F2. Les fréquences sont en abscisse et les hauteurs virtuelles en ordonnée. (Thèse de Obrou, 2008)

3.3.4. Indices géomagnétiques : choix de l'indice Aa

L'étude du magnétisme terrestre présente un caractère complexe, en ce qu'elle intègre les effets des différents courants électriques existant dans le système Soleil-Terre. Pour rendre plus commode l'analyse des variations du magnétisme terrestre, des scientifiques ont élaboré de nombreux indices qui reflètent la signature du soleil dans l'environnement interplanétaire et qui donnent des informations résumés et fiables sur l'évolution d'un phénomène. Le tableau 1 récapitule, les plus anciens indices géomagnétiques calculés à partir de l'indice k et les répartitions de leurs observatoires d'enregistrement de part le monde.

«L'indice k est un entier compris entre 0 et 9 correspondant à des classes d'activité contenant un large ensemble de perturbations géomagnétiques durant un intervalle de trois heures. La limite des classes d'activité géomagnétique est définie par chaque observatoire afin de déterminer l'activité géomagnétique ne dépendant pas de façon significative de la situation géographique de l'observatoire par exemple pour les zones subaurorales. Aux basses et moyennes altitudes, nous avons des intervalles successifs de trois heures (0-3h, 3-6h, ..., 21-24h UT permettant d'obtenir huit valeurs tri-horaires de l'indice k pour un jour donné.

Les indices k sont définis manuellement à partir des magnétogrammes par les observateurs ayant l'expérience requise ou par un ordinateur utilisant un des quatre algorithmes approuvés par IAGA ». (Menvielle et al., 2008).

La Figure 3.9 extraite de Menvielle (2008), montre que l'indice k est déduit de l'intervalle crête à crête des variations irrégulières durant l'intervalle tri horaire correspondant. En d'autres termes, Il correspond à l'écart entre les valeurs extrêmes après élimination de S_R . Le S_R représente la variation régulière du champ magnétique terrestre due au rayonnement électromagnétique créant l'ionosphère où circulent les courants électriques ionosphériques à l'origine du S_R .

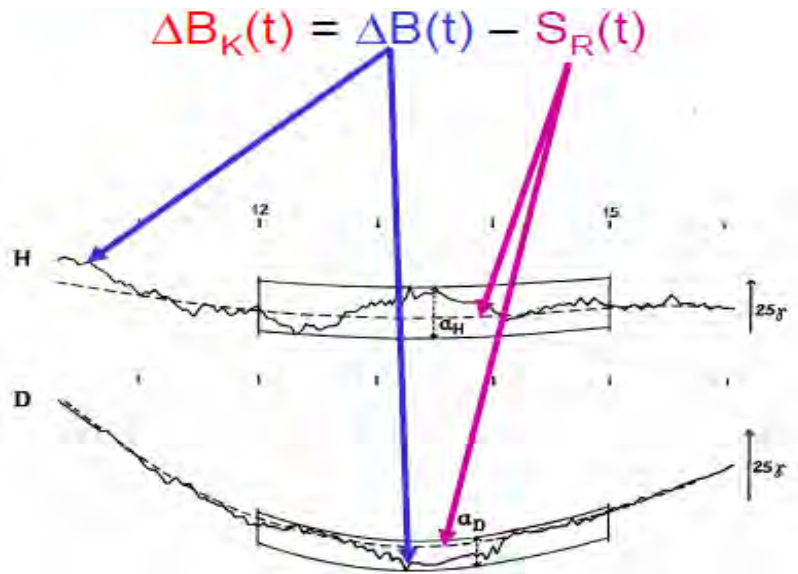


Figure 3.9 : Illustration du calcul de l'indice k (Menvielle, 2008)

Les indices Kp (Ap) et Km (Am) donnent une estimation de l'activité géomagnétique globale moyenne. Le Kp a été introduit par Bartels en 1949 et est établi à partir de mesures de l'indice K faites grâce à 13 stations d'observation : 11 dans l'hémisphère Nord et 2 dans l'hémisphère Sud. Il classifie sur une période de 3 heures le niveau de l'activité magnétique. L'indice Kp est la moyenne arithmétique des différentes valeurs tri-horaires de l'indice K (Bartels et al., 1939) de chaque station. Kp s'exprime sur une échelle de 0 (calme) à 9 (très perturbé). Tout comme le Kp, l'indice Km renseigne sur le niveau planétaire de l'activité magnétique et présente la même échelle que Kp. Toutefois, ses stations de mesures présentent une meilleure répartition (12 dans l'hémisphère Nord et 9 dans l'hémisphère Sud).

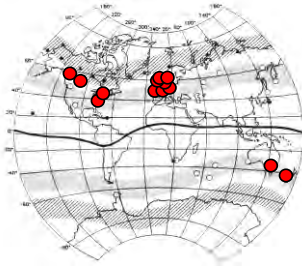

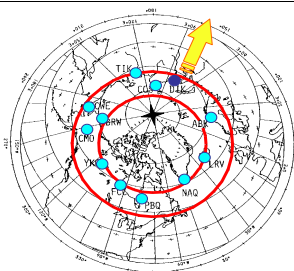
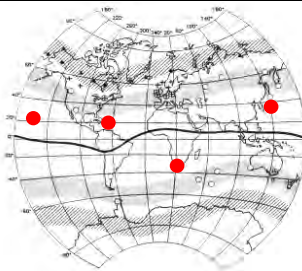
Les indices Ap et Am sont les expressions des indices Kp et Km respectivement à d'autres échelles d'observation et s'expriment en nano Tesla (nT).

L'indice géomagnétique Aa est basé sur l'indice K mesuré dans 2 stations antipodales. Il reflète l'activité solaire (Legrand et Simon, 1989 ; 1990). Il a une structure de doubles pics associés aux deux composantes du champ magnétique solaire. Les indices K et les indice A sont liés par l'échelle suivant :

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

Le Tableau 3.1 résume quelques indices d'activité géomagnétiques et la **Figure 3.10** donne un exemple de page permettant l'acquisition des valeurs journalières moyennes de l'indice Aa.

Tableau 3. 1 : Les différents indices géomagnétiques

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	Connaître le niveau principal de l'activité magnétique
Km et Am 12 observatoires dans l'Hémisphère Nord 9 observatoires dans l'hémisphère sud		3 heures	Connaître 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'oval auroral l'hémisphère nord		Minute	Etudier les courants annulaires AU : électrojet EST AL : électrojet OUEST
Dst 4 observatoires aux basses altitudes		1 heure	Etudier les courants magnétosphériques Courant de Chapman Ferraro

L'indice Dst représente la variation du courant magnétosphérique-annulaire qui circule dans le plan équatorial de la magnétosphère. Il est étroitement lié au développement des orages magnétiques. Il est la moyenne de l'indice K mesuré dans

quatre stations (3 dans l'hémisphère Nord et 1 dans le Sud) placées à des latitudes proches de l'équateur terrestre. La valeur négative du Dst est la signature d'un orage magnétique (Gonzales et al., 1994). Cette valeur est due à des courants de direction Est-Ouest circulant dans le plan équatorial de la magnétosphère. Les différentes valeurs du Dst traduisent le niveau d'intensité des orages magnétiques enregistrés. Les indices magnétiques auroraux AU (U : upper) et AL(L :Lower) sont utilisés pour analyser les électrojets auroraux circulant dans l'ionosphère. Ils sont enregistrés à partir de plusieurs stations situées en longitude variable à des latitudes aurorales.

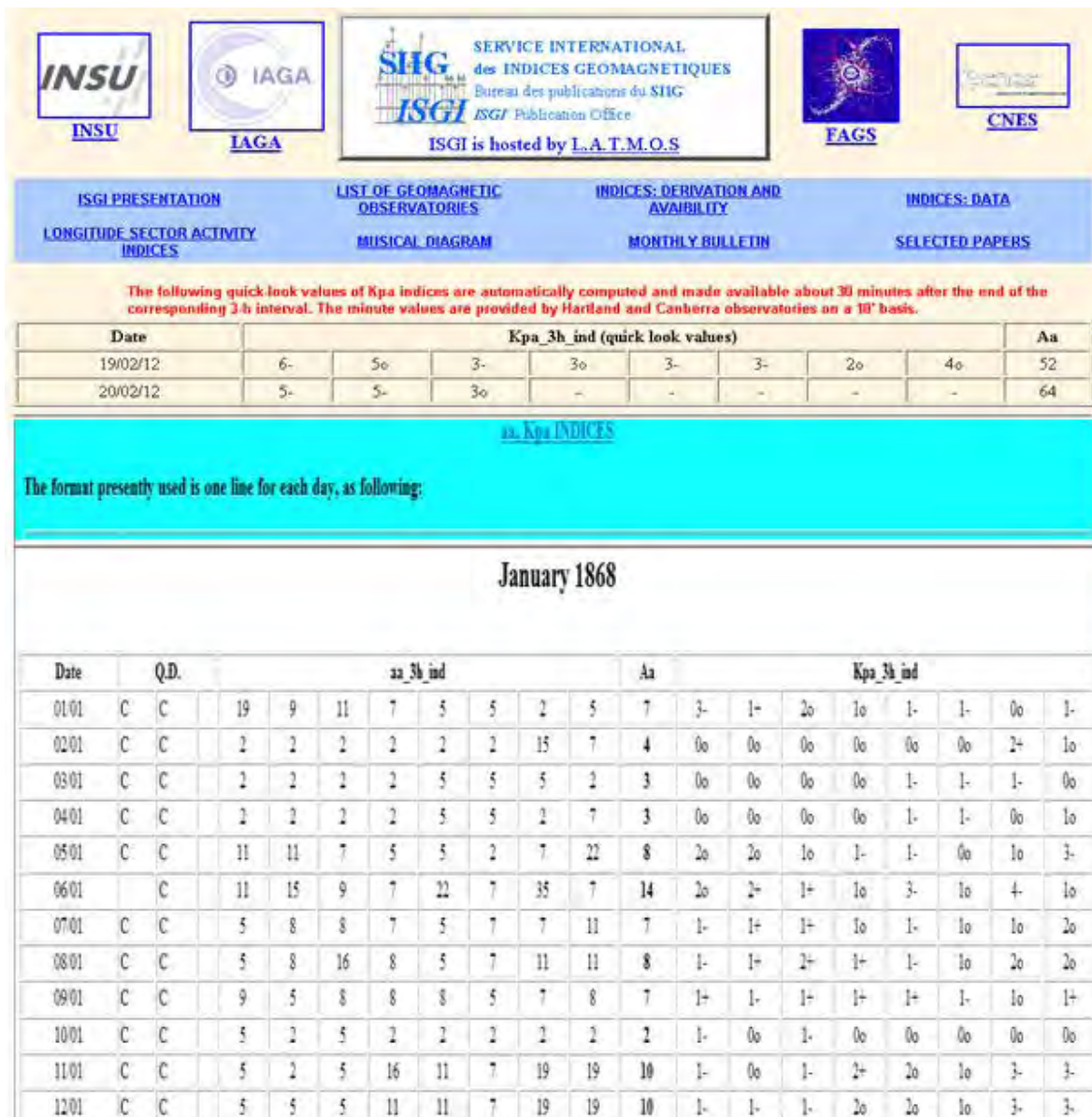


Figure 3. 10 : Acquisition des valeurs moyennes de l'indice géomagnétique Aa

3.4. Quelques analyses de données

Nous proposons dans ce paragraphe d'analyser les données archivées de vitesse de vent solaire V (depuis 1962), de l'indice géomagnétique Aa (depuis 1868), de nombre de taches Rz (depuis 1965) et de champ magnétique interplanétaire (IMF, B). Ceci nous permettra de comprendre la morphologie globale des indices d'activité solaire et géomagnétique.

3.4.1 Indice géomagnétique Aa

L'analyse du profil temporel des valeurs moyennes annuelles de l'indice géomagnétique Aa de 1868 à nos jours (**Figure 3.11 a**) et de 1964 à nos jours (**Figure 3.11b**) nous permet de distinguer trois périodes remarquables : 1868 à 1900, 1900 à 1960 et 1960 à 2003.

Au cours de la première période (1868-1900) les valeurs minimales sont comprises entre 5 nT et 12 nT, pour la seconde période les valeurs les plus faibles de Aa sont entre 6 nT et 17 nT. A la différence des deux autres périodes, la troisième (1960-2003) présente des minima relativement élevés (> 15 nT). Après cette troisième phase, la valeur de l'indice géomagnétique Aa décroît considérablement et atteint un minimum remarquable de 8 nT en 2009 qui est l'année la plus magnétiquement calme de ces 100 dernières années (Zerbo et al., 2011). Sur l'ensemble des données analysées, les années 1901 et 2003 se distinguent de toutes les autres en enregistrant comme plus petite valeur de Aa au cours de l'année 6 nT et 37 nT, respectivement. Ainsi, la plus faible (6 nT) est observée en 1901 et la plus élevée (37 nT) en 2003. Les lettres M et m indiquées sur la figure 10b, désignent respectivement le maximum et le minimum d'un cycle solaire. Au cours de chaque cycle solaire, nous constatons deux pics essentiels : le premier est attribué aux CMEs et le second est l'effet des vents solaires rapides issus de trous coronaux tels que ceux représentés sur la **Figure 3.12**.

Une lecture simple des courbes de la **figure 3.11** montre une augmentation remarquable de l'activité géomagnétique et des valeurs minimales de l'indice Aa de façon générale. De façon particulière l'année 2003 se relève être l'année la plus magnétiquement perturbée depuis 1868.

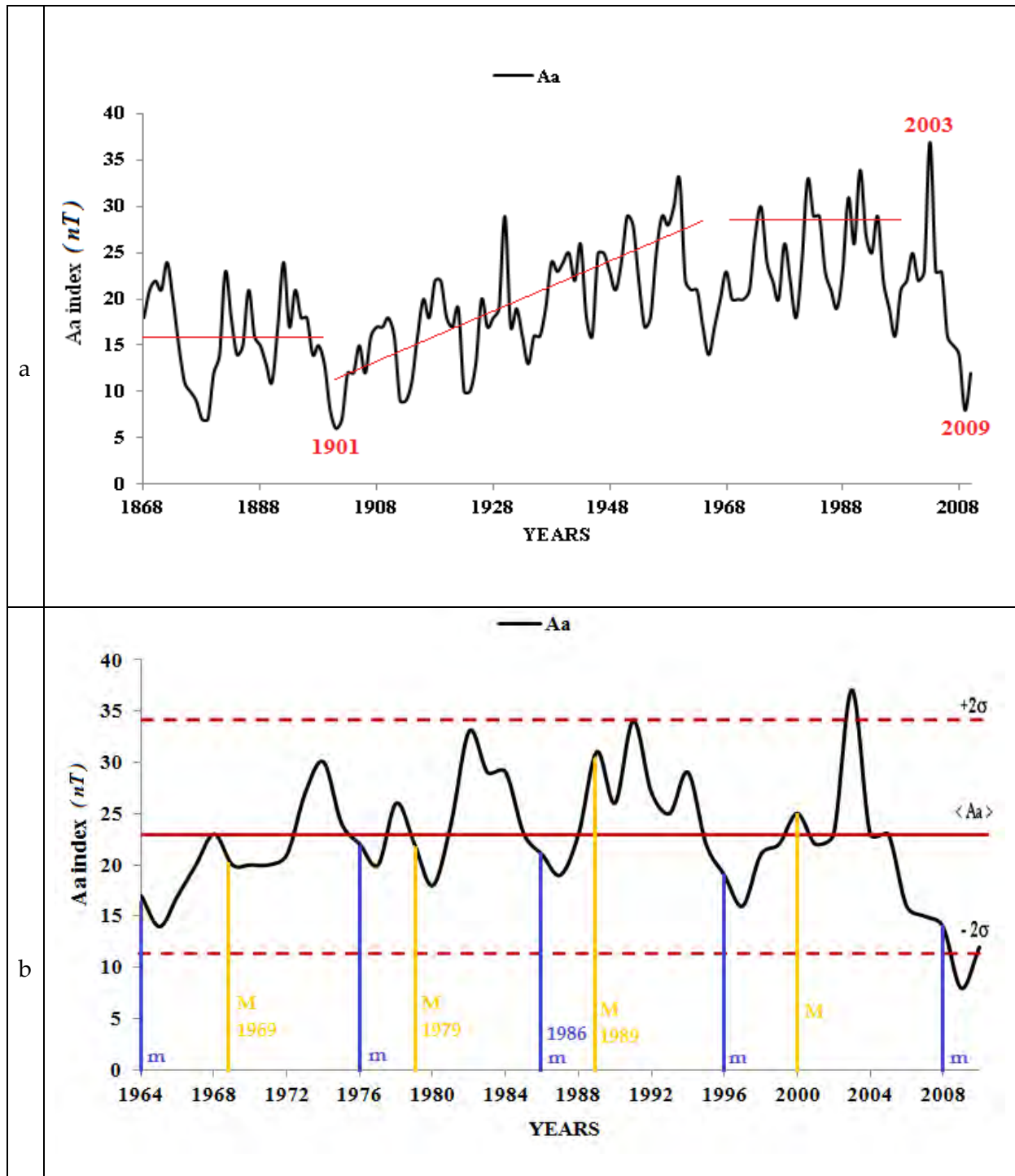


Figure 3. 11: Profil d'évolution de l'indice Aa

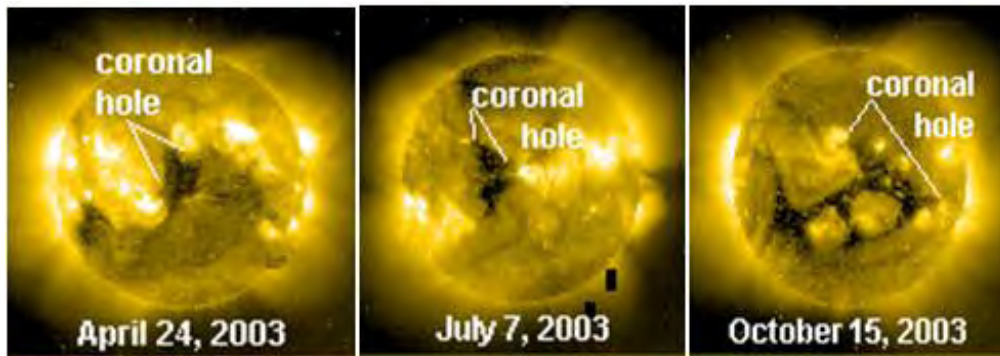


Figure 3. 12: Trous coronaux au cours de l'année 2003

3.4.2. Vent solaire et taches solaires

Dans ce paragraphe, nous étudions la morphologie générale du vent solaire suivant un certain nombre d'échelles importantes : moyenne journalière, rotation de Bartels, moyenne mensuelle et moyenne annuelle. Les figures 3.13 et 3.14 nous renseignent respectivement sur les variations journalières et celles à l'échelle d'une rotation solaire (27 jours) des vitesses du vent solaire sur l'ensemble des données archivées sur « <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> ». Il ressort que 2003 est sous l'influence de vents solaire rapides et 2009 sous celle de vents solaires lents. Cela est bien visible sur la figure 3.13 où la quasi-totalité des vitesses du vent solaire sont au-delà de 500 km/s pendant que 2009 montre des vitesses < 400 km/s sur l'ensemble de l'année.

Les figures 3.15 et 3.16 présentent une étude comparative du profil d'évolution des vitesses du vent solaire avec ceux du nombre de taches et de l'indice Aa respectivement. La figure 3.15 montre que les valeurs maximales dans les profils des vitesses du vent solaire et du nombre de taches ne coïncident pas. Toutefois, il est intéressant de constater que les valeurs maximales des vitesses du vent solaire sont observées au cours de la phase décroissante du cycle de taches solaires (les taches solaire évoluant suivant un cycle de 11ans ; Schwabe, 1843). Pour les données disponibles (1964 à nos jours), l'année 2003 enregistre l'amplitude la plus élevée de la vitesse moyenne. Des travaux antérieurs ont montré que les vents solaires rapides

issus de trous coronaux sont émis essentiellement au cours de la phase décroissante du cycle de taches solaire. Ceci explique les valeurs enregistrées en 2003, phase décroissante du cycle solaire 23.

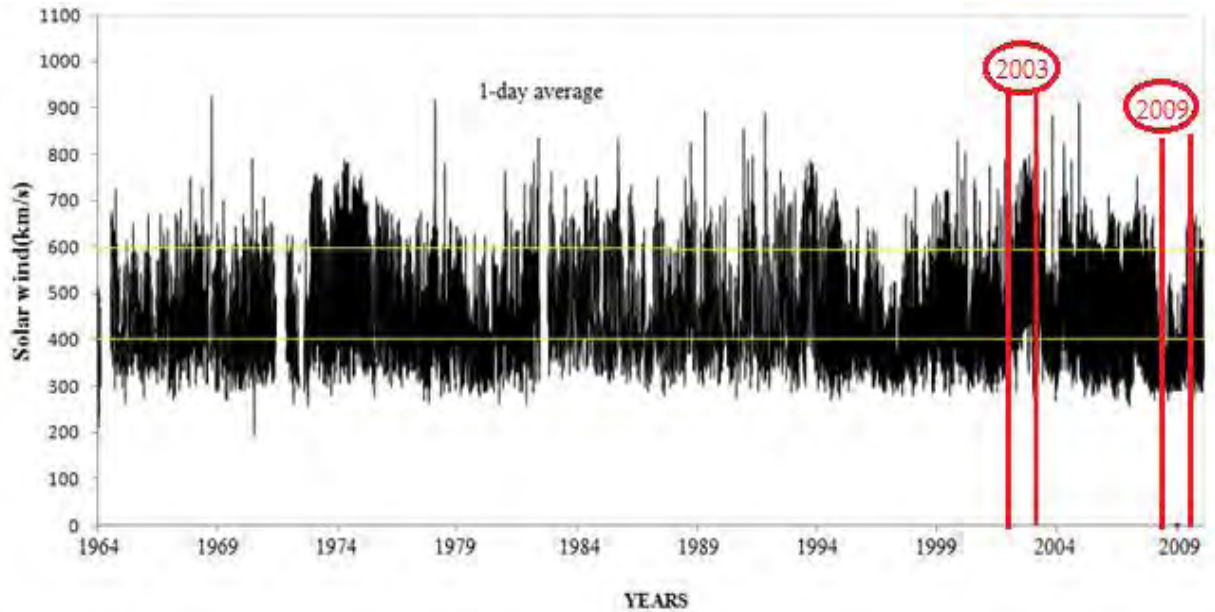


Figure 3. 13 : Evolution des valeurs journalières de l'indice géomagnétique Aa

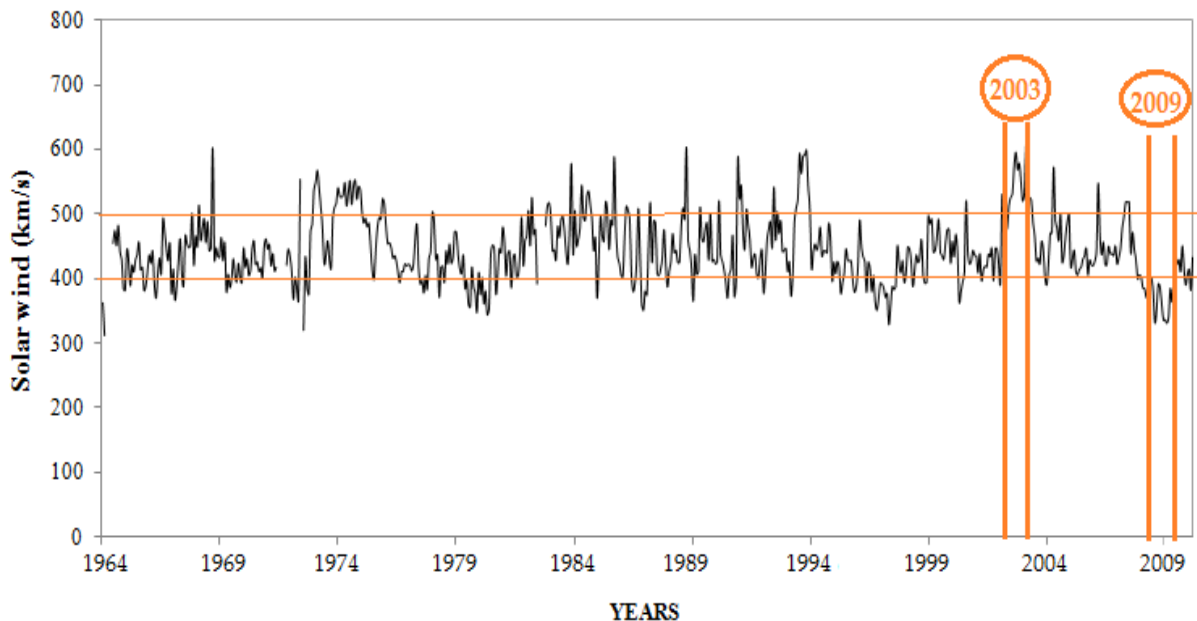


Figure 3. 14 : Evolution des valeurs moyennes par rotation solaire de l'indice Aa

A la différence de la figure 3.15, la figure 3.16 montre que les profils des vitesses du vent solaire et de l'indice géomagnétique Aa évoluent en phase. Nous constatons que les valeurs maximales du vent solaire moyen sont atteintes pratiquement à la même

période que les maximales de l'indice Aa (par exemple en 2003). La figure 3.17 présente la corrélation entre Aa et le produit du module de la vitesse moyenne annuelle du vent solaire et le champ magnétique interplanétaire B annuel moyen. Il existe une étroite corrélation entre ces deux paramètres de l'activité solaire avec un coefficient de 0,88.

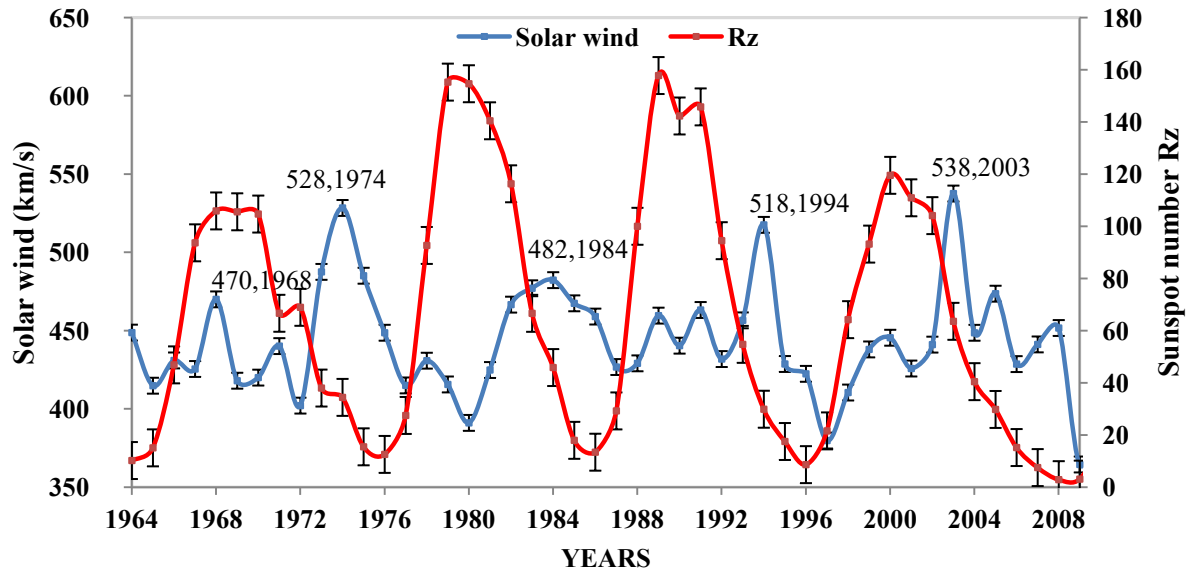


Figure 3. 15 : Superposition de l'évolution du vent solaire et du nombre de taches

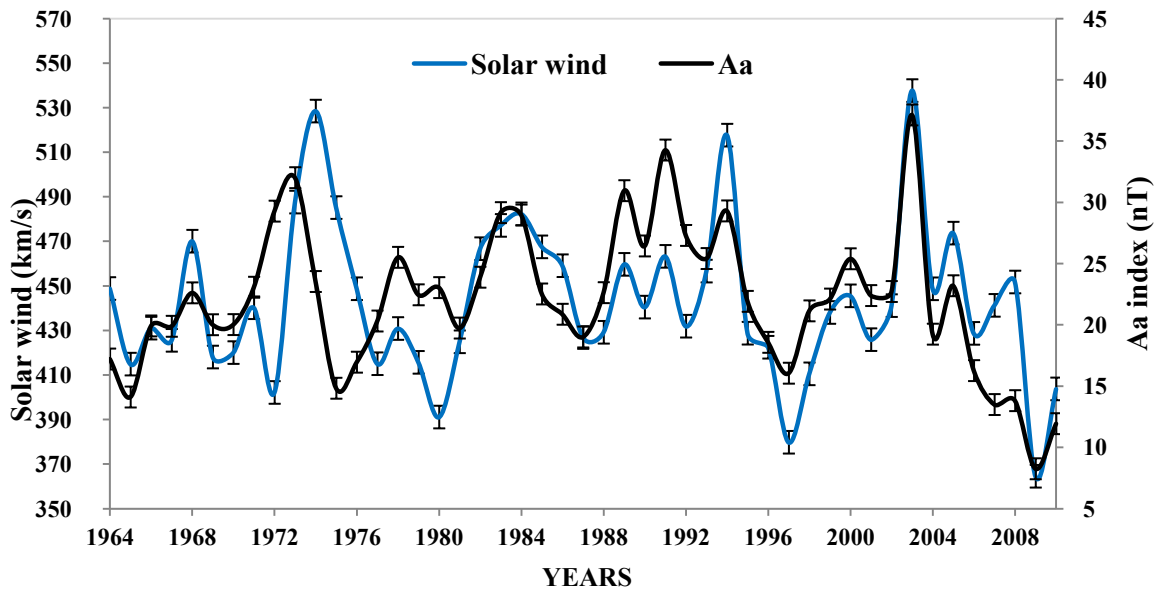


Figure 3. 16 : Profil comparé du vent solaire et de l'indice Aa

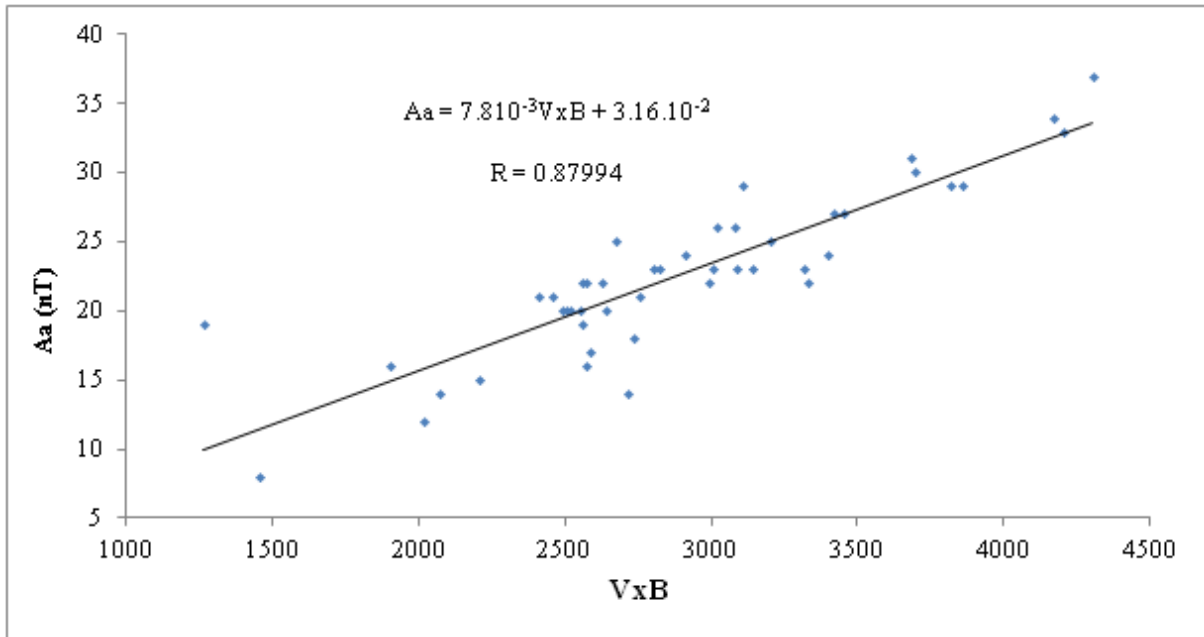


Figure 3. 17: Corrélation vent solaire et géomagnétisme

Conclusion

L'analyse des données est un aspect très important dans l'étude et l'interprétation des phénomènes physiques. Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques indices et données d'activité solaire et d'activité géomagnétique. La connaissance de ces paramètres est essentielle pour la suite de nos travaux.

L'analyse morphologique de l'indice géomagnétique et du vent solaire effectuée dans ce chapitre permet de remarquer des années d'activités solaire et géomagnétique exceptionnelles. Ce résultat pose une des bases de nos perspectives d'étude sur le climat.

Dans les chapitres 4 et 5 de cette thèse, nous exploiterons beaucoup plus l'indice géomagnétique Aa et la fréquence critique foF2 de la couche F de l'ionosphère respectivement. Il convient cependant de noter que l'appréhension de tous les autres paramètres définis dans ce chapitre est important en raison de l'interconnexion des indices d'activités solaire et géomagnétique.

Article: Zerbo et al., 2012b

Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics

Zerbo, J-L., C. Amory-Mazaudier , F. Ouattara

[Journal of Advanced Research, Elsevier]



ORIGINAL ARTICLE

Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics

Jean-Louis Zerbo ^{a,b,c}, Christine Amory-Mazaudier ^{b,*}, Frédéric Ouattara ^d

^a Université Polytechnique de Bobo Dioulasso, 01 BP 1091, Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

^b LPP – Laboratoire de Physique des Plasmas/UPMC/Polytechnique/CNRS, UMR 7648, 4 Avenue de Neptune, 94 107 Saint-Maur-des-Fossés, France

^c Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables (LETRE), Université de Ouagadougou, 10 BP 13495, Ouagadougou 10, Burkina Faso

^d Ecole Normale Supérieure de l'Université de Koudougou, BP 376 Koudougou, Burkina Faso

Received 6 April 2012; revised 17 August 2012; accepted 19 August 2012

KEYWORDS

Geomagnetic activity;
Solar cycle;
Solar wind

Abstract On the basis of more than 48 years of morphological analysis of yearly and monthly values of the sunspot number, the aa index, the solar wind speed and interplanetary magnetic field, we point out the particularities of geomagnetic activity during the period 1996–2009. We especially investigate the last cycle 23 and the long minimum which followed it. During this period, the lowest values of the yearly averaged IMF (3 nT) and yearly averaged solar wind speed (364 km/s) are recorded in 1996, and 2009 respectively. The year 2003 shows itself particular by recording the highest value of the averaged solar wind (568 km/s), associated to the highest value of the yearly averaged aa index (37 nT). We also find that observations during the year 2003 seem to be related to several coronal holes which are known to generate high-speed wind stream. From the long time (more than one century) study of solar variability, the present period is similar to the beginning of twentieth century. We especially present the morphological features of solar cycle 23 which is followed by a deep solar minimum.

© 2012 Cairo University. Production and hosting by Elsevier B.V. All rights reserved.

Introduction

The variations observed in space and on the vicinity of the Earth's environment are attributed to the change in solar activity. It is well known since the availability of geomagnetic

activity indices (1868 to nowadays) explained by Mayaud [1,2] that one of the best signatures of the solar variability recorded on Earth is geomagnetic activity. The Kp (Ap) and Km (Am) indices are used to determine the level of geomagnetic activity. Table 1 shows that the distribution of the observatories used to compute the Km is better than the distribution used to compute the Kp: (1) there is a better representation for the Southern hemisphere (9 observatories for Km and 2 for Kp) and (2) the longitudinal coverage is better for Km than for Kp. We have to mention here that the Kp index is given on a scale from 0 to 9 and the Am index is given in nT. Kp and Ap are the same measure of geomagnetic activity on two different scales. It is the same thing for Km and Am. The aa index

* Corresponding author. Tel.: +33 661851049; fax: +33 48894433. E-mail address: christine.amory@lpp.polytechnique.fr (C. Amory-Mazaudier).

Peer review under responsibility of Cairo University.

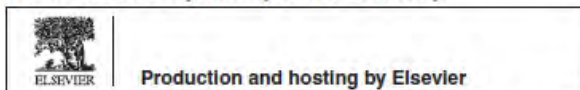


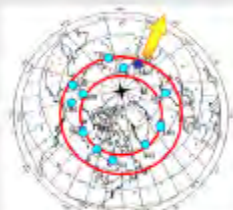



Table 1 The most used geomagnetic indices.

Magnetic indices	Magnetic observatories used	Time resolution	Use
Kp and Ap (nT) 12 observatories in the Northern hemisphere 2 observatories in the Southern hemisphere		3 h	To know the main level of magnetic activity
Km and Am (nT) 12 observatories in the Northern hemisphere and 9 in the Southern hemisphere		3 h	To know the main level of magnetic activity
aa (nT)	2 antipodal observatories	3 h	To understand the impact of solar activity on geomagnetic activity
AU and AL (nT) 13 observatories around the auroral oval in the Northern hemisphere		Minute	To approach auroral currents as AU: Eastward electrojet AL: Westward electrojet
Dst (nT) 4 observatories at low latitude		1 h	To approach magnetospheric currents as Chapman Ferraro current Ring current.

Mayaud [1,2] informs on solar activity, mainly on the two components of the solar magnetic field. The AU and AL indices are useful to analyze the ionospheric auroral electrojets. The Dst index is strongly related to storm development and its variations are influenced by various magnetospheric electric currents (magnetopause current, ring current and tail current). Mayaud [3], Menvielle and Berthelier [4] and Menvielle and Marchaudon [5], Menvielle et al. [6] wrote reviews on indices. Several studies have been made to investigate long-term variations in geomagnetic activity. Most of them showed general increase of geomagnetic activity during the 20th century in correlation with long-term variation of solar activity as noted by Stamper et al. [7], Lockwood [8], Svalgaard and Cliver [9], Rouillard et al. [10], Mursula and Martini [11], Svalgaard and Cliver

[12], Lockwood et al. [13], and Lu et al. [14]. Rouillard et al. [10] analyzed the centennial changes in solar wind speed and in the open solar flux and they found that the mean interplanetary magnetic field increase of 45.1% between 1903 and 1956 associated with a rise in the solar wind speed of 14.4%. These changes in open solar flux and solar wind speed induced changes in geomagnetism. Some authors Svalgaard and Cliver [9], and Svalgaard et al. [15] defined and used new indices (the interdiurnal variability: IDV index, the inter-hour variability index: IHV) to investigate variations in geomagnetic activity. All these results show the possibility of investigating solar activity throughout geomagnetic studies and the studies of solar wind speed variation. Recent studies by Russell et al. [16], and Lu et al. [14], for example, analyzed long-term series of

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, J Adv Res (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

geomagnetic indices aa, IDV, and IHV. The present paper is precisely one of the scientific works which explores the solar activity indices, solar wind speed, sunspot number, geomagnetic aa index, and the interplanetary magnetic field time variations in order to point the characteristics of solar cycle 23. We analyze data of solar indices using timescales of days, 27-days (solar rotation or a Bartels rotation) and year.

The second section of this paper is devoted to data sets and data processing. In the third section we investigate: (1) geomagnetic indices and justify the choice of the aa index, (2) solar wind speed and (3) sunspot cycles. The last section of this paper recalls interesting results and examines the particularities of each solar activity indices showing at the same times the remarkable and deep variations in solar activity.

Data sets and data processing

The geomagnetic index data aa used in this paper is taken from a homogeneous series established by Mayaud [2] and available per day on <http://isgi.latos.jpsl.fr/> since 1868. The aa index is a 3-hourly value based on values recorded by two antipodal observatories. The daily values are formed from an average of the 8 three-hourly values. To calculate this index, the data for each site is standardized for latitude on each separate 3-hourly K index value to 19° from the auroral zone. This

tabulation of the aa index is well known and full description of geomagnetic indices is given by Mayaud [2]. The first main of the aa series is to provide the characterization of geomagnetic activity. We used in this paper yearly and monthly averages for the reason that these time intervals are more adapted to the morphology of the transient variation of solar activity. The daily values of the solar wind speed, the international sunspot number (Rz), and the interplanetary magnetic field (IMF) are obtained from Omni data set <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. To investigate the geomagnetic activity we use daily average of aa index and solar wind speed Vs to build pixel diagrams (Bartels model) fully described by Legrand and Simon [17], Ouattara and Amory-Mazaudier [18], Zerbo et al. [19].

The pixel diagram is a diagram similar to Bartels 27-days rotation and built using the geomagnetic index aa from 1868 to 1977. It represents the geomagnetic data as a function of solar activity for each solar rotation (27 days or Bartels rotation) and gives an overview of the geoeffectiveness of solar events. In this plot, a daily mean solar or geophysical parameter is color-coded in a pixel which are displayed in rows of 27 such that time runs from left to right in each row and then from the top row to the bottom row. Because the mean solar rotation period, as seen from the Earth, is 27 days, phenomena caused rotating structures of the solar atmosphere and heliosphere

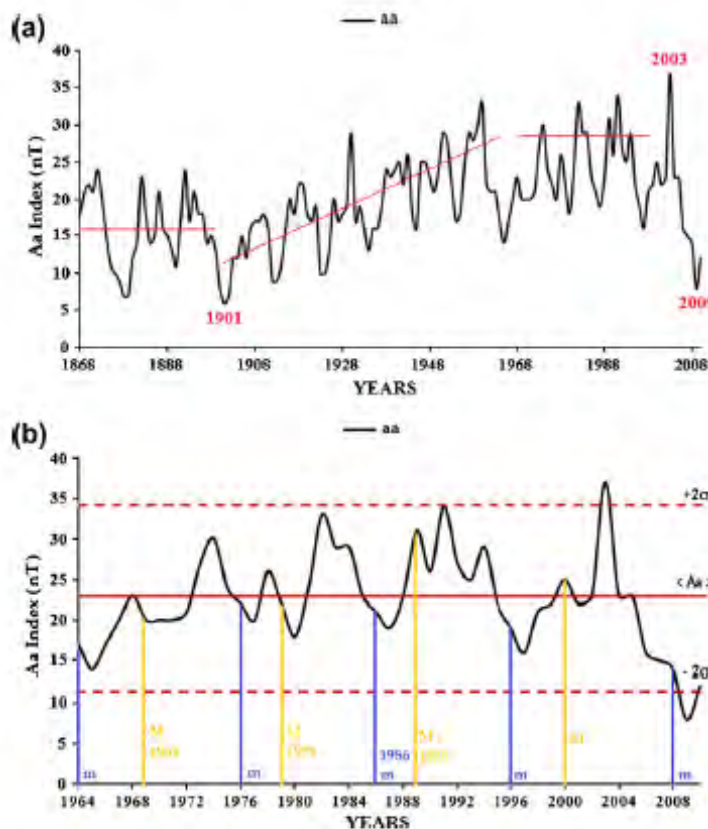


Fig. 1 Time profile of aa index: (a) from 1868 to 2010, (b) from 1964 to 2010.

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, J Adv Res (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

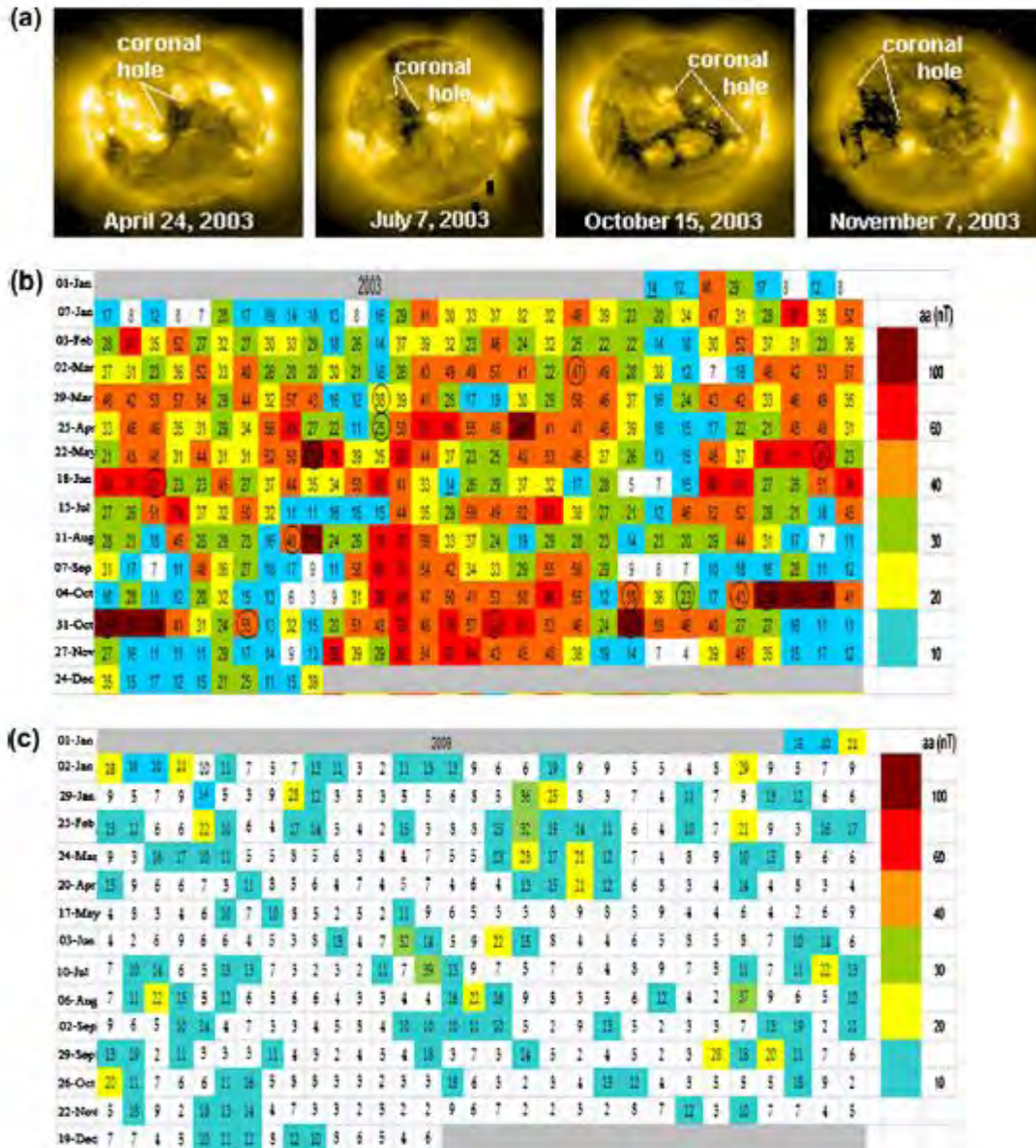


Fig. 2 (a) Example of coronal hole (24 April 2010), (b) aa pixel diagram for 2003, (c) aa pixel diagram for 2009.

that are persistent (i.e., lasting several rotations) will line up in vertical features of this format.

Results and discussion

Geomagnetic indices: the choice of the aa index

The study of the Earth's geomagnetic field is complex as it integrates the effects of different electric current systems existing in

the Sun Earth's system. To facilitate the analysis of geomagnetic variations, scientists created various geomagnetic indices to approach some of these electric current systems. Table 1 recalls briefly the main oldest series of geomagnetic indices still used with their worldwide distribution.

Several authors Svalgaard et al. [15], Mursula and Martini [11], and Love [20] underline the merit of the K index in estimation of geomagnetic activity. Recent studies combining the indices to get information on

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, J Adv Res (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

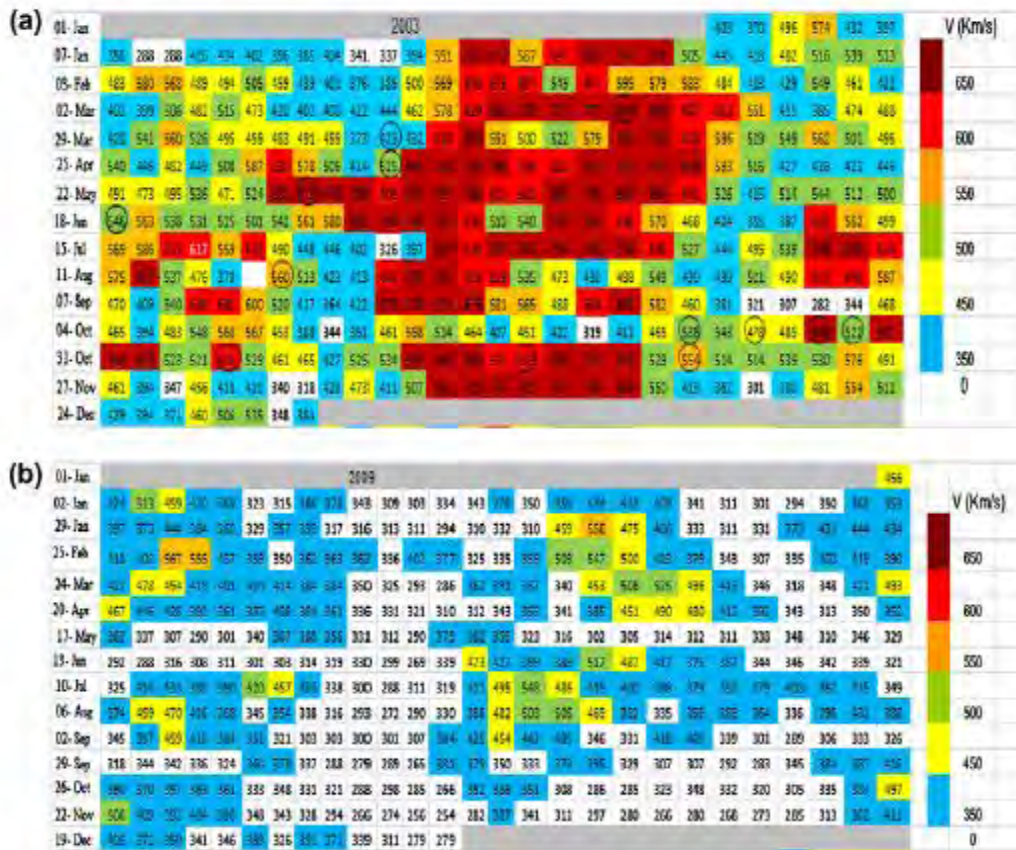


Fig. 3 Pixel diagram showing daily means of solar wind speed for the year 2003 (a), the year 2009 (b).

geomagnetic activity and solar wind have been published by Rouillard et al. [10], Svrlagaard and Cliver [21], and Lockwood et al. [13].

In this paper we are using the aa index and the classification of Legrand and Simon [17] applied to aa index to determine the different classes of solar activity (quiet Sun, CME with shock, coronal holes with high speed solar wind streams and fluctuating activity). Ouattara and Amory-Mazaudier [18] validated this classification and more recently Zerbo et al. [19] improved this classification.

Fig. 1 illustrates the time variation of the yearly-averaged aa index from 1868 until now (top panel) and from 1964 until now (bottom panel). During this last period there are measurements of solar wind parameters. On the top panel three periods are observed from 1868 to 1900, from 1900 to 1960 and from 1960 to 2003.

During the first period (1868–1900) the minimum of aa index is between 5 and 12 nT, then the value of this minimum increases from 6 nT (1900) to 17 nT in (1960). During the third period the minimum of the aa index is mainly greater than 15 nT and suddenly strongly decreases to 8 nT in 2009. It is the lowest value of the aa index observed from 1965 until now. Nevertheless the lowest value of the aa index since 1868 occurred in 1901: 6 nT and the highest value of the aa occurred in 2003: 37 nT.

The aa index variations exhibit several peaks for each solar cycle. On the bottom panel of Fig. 1 are pointed the minimum (*m*) and maximum (*M*) of the solar sunspot cycle. One of the peaks is associated to the maximum of the solar sunspot cycle and related to the CME. The other peak occurring near the minimum of the solar sunspot cycle is due to the high speed solar wind streams flowing from the coronal holes. On the bottom panel of Fig. 1, the sunspot solar cycle minimum (*m*) and maximum (*M*) are marked. We observe maxima of the aa index at the maxima/or near the maxima of the sunspot solar cycle. But, we also observe aa maxima after the sunspot maximum (*M*) during the descending phase of the sunspot cycle. The first maxima are associated to shock events. Indeed, with the works done by Richardson and Cane [22], Gopalswamy et al. [23], Ramesh [24], and Zerbo et al. [19], it is well known now that the shock events follow the solar cycle. The second maxima are associated to the declining phase of the sunspot cycle; they correspond to high speed streams flowing from solar coronal holes. The value of these second maxima is always larger than the value of the first ones. Rouillard et al. [10], Lockwood et al. [13], and Lockwood et al. [25] showed that the variation of solar wind speed made a relatively small contribution to this centennial variation in aa and the bigger effect was a variation in the open solar flux which modulates the near Earth IMF.

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, J Adv Res (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

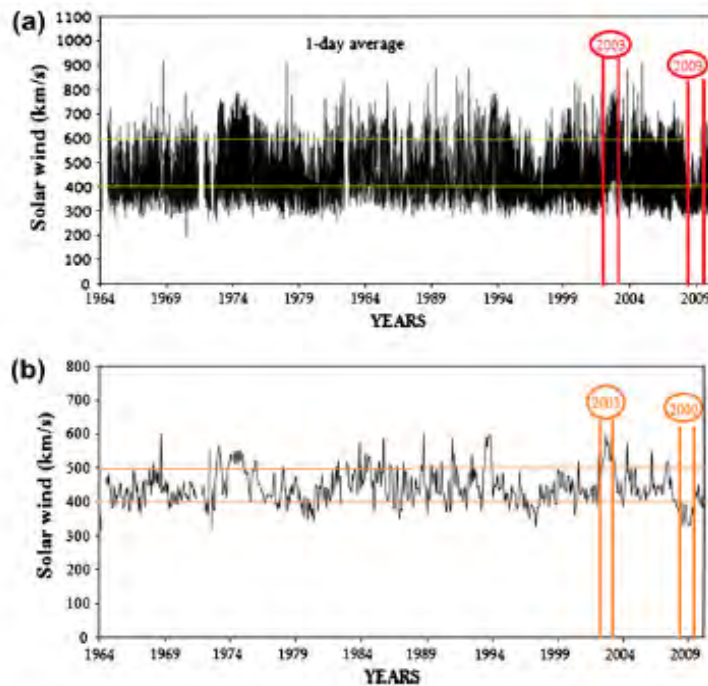


Fig. 4 Solar wind speed, (a) 1-day average profile of solar wind since 1964, (b) 27-day average profile of solar wind since 1964.

Fig. 2 includes three panels. The top panel shows pictures of coronal holes observed on the Sun during the year 2003. The middle and bottom panels are pixel diagrams of the aa index for the most magnetically disturbed year 2003 and the magnetically quietest year 2009. These diagrams give the daily value of the aa index. Each line corresponds to a Bartels rotation. Each sudden commencement which shows sudden increase in geomagnetic activity is quoted by a circle.

In 2003 the majority of the days are magnetically disturbed. We can observe during several solar rotations the same red color ($aa > 60$ nT), this is the signature of the high speed streams related to coronal holes. During the year 2003 in October and November biggest storms observed since 1965 occurred. This phenomenon is predominant during the declining phase. During this period polar coronal holes extend to low latitudes, and isolated low latitude holes appear, and as a consequence the fast solar wind streams flowing from these coronal holes intersect the Earth more often.

In 2009 (bottom panel), the majority of the days are magnetically quiet (white color $aa < 10$ nT), there is no shock event.

During the solar cycle 2003 and the deep solar minimum after this cycle the aa index exhibits the largest variation never observed since 1868 (see Fig. 1, top panel).

Solar wind

Fig. 3a and b are the pixel diagrams of the daily averaged solar wind in 2003 (panel a) and 2009 (panel b). The solar wind pixel diagrams are roughly similar to the aa index pixel diagrams

(Fig. 2). In 2003, $V_s > 600$ km/s (red color) dominates. In 2009, $V_s < 350$ km/s (white color) is predominant. Some differences between the aa pixel diagram and the solar wind are observed because of the factor of geo effectiveness. As a matter of fact, the aa index gives the geomagnetic signatures of the solar wind impact. Fig. 4 shows the solar wind variation from 1964 until now. The panel a is devoted to the daily averaged solar wind speed and the panel b to the 27 days averaged one. At the daily scale we observe a lack of slow solar wind speed ($V_s < 500$ km/s) in 2003 and a lack of high speed solar wind in 2009 ($V_s > 400$ km/s). This point is better observed on the 27 days averaged data (panel b). This effects is a very well known feature caused by change in distribution of coronal holes on the Sun over the solar cycle McComas et al. [26]: survey of the first two Ulysses orbit. Fig. 5a shows the yearly averaged solar wind speed (blue curve) superimposed to the yearly averaged aa index (black curve) from 1964 to 2010. The two curves exhibit roughly the same time variation. We notice that in 2003 the solar wind speed maximum occurred with the maximum of aa index. In 2009 the solar wind speed minimum occurred with the minimum of aa index.

Fig. 5b presents the yearly averaged solar wind speed (blue curve) superimposed to the yearly averaged interplanetary magnetic field (IMF) B (violet curve). It is interesting to notice that the IMF value is large in 2003 (8 nT) and small in 2009 (4 nT). Another particularity of solar cycle 23 is that the lowest value of the IMF is observed during the year 1996: 3 nT. On this Figure the minimum of the sunspot solar cycle (m) corresponding to the maximum of the solar poloidal field are quoted.

Please cite this article in press as: Zerbo J.-L. et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, *J Adv Res* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

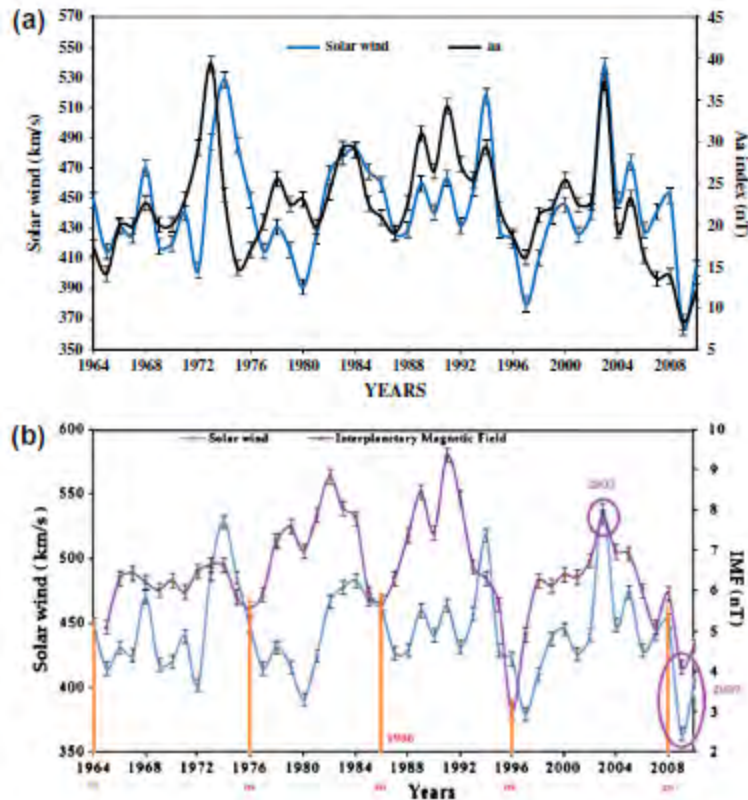


Fig. 5 (a) aa Index and solar wind time variations from 1964 to 2010, (b) solar wind and interplanetary magnetic field variation from 1964 to 2010.

Table 2 (a) Mean values and standard deviations for the aa index, the solar wind and the interplanetary magnetic field, (b) exceptional years since 1965.

(a)			
aa	1868–2010	1965–2010	
	19.4 nT	22.73 nT	
	$\sigma = 6.65$ nT	$\sigma = 5.64$ nT	
	$-2\sigma = 6.1$ nT	$-2\sigma = 11.45$ nT	
	$+2\sigma = 32.7$ nT	$+2\sigma = 34.01$ nT	
Vs	No data	443 km/s	
		$\sigma = 35$ km/s	
		$-2\sigma = 513$ km/s	
		$+2\sigma = 373$ km/s	
B	No data	6 nT	
		$\sigma = 1$ nT	
		$-2\sigma = 4$ nT	
		$+2\sigma = 8$ nT	
(b)			
High value since 1965	aa (nT)	Vs (km/s)	B (nT)
	$\langle aa \rangle = 22.73$ nT	$\langle Vs \rangle = 443$ km/s	$\langle B \rangle = 6$ nT
	$\sigma = 5.64$ nT	$\sigma = 35$ km/s	$\sigma = 1$ nT
	$\langle aa \rangle + 2\sigma > 34.01$ nT	$\langle Vs \rangle + 2\sigma > 513$ km/s	$\langle B \rangle + 2\sigma > 8$ nT
2003	37 nT	538 km/s	8 nT
Low value since 1965	$\langle aa \rangle - 2\sigma < 11.45$ nT	$\langle Vs \rangle - 2\sigma < 408$ km/s	$\langle B \rangle - 2\sigma < 4$ nT
2009	8 nT	364 km/s	4 nT

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, J Adv Res (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>

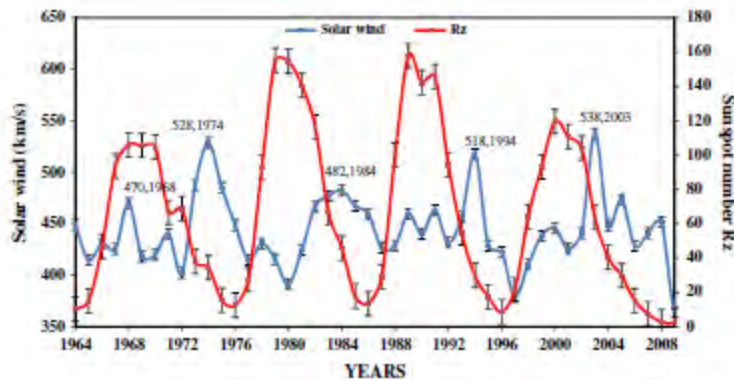


Fig. 6 Solar wind speed and sunspot number Rz variations from 1964 to 2010.

Table 3 (a) the four longest solar cycles in terms of months, (b) mean values and standard deviations for different solar cycle.

Solar cycle	Begin	Max	End	R_{min}	R_{max}	T_{max} months	T_{min} months	T_{tot} months
<i>(a)</i>								
4	May 1784	November 1787	June 1798	9.1	143.4	42	127	169
6	July 1810	March 1816	April 1823	0	50.8	68	85	153
9	July 1843	November 1847	January 1856	10.7	131.3	52	98	158
23	May 1996	June 2000	December 2008	7.9	125.6	49	102	151
Mean	-	-	-	5.5	117.6	50.8	81.5	132.3
St. Dev.	-	-	-	3.7	41.6	12.8	16.5	15.4
Parameter	R_{min}	R_{max}	T_{max} months	T_{min} months	T_{tot} months			
<i>(b)</i>								
Mean	5.5	117.6	50.8	81.5	132.3			
σ	3.7	41.6	12.8	16.5	15.4			
Mean - σ	1.8	76	38	65	116.9			
Mean + σ	9.2	159.2	63.6	98	147.7			
Cycle < 15	Cycles < 5, 6, 14		Cycles < 3		Cycles < 1, 7, 16	Cycles < 2, 3, 22		
Cycle > 2, 9, 21, 22	Cycles > 3, 18, 19, 21, 22		Cycles > 1, 5, 6, 7, 12, 16, 20		Cycles > 4, 9 (~) 11, 23	Cycles > 4, 6, 9, 23		

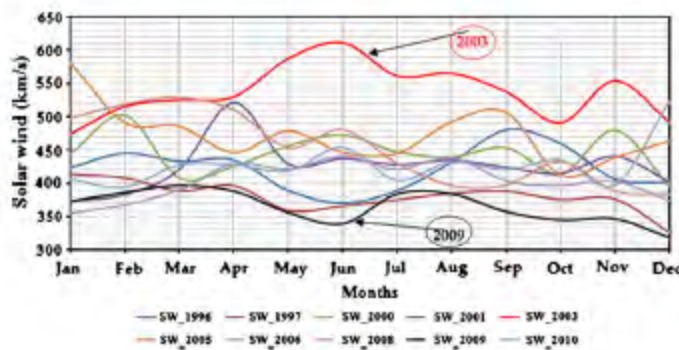


Fig. 7 Monthly variation of solar wind speed during cycle 23 and the deep solar sunspot minimum for different phases of the sunspot solar cycle.

Table 2a gives some statistical values on aa, solar wind speed and IMF. From 1965 to 2010, the mean averaged aa index is 22.73 nT and the standard deviation value is 5.64 nT. For the period 1868–2010, the mean averaged aa is smaller:

19.4 nT and the standard deviation value greater: 6.65 nT. From 1965 to 2010, the mean averaged solar wind speed is 443 km/s with a standard deviation of 35 km/s and the mean averaged value of the IMF is 6 nT with a standard deviation

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, J Adv Res (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarc.2012.08.010>

of 1 nT. For all these parameters we defined the interval: $[(\text{mean value}) \pm 2\sigma]$. Table 2b shows that only two years exhibits strong values or small values for the three parameters: 2003 and 2009. These 2 years are exceptional years.

Solar cycles

The yearly averaged sunspot number and solar wind speed are shown in Fig. 6. The maxima of the solar wind speed are observed during the decreasing phase of the sunspot solar cycle. From 1964 to 2010 the largest value of the solar wind is observed in 2003. It does not correspond to the larger sunspot number. Hapgood et al. [27] well explained that and underline the fact that the mean solar wind speed at Earth peaks in the declining phase of the solar cycle.

The characteristics of the four solar cycles (among 23) lasting more than 150 months are set up together in Table 3a (data extracted from table of Engzonnecyclus.html). The characteristics given are the beginning, maximum, and end of the solar cycle as well as the minimum and maximum values of the sunspot number and the time of rise and fall of the solar cycle.

This table provides also the mean averaged value and the standard deviations of all the parameters computed over all the solar cycles (1–23). Three long solar cycles were observed between 1784 and 1847 (63 years) and only one since 1847 (163 years). In Table 3b we define the interval: $[\text{mean value} \pm 1\sigma]$ and we classify all the solar cycles following this interval. Only 4 solar cycles, among 23, are not listed in this table (solar cycles 8, 13, 15, 17), this means that for these four solar cycles all their characteristics are in the interval defined $[\text{mean value} \pm 1\sigma]$. Most of the solar cycles (19) exhibit for one or several characteristics a large deviation from the mean. Solar cycles 4 and solar cycle 23 are similar. They have only two characteristics out of the interval: they last a long time, more than 150 months and their fall time is greater than 98 months (upper limit of the interval defined). Solar cycle 9 as solar cycles 4 and 23 lasted a long time with a long fall time but it also exhibits a R_{min} value out of the interval $[\text{mean value} \pm 1\sigma]$.

Fig. 7 presents for the period 1996–2010, the variation of the monthly averaged solar wind speed for several years during the different phases of the solar sunspot cycle, minimum (1996, 2008, 2009), maximum (2000, 2001), increasing (1997, 2010) and declining (2003, 2005). Year 2003 and 2009 are easily identified. During most of the time higher speed is observed in 2003 (red curve) and the lower speed in 2009 (black curve).

Conclusion

To investigate characteristics of geomagnetism during solar cycle 23, we analyze variations in solar activity, solar wind and geomagnetic activity indices on several times-scales in order to exhibit some features. Our study points out that the solar cycle 23 shows some important exceptions:

- it is one of longest cycle since 1847, in the same trend as the solar cycle 4 [1784–1798], the solar cycle 9 [1843–1856] and the solar cycle 6 [1810–1823],

- it shows the lowest solar activity and geomagnetic activity since 1901: year 2009,
- it has the greatest level of the aa average index observed since 1868 during the year 2003
- it exhibits the lowest value of IMF B since 1965 during the year 1996.

We also remark that the period from 1900 to 1960 which exhibits an increase of the geomagnetic activity and an increase of the value of the solar cycle minima as pointed out by Ouattara et al. [28].

This paper especially presents the morphological features of solar cycle 23 which is followed by a deep solar minimum.

Acknowledgements

The authors thank all the members of LPP/CNRS/UPMC for their welcome. They thank Jean-Pierre Legrand for his advice and collaboration. The authors thank Paul and Gérard Vila for the correction of the English of this paper.

The authors thank the NGDC data centre for providing the aa indices and the ACE data center for providing the solar wind velocity and IMF components. We express many thanks to Coopération Française and Burkina Faso for their financial help.

References

- [1] Mayaud PN. Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux. *Ann Geophys* 1971;27:71.
- [2] Mayaud PN. A hundred series of geomagnetic data, 1868–1967. *IAGA Bull.*33.1973, Zurich; 1973. p. 251.
- [3] Mayaud PN. Deviation, meaning, and use of geomagnetic indices. *Geophys Monogr Ser*, vol. 22. Washington (DC): AGU; 1980. p. 154.
- [4] Menvielle M, Berthelier A. The K-derived planetary indices: description and availability. *Rev Geophys space Phys* 1991;29: 415–32.
- [5] Menvielle M, Marchaudon A. Geomagnetic indices. In: Liliensten J, editor. *Solar-terrestrial physics and space weather in space weather*. Springer; 2008. p. 277–88.
- [6] Menvielle M, Iyemori T, Marchaudon A, Nosé M. Geomagnetic indices. In: Manda M, Korte M, editors. *Geomagnetic observations and models. IAGA special Sopron book series 5*, Springer; 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-9358-08>.
- [7] Stamper R, Lockwood M, Wild MN. Solar causes of long-term increase in geomagnetic activity. *J Geophys Res* 1999;104: 28,325–42.
- [8] Lockwood M. Long-term variations in the geomagnetic field of the Sun and the heliosphere: their origin, effect, and implication. *J Geophys Res* 2001;106:16,021–38.
- [9] Svalgaard L, Cliver EW. The IDV index: its derivation and use in inferring long-term variations of the interplanetary magnetic field strength. *J Geophys Res* 2005;110:A12103, doi: 10.29/2005JA011203.
- [10] Rouillard AP, Lockwood M, Finch I. Centennial changes in the solar speed and in the open solar flux. *J Geophys Res* 2007;112:A05103. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JA012130>.
- [11] Mursula K, Martini D. A new verifiable measure of centennial geomagnetic activity: modifying the K index method for hourly data. *J Geophys Res* 2007;34:L22107. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL031123>.

Please cite this article in press as: Zerbo J-L et al., Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, *J Adv Res* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jar.2012.08.010>

- [12] Svalgaard L, Cliver EW. Interhourly variability index of geomagnetic activity and its use in deriving long-term variation of solar wind speed. *J Geophys Res* 2007;112:A10111. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012437>.
- [13] Lockwood M, Rouillard AP, Finch ID. The rise and fall of open solar flux during the current grand maximum. *Astrophys J* 2009;700:937–44.
- [14] Lu H, Clilverd MA, Jarvis MJ. Trend and abrupt changes in long-term geomagnetic indices. *J Geophys Res* 2012;117:A05318. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA017422>.
- [15] Svalgaard L, Cliver EW, Le Sager P. IHV: a new long-term geomagnetic index. *Adv Space Res* 2003;34:436–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2003.01.029>.
- [16] Russell CT, Luhmann JG, Jian KL. How unprecedented a solar minimum. *Rev Geophys* 2010;48:RG2004.
- [17] Legrand JP, Simon PA. Solar cycle and geomagnetic activity: a review for geophysicists. Part I. The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind. *Ann Geophys* 1989;7(6):565–78.
- [18] Ouattara F, Amory-Mazaudier C. Solar–geomagnetic activity and Aa indices toward a standard classification. *J Atmos Solar Terr Phys* 2009;71:1736–48.
- [19] Zerbo JL, Amory-Mazaudier C, Ouattara F, Richardson J. Solar wind and geomagnetism, toward a standard classification 1868–2009. *Ann Geophys* 2012;30:421–6.
- [20] Love JJ. Long-term biases in geomagnetic K and aa indices. *Ann Geophys* 2011;29:1365–75. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-29-1365-2011>.
- [21] Svalgaard L, Cliver EW. Comment on the heliomagnetic field near Earth, 1428–2005 by K.G. McCracken. *J Geophys Res* 2008 [Previous paper].
- [22] Richardson IG, Cane HV. Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000). *J Geophys Res* 2002;107:118. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JA000504>.
- [23] Gopalswamy N, Lara A, Yashiro S, Howard RA. Coronal Mass Ejections and solar polarity reversal. *Astrophys J* 2003;598:L63–6.
- [24] Ramesh KB. Coronal mass ejections and sunspots-solar cycle perspective. *Astrophys J Lett* 2010;712:L77–80.
- [25] Lockwood M, Stamper R, Wild MN. A doubling of the Sun's coronal magnetic field during the last 100 years. *Nature* 1999;399:437–9.
- [26] McComas DJ, Ebert RW, Elliott HA, Goldstein BE, Gosling JT, Schwadron NA, Skoug RM. Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun. *J Geophys Lett* 2008;35:L18103. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034896>.
- [27] Hapgood MA, Lockwood M, Bowe GA, Willis DM, Tuluway YK. Variability of the interplanetary medium at 1AU over 24 years – 1963–1986. *Planet Space Sci* 1991;39:411–23.
- [28] Ouattara F, Amory-Mazaudier C, Menvielle M, Simon P, Legrand JP. On the long term change in the geomagnetic activity during the XXth century. *Ann Geophys* 2009;27:2045–51.

CHAPITRE 4 : VENT SOLAIRE ET GÉOMAGNÉTISME-VERS UNE CLASSIFICATION STANDARD DE L'ACTIVITÉ GÉOMAGNÉTIQUE

Introduction

De nombreuses études sont effectuées depuis plus d'un siècle afin d'associer à chaque variation transitoire du champ magnétique terrestre un événement qui traduirait une réponse à l'activité solaire : apparition de taches, Ejection de masse coronale ou CMEs (Coronal Mass Ejections), début brusque d'orage ou SSC (Sudden Storm Commencement). Ces tentatives d'identifier les sources solaires de l'activité géomagnétique ont été basées sur des recherches de coïncidences et l'analyse de longues séries de données géomagnétiques et solaires actuellement disponibles.

Cela a conduit Legrand et Simon (1981) à privilégier une approche, basée sur l'étude statistique des phénomènes à l'échelle des cycles solaires, à partir des séries centenaires des indices géomagnétique Aa définis par Mayaud (1971 ; 1973), des dates de SSC et du nombre de Wolf encore appelé nombre de taches solaires. Ainsi Legrand et Simon (1985), Legrand et Simon (1989) ont mis en évidence l'existence de grandes catégories de perturbations magnétiques : la première catégorie s'organise en plages récurrentes et la seconde correspond à des événements solaires de fortes intensités de courtes durées et survenant au hasard. Ils proposèrent un découpage de l'activité géomagnétique en quatre classes (activité des jours calmes, activité récurrente, activité de chocs, activité fluctuante) que nous développerons dans ce chapitre. Cette classification a été validée par des études faites par plusieurs auteurs (Richardson et al., 2000; Richardson et Cane, 2002; Ouattara et al., 2009; Ouattara et Amory Mazaudier, 2009 ; Zerbo et al., 2011). Il convient, cependant de souligner que des quatre classes proposées par Legrand et Simon, seules trois d'entre elles (activité calme, activité récurrente et activité de chocs) ont été clairement définies et sélectionnées. La quatrième correspondant à une compilation de phénomènes

solaires jusqu'alors non encore clarifiés. L'un des objectifs majeurs de notre travail sera alors de scruter l'activité fluctuante en exploitant l'étroite relation entre l'indice Aa et le vent solaire établie par Svalgaard (1977) et le fait que 91,5% de l'activité géomagnétique globale soit régi par le vent solaire (Legrand et Simon, 1990) afin de proposer une extension des conditions de Legrand et Simon (1989) et énoncer une classification standard de l'activité géomagnétique avec de nouvelles conditions sur le vent solaire (Zerbo et al.,2012a ; Zerbo et al., 2012 c).

4.1. Données et Méthodologie

4.1.1. Données

Pour atteindre nos objectifs dans les différentes analyses faites dans ce document, nous utilisons une importante base de données (plus de 142 ans de données):

(1) les dates de début brusque d'orages (SSC) qui traduisent les variations rapides du champ géomagnétique dues aux éjections de masses coronales pour l'identification des jours de chocs. Ces dates de SSC sont fournies par

<http://isgi.latmos.ipsl.fr/>,

(2) les valeurs moyennes journalières de vitesses du vent solaire qui résultent de la compilation normalisée de mesures faites à bord de plusieurs satellites. Ces valeurs sont fournies par <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>,

(3) les valeurs moyennes journalières des indices géomagnétiques Aa obtenues sur le site de National Geophysical Data Centre. Ces données traduisent les différentes variations du champ magnétiques terrestre induites par celui du soleil (<http://isgi.cetp.ipsl.fr/>).

(4) les nombres de Wolf ou nombres de taches fournis également par <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>. Les nombres de taches, nombres de zones

sombres à la surface du soleil, serviront à déterminer les différentes phases du cycle de taches solaires.

(5) les valeurs moyennes du champ magnétique interplanétaire (IMF : Interplanetary Magnetic Field) fournies par <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.

4.1.2. Méthodologie (classification selon Legrand et Simon, 1989)

Legrand et Simon (1989) ont basé leurs analyses des données géomagnétiques sur deux faits essentiels, pour élaborer la classification de l'activité géomagnétique:

1) La contribution des ondes de chocs à l'activité géomagnétique caractéristique de l'activité de chocs ;

2) L'étroite corrélation entre l'indice Aa (Mayaud, 1971 ; 1972 ; 1973 ; 1980) et le vent solaire (Svalgaard, 1977). Cette corrélation permet de diviser le vent solaire en trois types : les vents lents, les vents fluctuants et les vents rapides. Chaque type étant responsable d'une classe d'activité. On obtient ainsi à partir de ces deux faits : (1) l'activité des jours calmes, (2) l'activité récurrente, (3) l'activité de choc, (4) l'activité fluctuante.

(1) *L'activité des jours calmes* correspond aux jours dont les indices Aa < 20 nT. Elle est la manifestation des vents solaires lents (< 450 km/s) soufflant continuellement au-delà de la magnétosphère. Les trois autres classes (activité récurrente, activité de chocs et activité fluctuante) constituent le groupe des jours magnétiquement perturbés caractérisés par des indices Aa ≥ 20 nT. On les distingue comme suit:

(2) *L'activité récurrente*. Elle est provoquée par les vents solaires rapides issus des trous coronaux et qui présentent une évolution ininterrompue pendant une ou plusieurs rotations solaires. Elle est caractérisée par l'absence de SSC (orage) en phase principale. Cette classe correspond aux jours ayant des indices compris entre 40 nT et 60 nT.

(3) *L'activité de chocs*. Elle est déterminée par les dates de tempêtes ou orages spéciaux qui surgissent suite à des explosions aléatoires (éjections de masses

coronales) qui s'accompagnent des vents solaires rapides et sans répétition pendant 1, 2 ou 3 jours. Elle correspond aux dates des SSC pour lesquels les indices restent > 40 nT sur un, deux, trois jours.

(4) *L'activité fluctuante*. Elle est due aux fluctuations engendrées au cours de l'écoulement des vents solaires modérés et rapides qui provoquent la fluctuation de la plaque neutre du soleil. Elle regroupe tous les jours qui ne sont pas dans les trois premières classes.

Les deux dernières activités constituent les seules activités transitoires parmi les quatre classes. L'activité de choc est attribuée aux taches très actives sur le disque solaire et l'activité fluctuante est une des conséquences des fluctuations observées dans les jets de vent solaire dues à la fluctuation de la lame neutre.

Il est important de souligner que chaque classe d'activité résulte de la structure du vent solaire et exprime le comportement de la topologie du champ magnétique solaire. Cela signifie que toutes les classes diffèrent physiquement les unes des autres. Ici, les valeurs moyennes journalière des Aa constituent les données essentielles pour la détermination des classes d'activité, leur somme journalière étant utilisée seulement pour déterminer le pourcentage des classes d'activité (Ouattara et Amory Mazaudier, 2009).

Pour caractériser les phases du cycle solaire, nous adopterons les conditions suivantes : (1) minimum de phase: nombre de tache < 20 ; (2) phase ascendante: $20 \leq$ nombre de taches ≤ 100 et nombre de tache plus grand que celui de l'année précédente; (3) maximum de phase : nombre de taches ≥ 100 et (4) phase descendante ou décroissante : $100 \geq$ nombre de taches ≥ 20 et nombre de tache plus petit que celui de l'année précédente. Pour les petits cycles solaires c'est-à-dire ceux dont le maximum de taches < 100 , le maximum de phase correspond aux nombres de taches $> 0.8 \max$ (nombre de tache).

Les valeurs moyennes journalières du champ magnétique interplanétaire B et des vitesses du vent solaire sont données par les formules (4.1) et les valeurs annuelles par les formules (4.2):

$$V = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^N V_i \quad B = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^N B_i \quad (4.1)$$

Où B_i et V_i sont respectivement les valeurs moyennes horaires de B et V.

$$V = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \quad B = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N B_j \quad (4.2)$$

Où V_j et B_j sont les moyennes journalières de B et V.

$N = 365$ pour les années normales et 366 pour les années bissextiles.

4.1.3. Diagramme pixel

Legrand et Simon (1989) ont établi des diagrammes pixels analogues à ceux utilisés par Bartels pour mettre en évidence les orages récurrents qui se produisent en fin de cycle solaire. Ces diagrammes leur ont permis de distinguer quatre catégories d'activité magnétique et d'identifier leurs sources solaires respectives.

Pour construire un diagramme, nous disposons les valeurs moyennes journalières de l'indice Aa en tableau comportant 27 colonnes. Chaque ligne du tableau représente une rotation solaire. Un tel diagramme, analogue aux diagrammes de Bartels, permet une identification facile des phénomènes géomagnétiques associés au passage au méridien central, tous les 27,3 jours, des mêmes longitudes solaires. Nous avons aussi fait figurer sur ce diagramme les dates de débuts brusques d'orage ou Sudden Storm commencement (SSC), sans tenir compte du nombre de SSC observés dans une même journée. Ce diagramme a ensuite été coloré en fonction de la valeur de l'indice aa, selon le code indiqué dans le paragraphe « données et méthodes » et développé par Legrand et Simon (1989) ainsi que Ouattara et Amory-Mazaudier (2009). Ce

4.2. Variation long terme de l'activité solaire de 1868 à nos jours

Dans cette partie, nous analysons les données géomagnétiques Aa sur plus d'un siècle et demi dans le but d'avoir une vue d'ensemble des cycles solaires ainsi que celle de l'évolution de l'activité géomagnétique année par année et cycle par cycle. La figure 2 illustre l'évolution temporelle des phénomènes solaires (activité géomagnétique) sur les onze derniers cycles solaires (11 à 23). Cette figure présente les pourcentages de contribution de chaque classe d'activité géomagnétique à l'activité géomagnétique globale année par année depuis 1868. Cette étude est une continuité des travaux de Legrand et Simon (1989) qui ont exploré l'activité géomagnétique de 1868 à 1977. Les Figures 4.2a, 4.2b, 4.2c et 4.2d rendent compte de l'évolution de l'activité des jours calmes, de l'activité récurrente, de l'activité de chocs et de l'activité fluctuante respectivement. Le niveau de l'activité des jours calmes (Figure 4.2a) décroît progressivement avec le temps de 1868 jusqu'au milieu du cycle solaire 22 puis amorce une augmentation dont le niveau le plus élevé est atteint vers la fin du cycle solaire 23 (année 2009). Ceci montre que le niveau de calme magnétique a baissé sur plus d'un cycle. La Figure 4.2b montre que le niveau de l'activité récurrente est très variable d'une année à une autre et aussi d'un cycle à un autre. Elle montre que l'activité récurrente la plus élevée comparable à celle de 1930 (cycle solaire 16) a été enregistrée au cours du cycle solaire 23. La contribution de l'activité de chocs à l'activité géomagnétique globale présente une faible proportion dans son ensemble. Il est toutefois important de remarquer sur la Figure 4.2c qu'elle suit une répartition cyclique dans le temps et que l'un des plus faibles niveaux de cette activité est enregistré au cours du cycle 23. La Figure 4.2d présente l'évolution de l'activité fluctuante sur plus de 142 ans. Cette classe montre un niveau assez important et quasi-constant sur toutes les années. Cette importance est liée à la nature même de cette classe qui regroupe tous les phénomènes solaires inorganisés et les effets des fluctuations de l'héliosheet.

En explorant les différents profils présentés sur la Figure 4.2, il apparaît que le cycle 23 est semblable aux cycles solaires observés à la fin des années 1800. De même le cycle solaire 22 présente des caractéristiques voisines à celles de cycles observés au début des années 1900. Ces résultats pourraient être indicateurs des variabilités long-terme dans l'environnement interplanétaire dont le moteur est le soleil. En plus l'étude de la contribution de chaque type d'activité nous a donné des résultats remarquables suivant les phases de cycles de taches.

Les Figures 4.3a, 4.3b et 4.3c présentent les contributions de chacune des quatre classes d'activité géomagnétique suivant les phases du cycle (cycles 11 à 22). Les pourcentages d'occurrence évalués correspondent aux niveaux de contribution pour chaque type d'activité géomagnétique. Ces grandeurs évaluent le rapport de l'intensité d'un type d'activité au cours d'une phase donnée du cycle par l'intensité totale du même type d'activité sur l'ensemble du cycle considéré. Nous lisons ainsi à travers ces figures la répartition des différents phénomènes solaires sur dix cycles solaires.

L'activité des jours calmes et l'activité fluctuante évoluent en sens inverse et sont permanentes sur l'ensemble des phases de tous les cycles. Ces deux classes d'activité présentent des pics importants au minimum de phase et/ou à la phase descendante pour les jours calmes et à la phase ascendante ou à la phase descendante pour les jours à dominance fluctuante. Les proportions les plus importantes de l'activité récurrente apparaissent au minimum de phase ou au cours de la phase descendante du cycle. Pendant ce temps, le maximum de chocs s'observe au maximum de phase avec une légère continuité dans la phase descendante du cycle. Cela nous révèle que la contribution d'un même type d'activité n'est pas uniforme suivant les phases d'un cycle de taches. Toutefois, certains cycles, tels les cycles 18,19, 20 et 22, présentent des particularités.

Les cycles 18,19 et 22 présentent une fréquence non négligeable d'activité récurrente au cours du maximum de phases. Ce pic coïncide avec les fortes activités solaires enregistrées au cours des années 1947, 1958 et 1990.

Le cycle solaire 20 présente une activité de chocs globalement constante sur toutes ses phases avec un léger maximum au minimum de phase. Ce pic inhabituel est dû à la considérable éjection de masse coronale (CMEs) des années 1960 survenue pendant le minimum de phase du cycle précédent. Tous ces résultats sont récapitulés dans le tableau 4.1 sur les treize derniers cycles solaires. Ce tableau apparaît ici comme une continuité de Tableau 4.2 extrait de Legrand et Simon (1989). Le tableau 4.2 nous renseigne sur la distribution de chacune des quatre classes d'activité géomagnétique suivant les phases du cycle des taches (où m correspond au minimum et M au maximum de phase) et donne ainsi l'importance de la contribution de chaque type d'activité selon que nous soyons au minimum, en phase ascendante, au maximum de phase ou à la phase descendante tout comme l'esprit développé dans le tableau 4.1. Dans ce tableau 4.1, nous avons marqué en couleur les quatre cycles présentant des particularités. En examinant les deux tableaux, on peut dire que les cycles 19, 20, 21,22 et 23 complètent les travaux de Legrand et Simon (1989) en restant dans la logique des ces auteurs.

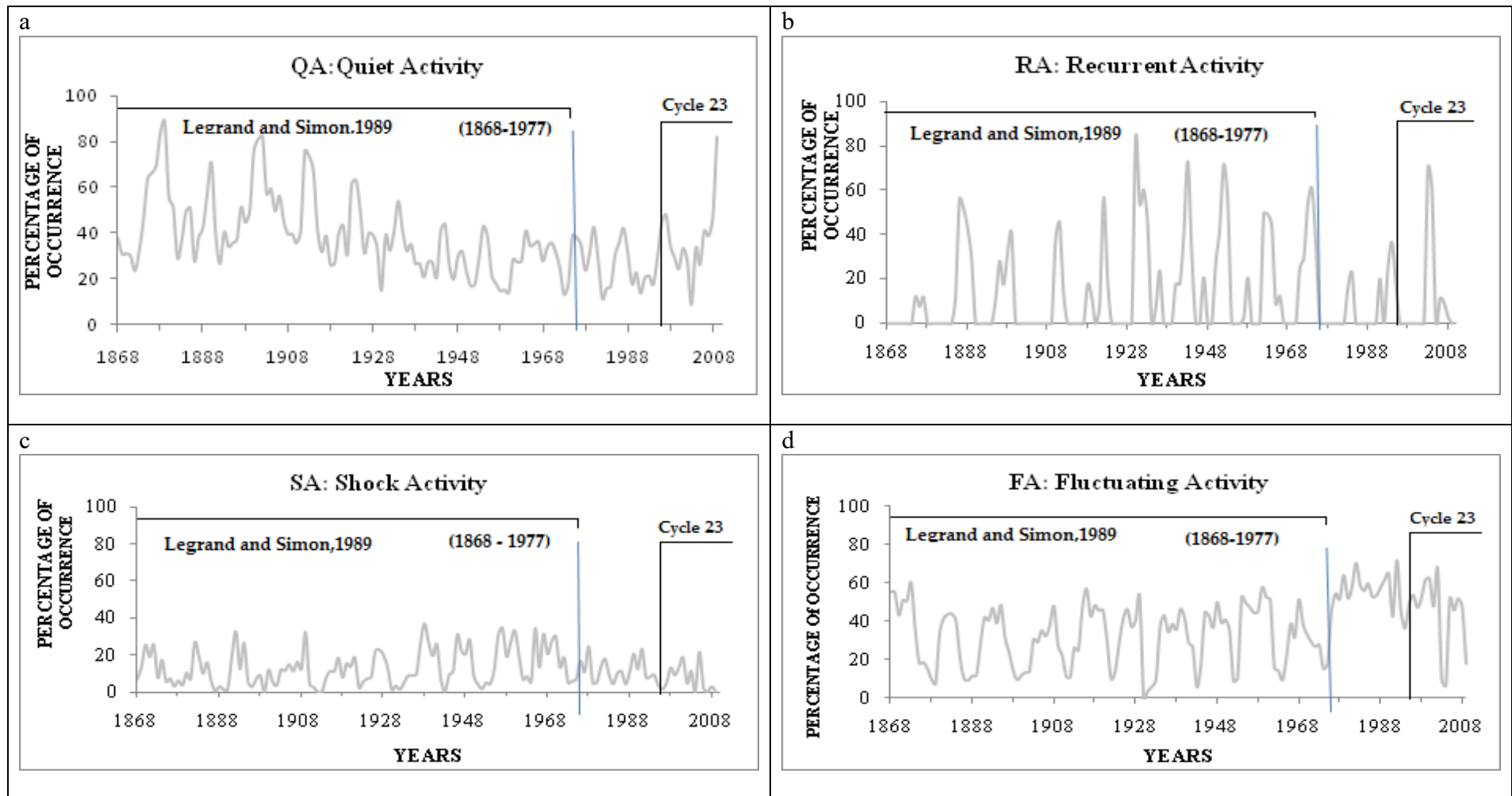


Figure 4. 2: Profils des classes d'activité (a) activité calme, (b) activité récurrente, (c) activité de choc, (d) activité fluctuante

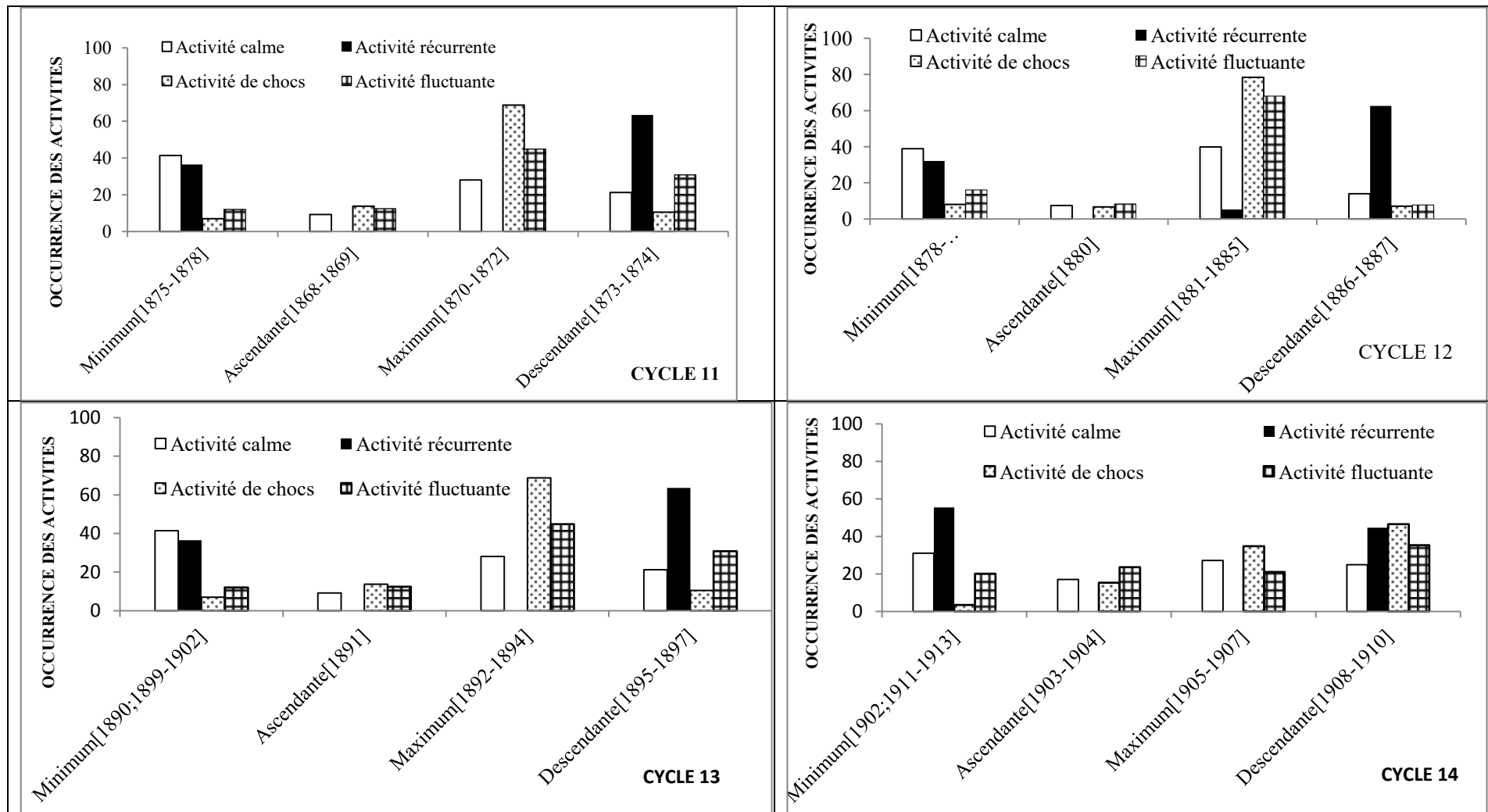


Figure 4.3a : Répartition statistique des classes d'activité par phase de cycle de taches (cycles 11 à 14)

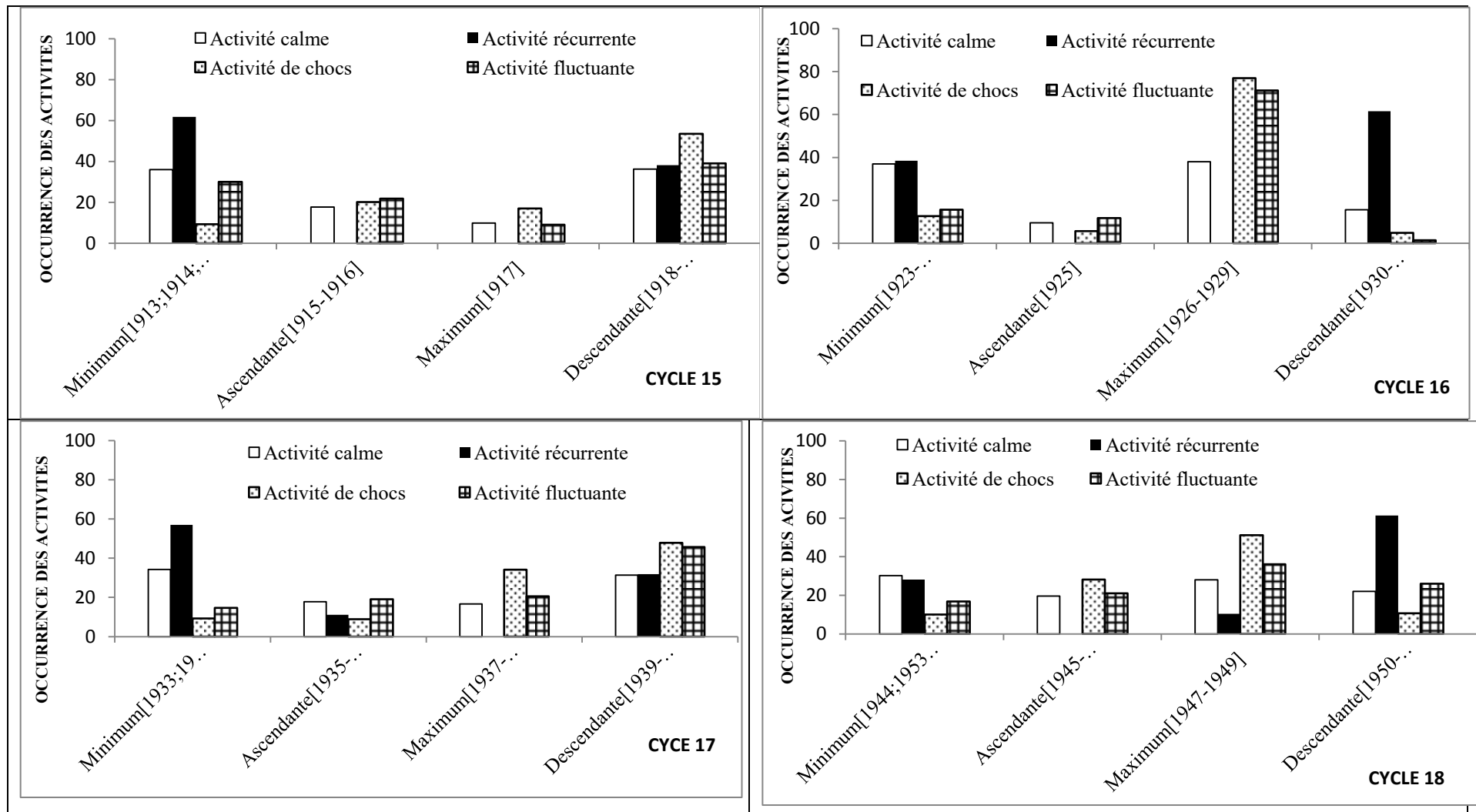


Figure 4.3b : Répartition statistique des classes d'activité par phase de cycle de taches (cycles 15 à 18)

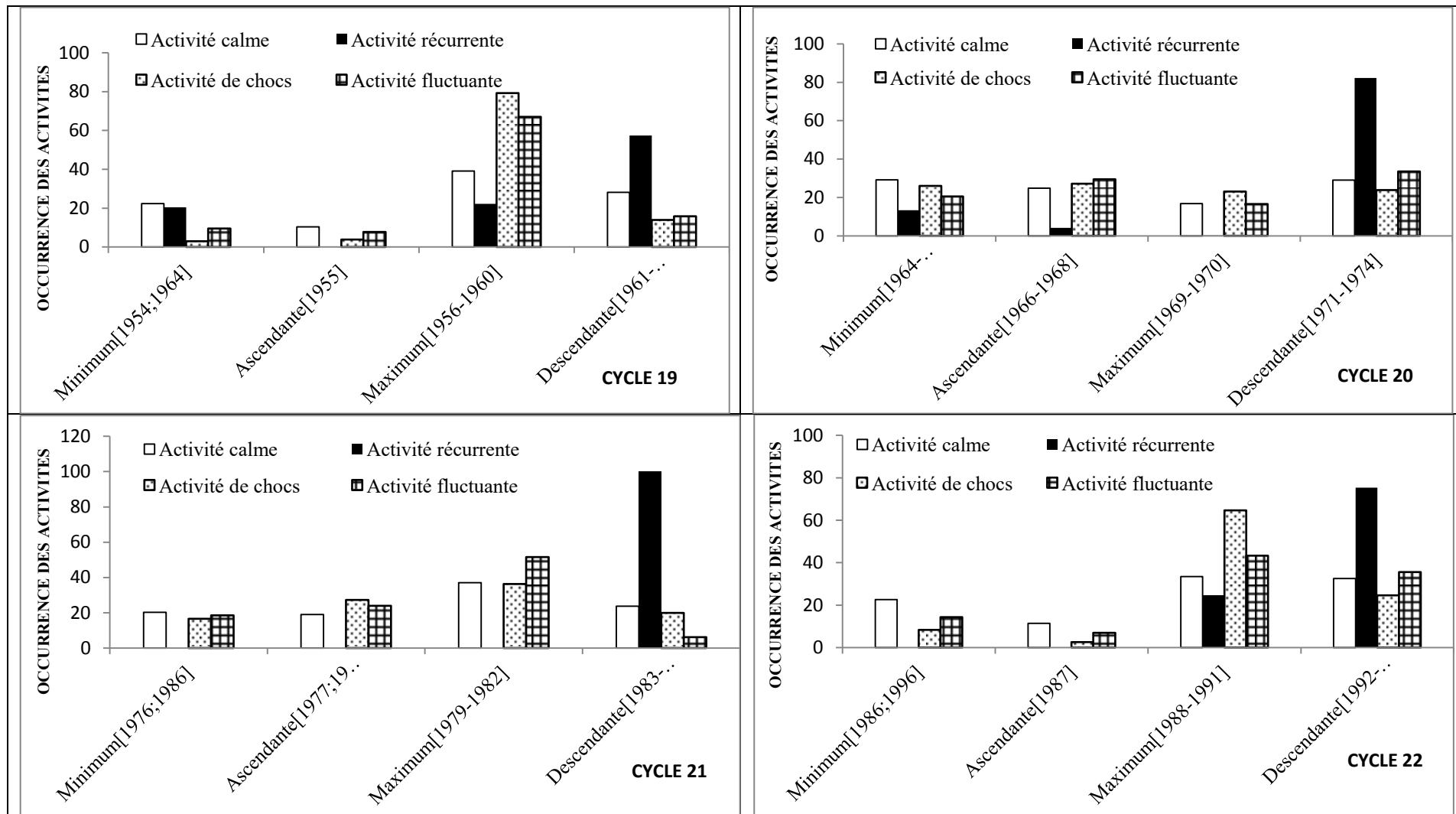


Figure 4.3c : Répartition statistique des classes d'activité par phase de cycle de taches (cycles 19 à 22)

Tableau 4. 1: Fréquence des activités solaires sur un siècle et demi

Maxima des activités	Activité calme	Activité récurrente	Activité de chocs	Activité fluctuante
CYCLE 11	Minimum de phase	Minimum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 12	Minimum de phase	Phase descendante	Phase ascendante	Phase ascendante
CYCLE 13	Minimum de phase	Phase descendante	Ascendante/ Maximum de phase	Phase descendante
CYCLE 14	Minimum de phase	Minimum/Phase descendante	Descendante/Maximum de phase	Phase descendante
CYCLE 15	Minimum/Phase descendante	Minimum de phase	Phase descendante	Phase descendante
CYCLE 16	Minimum/Phase descendante	Phase descendante	Maximum de phase	Phase ascendante
CYCLE 17	Minimum/Phase descendante	Minimum de phase	Phase descendante	Phase descendante
CYCLE 18	Minimum de phase	Descendante /Maximum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 19	Maximum de phase	Descendante/Maximum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 20	Minimum/Phase descendante	Phase descendante	Minimum/ Phase ascendante	Phase ascendante
CYCLE 21	Maximum de phase	Phase descendante	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 22	Maximum/Phase descendante	Descendante/ Maximum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 23	Phase ascendante	Phase descendante	Maximum de phase	Maximum de phase

Tableau 4. 2: Fréquence des activités solaires (Legrand and Simon, 1989)

	Identification in <u>Bartels diagrams</u>	Distribution among the phase of the sunspot cycle	Relationship with sunspot cycle activity
Quiet days	Recurrent patterns of $aa < 20 \text{ nT}$	A nearly constant annual level $\sim 6 \text{ nT}$ A peak in the annual quiet day number at m or $m + 1$	Both the sum(from $m - 4$ to $M + 3$) and the peak of the quiet day numbers are inversely proportional to $R \text{ max}(M)$
Fluctuating activity	Recurrent patterns of disturbed days with a fluctuating level at the time scales of day and of rotation	From m or $m + 1$ to $M + 3$ or later	Sum(during the full cycle) closely correlated to $R \text{ max}(M)$
Recurrent storms (High speed wind stream activity)	Smooth high intensity recurrence patterns of more than 3 rotations	With equinoctial properties from $M + 3$ to m or $m + 1$	Sum(during a 4 yr interval) closely correlated to $R \text{ max}(M)$
		Without any seasonal property from $M + 1$ to $m - 2$	Not any link at all with any sunspot activity
SSC-Storm (Shock event activity)	A series of definite SSC-Storm of short duration (2-3 days) without any recurrence property	Events occurring in any phase Severe storm ($aa < 100 \text{ nT}$) grouped from $M - 1$ to $M + 4$ for 88% of them	“Loose” correlation, if any, of the sum(during a cycle) with $R \text{ max}$

4.3. Cycle solaire 23

Le cycle solaire 23 apparaît, avec ses particularités, comme étant le cycle solaire le plus long de ce dernier siècle. D'une durée moyenne de 13 ans (1996-2009), le cycle 23 se caractérise par une année remarquable (l'année 2003), tant par ses phénomènes majestueux (fortes éruptions solaires en Octobre et Novembre 2003) que par l'intensité de son activité solaire qui se démarque des autres années du cycle par son nombre très réduit de jours calmes (Figure 4.1). Il présente également l'une des années le plus magnétiquement calme depuis 1901 : année 2009 (Figure 4.4). Il est bien connu que les plus grands nombres de taches sont observés au maximum du cycle solaire. Ainsi en plaçant le cycle 23 dans le contexte des phases du cycle des taches comme l'illustre la Figure 4.5, il ressort que l'activité de chocs atteint son niveau maximal en même temps que le maximum de l'évolution du nombre de taches tandis que la plus importante contribution de l'activité récurrente survient au cours de la phase descendante du cycle de taches. Ces résultats témoignent ainsi de l'existence de deux pics dans l'évolution de l'indice géomagnétique Aa au cours d'un cycle solaire. De ce fait, ces résultats mettent en évidence l'existence des deux composantes du champ magnétique solaires : la toroïdale (champ fermé) qui est en phase avec le cycle de taches et la poloïdale (champ ouvert) qui présente un retard sur le cycle de taches (Legrand et Simon, 1991). Le soleil en raison de sa rotation différentielle transforme un champ qui migre d'un pôle à un autre appelé champs poloïdal en un champ intense parallèle à l'équateur appelé champ toroïdal qui est la signature du comportement d'une paire de taches solaires. L'une des propriétés importantes du champ poloïdal est son reversement cyclique qui prend place aux pôles au voisinage du maximum solaire. Aussi de l'analyse de résultats présentés, est-il important de relever que l'activité des jours calmes se produit majoritairement au cours du minimum de phase et que l'activité récurrente atteint sa plus grande proportion au cours de la phase descendante du cycle des taches. La figure 4.6 qui présente les variations long-termes de la somme annuelle de l'activité calme et du

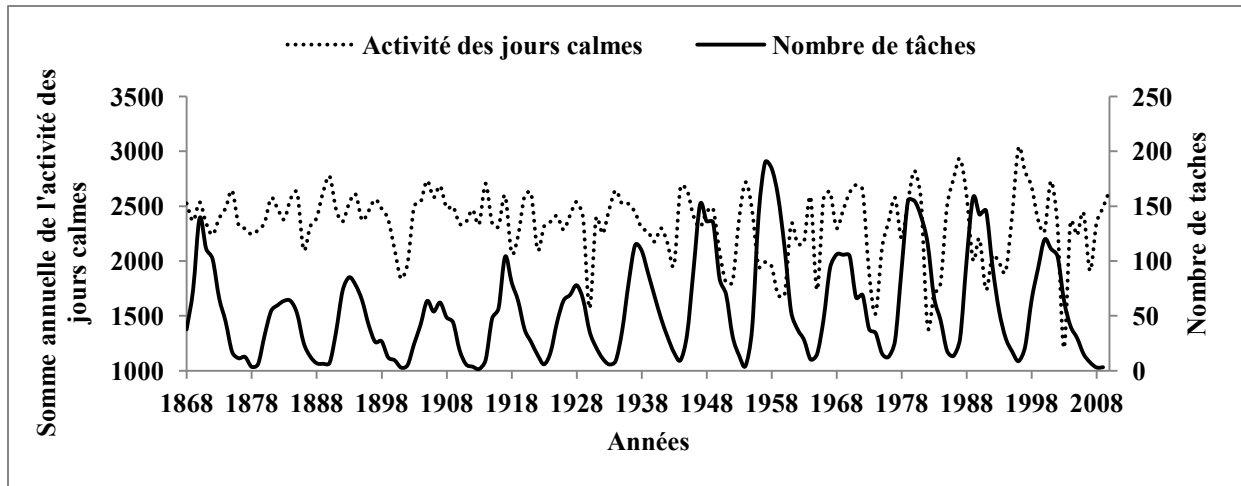


Figure 4. 6 : Variations long-terme de l'activité des jours calmes et du nombre de taches depuis 1868.

4.4. Vers une classification standard de l'activité solaire

Nous avons validé la classification de l'activité géomagnétique faite par Legrand et Simon (1989) dans les paragraphes précédents de ce chapitre et fait une étude statistique de la répartition de la vitesse du vent solaire dans chacune des quatre classes d'activité géomagnétique (activité de calme magnétique, activité récurrente, activité de choc et activité fluctuante). Ces résultats nous ont conduit à envisager un raffinement de la classification de Legrand et Simon (1989) en vue d'en proposer une extension par la prise en compte de l'effet des régions actives et des vents modérés noyés dans les fluctuants.

4.4.1. Critères de classification

Pour atteindre nos objectifs, nous nous sommes inspirés des critères de Legrand et Simon (1989) développés dans le paragraphe 4.1. Il est important de rappeler que pour l'activité de choc, ces auteurs n'ont sélectionné que seulement 43% des orages brusques sous les conditions $A_a > 40$ nT et $V_s > 450$ km/s. De la même façon, seuls les jours de $A_a > 40$ nT ont été pris en considération dans la définition de l'activité récurrente. Pour raffiner la classe de l'activité fluctuante comme suggéré

dans le paragraphe précédent, nous avons analysé des digrammes pixel construit sur 142 ans (1868 à 2009) et extrait trois nouvelles classes définies comme suit :

(a) Activité de co-rotation. Cette classe est définie comme la manifestation des vents solaires, stables en co-rotation et ayant des effets magnétiques modérés au voisinage de l'environnement terrestre. Dans ces conditions l'indice géomagnétique est tel que $20 \text{ nT} \leq Aa < 40 \text{ nT}$. Nous identifions cette classe par les zones de récurrence sans SSC (couleurs jaune et verte sur la Figure 4.7) ;

(b) Activité de nuages magnétiques. Cette activité regroupe les événements de choc engendrant une modification modérée du niveau de l'activité géomagnétique. Les jours sélectionnés sont les dates de SSC dont l'effet dure un à trois jours. Et les Aa correspondants varient de 20 nT à 40 nT (couleurs jaune et verte sur la figure 4.7);

(c) Activité non claire. C'est la classe des événements transitoires et fluctuants qui ne sont pas pris en compte dans les classes précédentes. Nous évaluons son niveau global d'énergie en soustrayant de l'activité fluctuante (Legrand et Simon, 1989) les niveaux d'énergie de la classe de co-rotation et de nuages magnétiques. Ainsi nous obtenons six catégories de classes d'activité géomagnétique que nous analysons dans les paragraphes suivants.

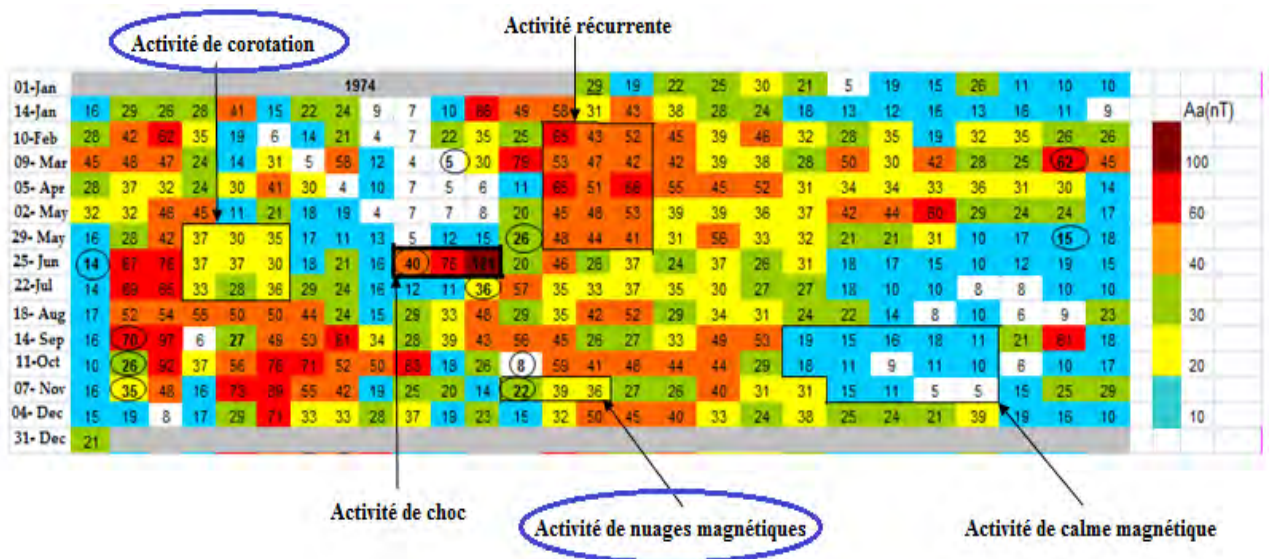


Figure 4. 7 : illustration des deux classes extraites du fluctuant

4.4.2. Résultats

Sur les 142 ans couverts par notre étude, nous avons définie trois nouvelles classes dans le fluctuant (activité de co-rotation, activité de nuages magnétiques et l'activité non claire). Les Figure 4.8 et Figure 4.9 présentent les profils temporels de l'évolution des niveaux annuels de chaque classe d'activité et du nombre de taches de 1868 à 2009. La Figure 4.8a montre que l'activité de calme magnétique a un niveau plus important vers la fin des années 1800 jusqu'au début de 1950 et à la fin du cycle solaire 23(1996-2009). Nous pouvons également remarquer que les jours de calme magnétique évoluent sous la forme d'une sorte de plateau dans la seconde moitié des années 1900. La Figure 4.8b présente l'évolution couplée de l'activité récurrente (Legrand et Simon, 1989) et l'activité de co-rotation. Sur toute la série de données analysées le niveau d'activité récurrente est beaucoup plus important que celui de l'activité de co-rotation. La figure 4.8c présente les profils des activités de choc et de nuages magnétiques. Cette figure montre que les plus importantes contributions des nuages magnétiques à l'activité géomagnétique globale s'observent lorsque l'activité de choc atteint son niveau minimum (cycles solaires 15 et 23). La Figure 4.8d donne une superposition des profils temporels de l'activité fluctuante (Legrand et Simon, 1989) et l'activité non claire. Le gap observé entre ces deux profils s'explique par l'extraction des classes d'activité de co-rotation et de nuages magnétiques de la classe des fluctuants. Les Figure 4.9a et Figure 4.9b superposent le profil du nombre de taches et les profils de l'activité de choc et l'activité de nuages magnétiques respectivement sur la période allant de 1868 à 2009. Il apparaît clairement une bonne corrélation entre ces deux classes d'activité et l'évolution de nombre de taches. La Figure 4.9c montre que les plus importantes contributions de l'activité récurrente s'observent au cours de la phase descendante du cycle solaire. Parallèlement, la Figure 4.9d montre qu'un important niveau d'activité de corotation survient autour du maximum solaire mais les plus importants niveaux sont enregistrés pendant la phase descendante du cycle des taches. La Figure 4.10a et la

Figure 4.10b présentent respectivement les profils des évènements liés aux ondes de choc (activité de choc + activité des nuages magnétiques) et des évènements récurrents (activité récurrente + activité de co-rotation) superposés au profil d'évolution du nombre de taches. Il est intéressant d'observer immédiatement que le maximum de niveau d'évènements de choc survient autour du maximum du cycle des taches solaires et que celui des évènements récurrents est bien plus remarquables au cours de la phase descendant du cycle des taches, phase au cours de laquelle les vents solaires les plus rapides sont enregistrés.

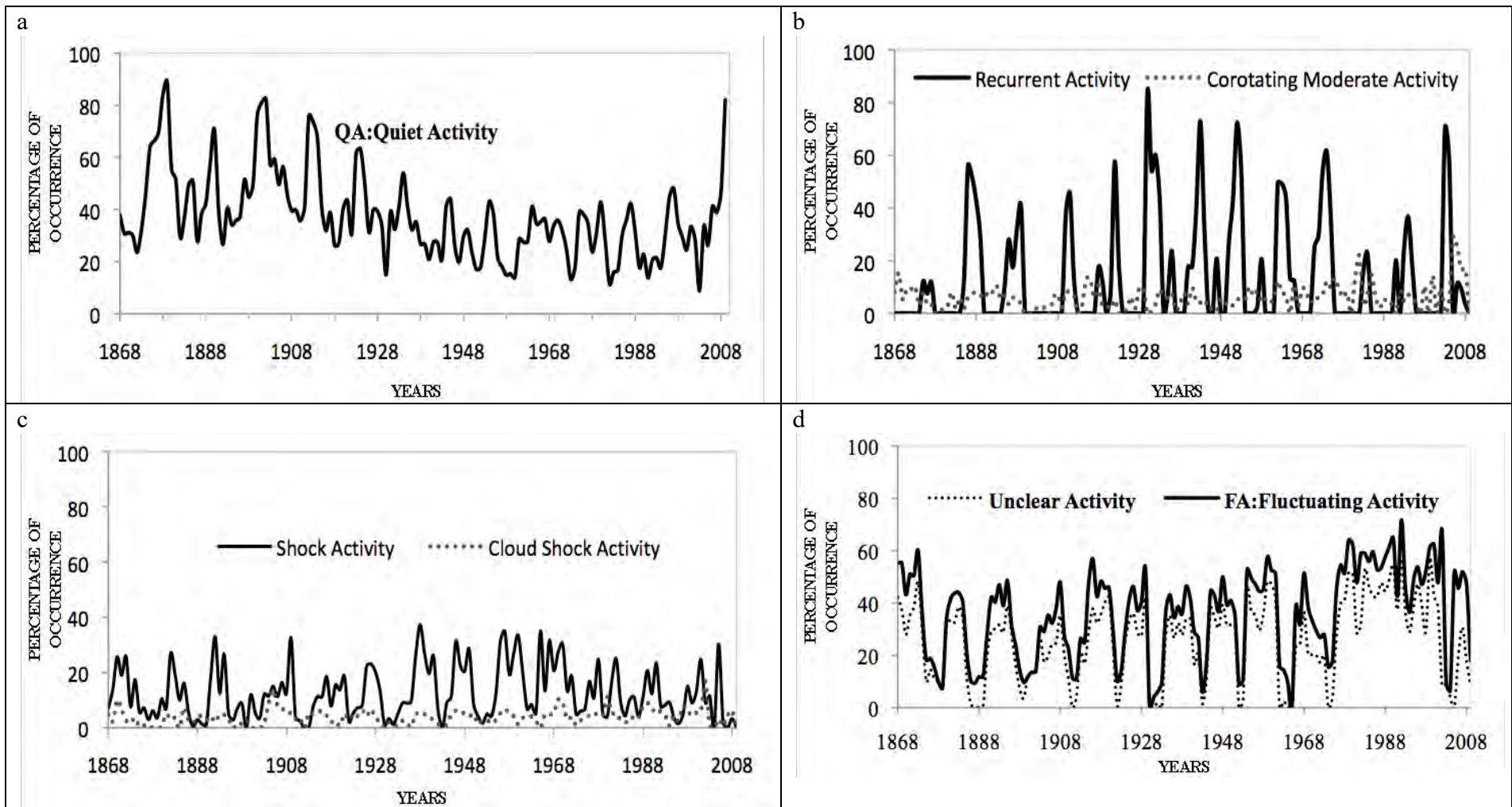


Figure 4. 8 : Variations long terme:(a) calme,(b) récurrente et co-rotation, (c) choc et nuage magnétique,(d) fluctuant et non clair

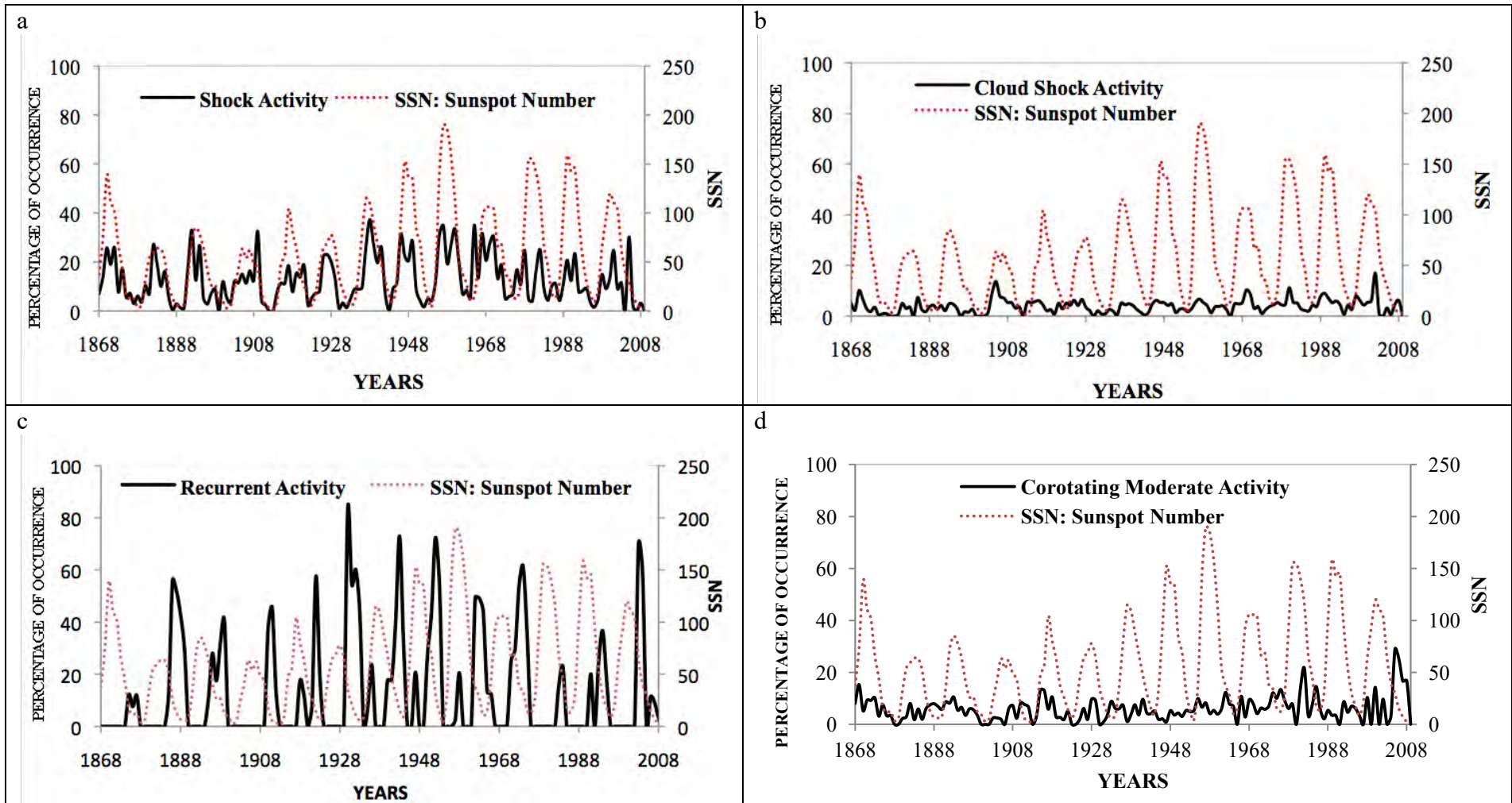


Figure 4. 9 : couplage nombre de taches avec (a) chocs,(b)nuage magnétique, (c)récurrent,(d) co-rotation

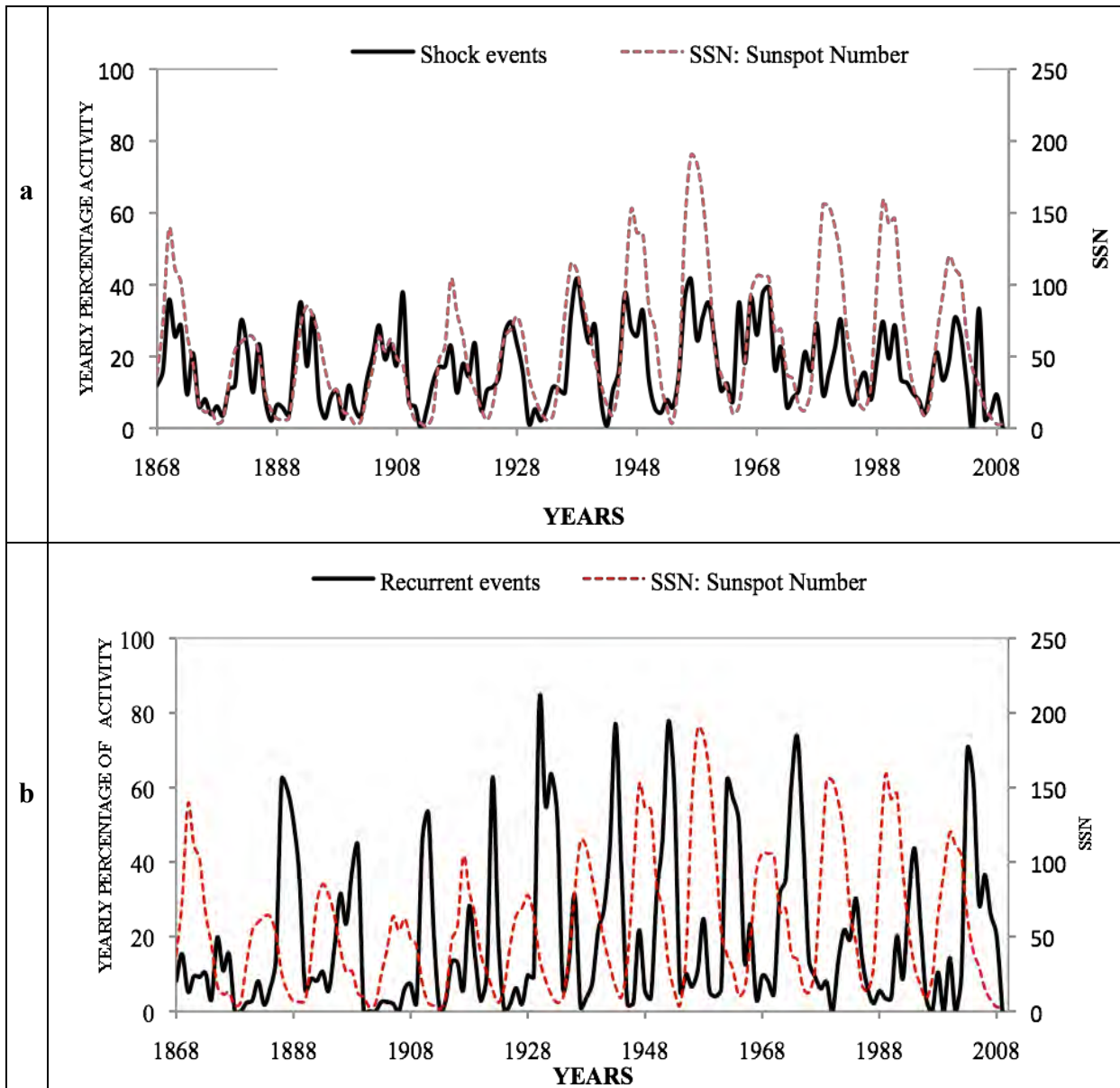


Figure 4. 10 : couplage nombre de taches avec (a)évènement de chocs (b) évènement récurrents

4.4.3. Origine solaire et discussion

L'analyse de la longue série de 142 ans de données, nous a permis de porter à six le nombre de classes d'activité géomagnétique divisée auparavant en quatre types par Legrand et Simon (1989). Cette nouvelle classification qui raffine la classe des fluctuants permet ainsi de sélectionner et de définir ~ 80% de l'activité géomagnétique en comparaison de ~ 60% donnée par la classification proposée par

Legrand et Simon (1989). Quelles sont alors les origines solaires des nouvelles classes (activité de co-rotation et activité des nuages magnétiques) que nous avons extraites de la classe de l'activité fluctuante ? La bonne concordance dans l'évolution des profils de l'activité de chocs et celle des nuages magnétiques sur l'ensemble des cycles de taches étudiés laisse présager que ces types de classes d'activité géomagnétique sont régis par les mêmes mécanismes solaires. Leur différence de niveau d'énergie pourrait s'expliquer par l'importance des éjections de masse coronale responsable de chaque choc. En faisant ensuite une étude statistique de la répartition annuelle des activités de choc et de nuages magnétiques par cycle solaire, nous obtenons dans tous les cas une corrélation $> 0,79$ entre l'activité de choc et l'activité de nuages magnétiques. Nous en déduisons alors que ces deux types d'activité ne sont que des partitions de la contribution d'une même source solaire (ondes de choc) et peuvent à ce titre constituer une et même classes d'activité d'évènements de choc. La Figure 4.9a présente à cet effet le profil long terme de l'activité des évènements de choc qui corrént bien avec l'évolution des taches solaire et fait remarquer que le niveau global d'évènement de choc reste assez constant sur les cycles 11 à 23. Le tableau 4.2, résume l'échelle de classification et de variation de chaque type d'évènements géomagnétiques par phase de cycle suivant l'évolution du nombre de taches solaires. Il en ressort que les évènements récurrents présentent des pics importants quelques années avant le minimum de solaire et quelques fois autour du maximum. Une lecture de la Figure 4.8d montre que l'activité de co-rotation atteint son niveau maximum autour du maximum solaire ou quelques années avant le minimum (phase descendante du cycle de taches). Ce résultat est en accord avec l'occurrence des évènements récurrents résumés dans le tableau 4.2, extrait de Legrand et Simon (1989). De plus une distribution fonctionnelle du niveau de l'activité récurrente (Legrand, 1989) et celui de l'activité de co-rotation donne une corrélation $\geq 0,70$ sur l'ensemble de notre période d'étude (1868 – 2009). Sur la base de ces analyses, il apparaît clairement que les deux classes d'évènements récurrents sont la manifestation des mêmes mécanismes solaires (vents

solaires rapides venant des trous coronaux) et peuvent à ce titre être regroupés en une et même classe d'activité récurrente. Toutes les corrélations sont présentées dans le tableau 4.3. Le tableau 4.4 compare notre nouvelle classification à celle proposée par Legrand et Simon (1989).

Tableau 4. 3: corrélation entre les classes de sources solaires voisines

Cycle solaire	Coefficient de corrélation (SA, CSA)/ Valeurs annuelles	Coefficient de corrélation (RA, CMA)/ Valeurs annuelles
11	0,93	0,86
12	0,82	0,85
13	0,83	0,74
14	0,81	0,94
15	0,80	0,82
16	0,87	0,78
17	0,89	0,70
18	0,82	0,76
19	0,89	0,77
20	0,84	0,75
21	0,80	0,89
22	0,79	0,93
23	0,79	0,72

Tableau 4. 4: Comparaison entre classification de Legrand and Simon(1989) et celle de Zerbo et al. (2012a)

	Legrand et Simon ,1989	Nouvelle classification Extension de RA and SA
Activité des jours calmes	34%	34%
Activité récurrente	14%	26%
Activité de chocs	13%	19%
Activité fluctuante/ Activité « non claire »	39%	21%

4.5. Connexion géomagnétisme et Vent solaire

Les échelles d'étude des variations de l'activité solaire vont de la fraction de seconde à des milliers d'années (cycle de Milankovitch) en passant par la rotation de Bartels (27 jours), les échelles de Onze (11) ans (cycle de taches) et vingt-et-deux (22) ans (cycle de Hale). Les données disponibles pour la vitesse V du vent solaire, le nombre de taches solaire R_z et l'indice géomagnétique A_a sont soit horaires soit tri-horaires. Pour cela, il nous paraît plus approprié de mener nos études soit à l'échelle d'un jour soit à l'échelle de l'année.

4.5.1. Etude statistique

Les données de vent solaire sont disponibles depuis 1962. En nous plaçant dans le contexte de l'activité géomagnétique et de sa classification en quatre classes (Zerbo et al., 2012a) nous étudions la distribution statistique du vent solaire au cours de l'activité des jours calmes, l'activité récurrente, l'activité de chocs et l'activité dite «no claire » ou fluctuante sur l'ensemble des quatre cycles solaires couverts par ces données (cycles 20, 21, 22 et 23). Les Figures 4.11 et 4.12 présentent les valeurs moyennes journalières de l'indice géomagnétique A_a comme une fonction des vitesses du vent solaire V et les histogrammes de distributions des vitesses du vent solaire durant les périodes de calme magnétique pour les cycles solaires 20, 21, 22 et 23. Quant aux figures 4.13 et 4.14, elles représentent les phénomènes géomagnétiques et le vent solaire pour des périodes d'activité récurrente. De la même façon, les figures 4.15 et 4.16 montrent le lien entre le géomagnétisme et le vent solaire pour les périodes d'activité de chocs. Comme les figures précédentes, les figures 4.17 et 4.18 présentent respectivement la répartition distribution statistique du vent solaire au cours de l'activité fluctuante. L'analyse de toutes ces figures présentant l'indice géomagnétique A_a en fonction des vitesses du vent solaire montre

clairement qu'il n'existe aucune corrélation linéaire entre les vitesses du vent solaire et l'indice Aa pour des valeurs moyennes journalières. Ce qui voudrait donc signifier que chaque catégorie de Aa n'est pas directement lié au vitesse du vent solaire. Toutefois, il émane des figures 4.11 à 4.18 des statistiques et conditions solaires importants sur le vent solaire pour les quatre cycles solaires couverts par les données du vent:

-La figure 4.12 montre qu'au moins 77% des vitesses de vent solaires soufflant au cours de l'activité des jours calmes sont inférieures à 450 km/s. Ce résultat est en accord avec les travaux de Legrand et Simon (1989) et Zerbo et al. (2012a) dans lesquels la limite des vitesses du vent solaire est fixée pour caractériser le période de calme magnétique.

-Pour l'activité récurrente, la Figure 4.14 indique que 78% à 98% des vents observés au cours de cette activité ont une vitesse supérieure à 450 km/s.

-59-61% des vitesses de vents solaires qui surviennent au cours de l'activité de chocs sont supérieures à 450 km/s (Figure 4.16).

-Enfin, les Figures montrent que, dans le cas de l'activité non claire, 59-70% des vitesses de vents observés sont supérieures à 450 km/s.

Les trois dernières activités (récurrent, choc et activité non claire) correspondent au groupe au groupe des jours magnétiquement perturbés (Legrand et Simon, 1989 ; Zerbo et al., 2012a) et caractérisé par des vitesses de vent solaires majoritairement supérieures à 450 km/s. Ces statistiques montrent que chaque type de vent solaire est caractéristique d'un type d'activité solaire et renseigne du même coup sur les variabilités du soleil établissant ainsi un lien étroit entre le vent solaire et les évènements géomagnétiques.

Notre étude statistique fait ressortir de remarquables conditions sur la distribution du vent solaire dans les quatre classes d'activité géomagnétique : (1) pour la classe de l'activité de calme magnétique, 95% des vitesses de vent solaire sont de l'ordre de 399 ± 69 km/s, (2) dans la classe de l'activité récurrente, 95% des vitesses du vent solaire valent 582 ± 110 km/s, (3) pour la classes de chocs, 95% des vitesses du vent

sont de l'ordre de 482 ± 101 km/s, et (4) 95% des vitesses du vent solaire présentent une valeur de l'ordre de 480 ± 85 km/s dans la classe des fluctuations magnétiques. Le tableau 4.5 résume l'ordre de grandeur moyenne des vitesses du vent solaire par classe d'activité tiré de notre étude statistique.

Cette étude qui donne une amplitude moyenne des variations de vitesses pour chaque classe d'activité géomagnétique est capitale et prouve les faits suivants :

- l'activité de périodes de calme magnétique est l'effet des vents solaires lents ;
- l'activité récurrente est la manifestation des vents solaires rapides provenant des trous coronaux;
- des vents solaires rapides et modérés sont observés au cours de l'activité de choc. Ce qui signifie que cette classe d'activité n'est pas régie par le vent solaire, mais correspond plutôt à la contribution des ondes de choc.

En dehors de la classe de l'activité fluctuante, les distributions des vitesses du vent solaire dans chacune des trois autres classes d'activité géomagnétique sont remarquablement semblables. Ainsi, le caractère calme, récurrent ou choc ne change pas énormément d'un cycle solaire à un autre.

D'autres résultats stupéfiants de cette statistique sont :

- près de 80% des vitesses du vent solaire $V < 450$ km/s contribuent à la classe d'activité de calme magnétique ;
- environ 80% des vitesses du vent solaire $V > 450$ km/s font parties de la classe de l'activité récurrente;
- l'activité de chocs et l'activité non claire sont semblable dans leurs proportion de vitesses de vent solaire, avec $\sim 60\%$ de $V > 450$ km/s.

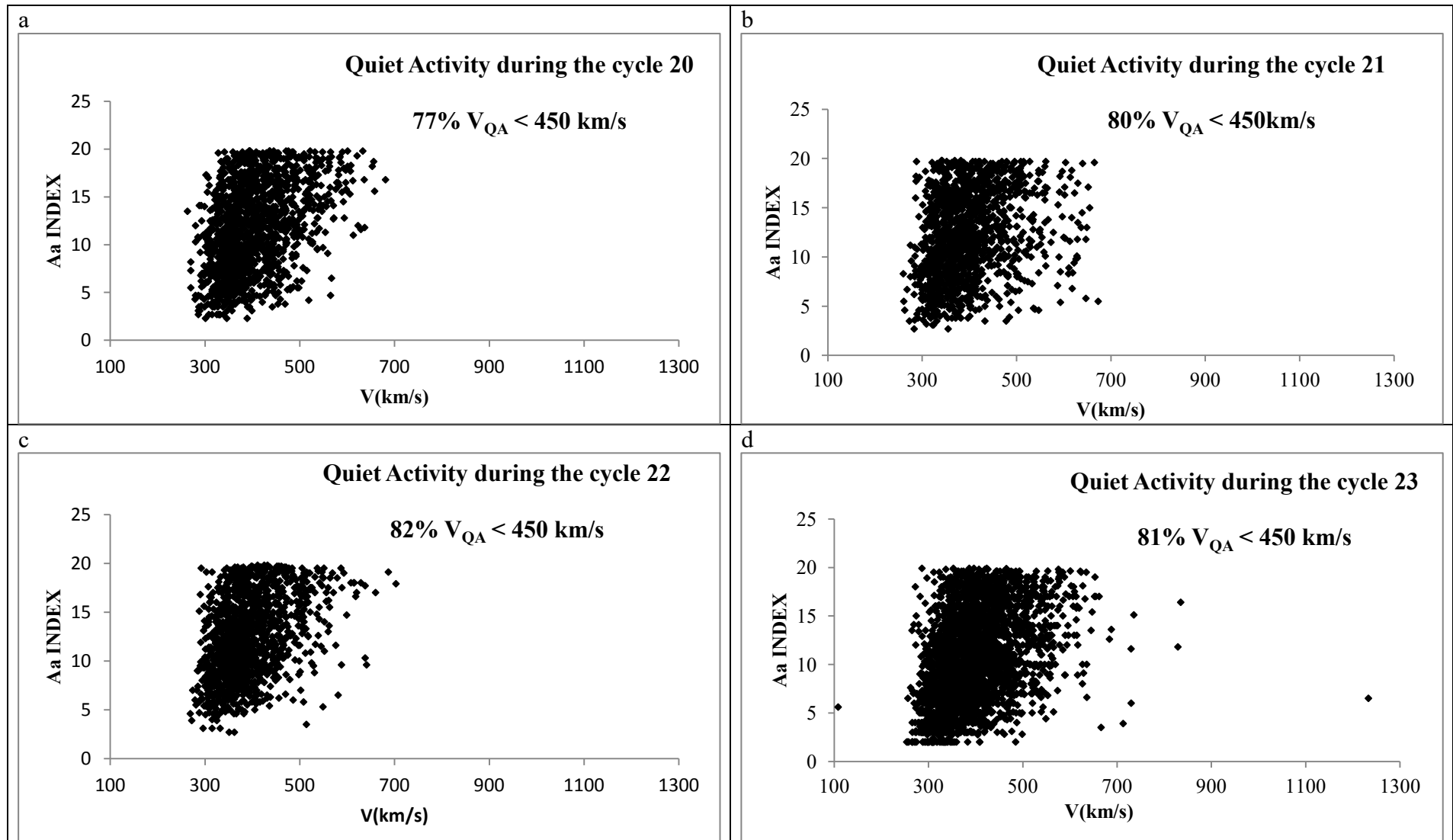


Figure 4.11: Distribution du vent solaire dans la classe de calme magnétique

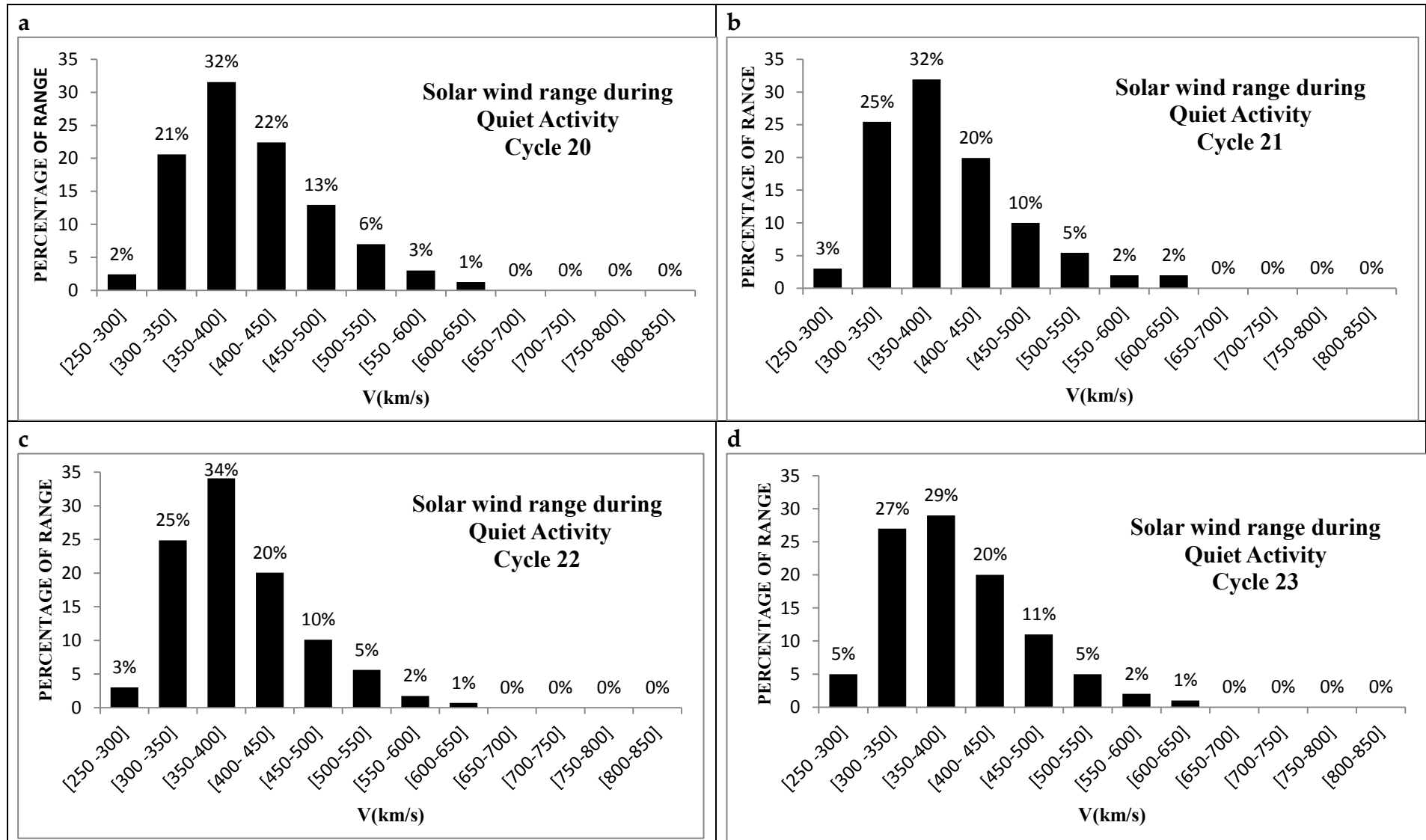


Figure 4.12 : Histogramme de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité de calme magnétique

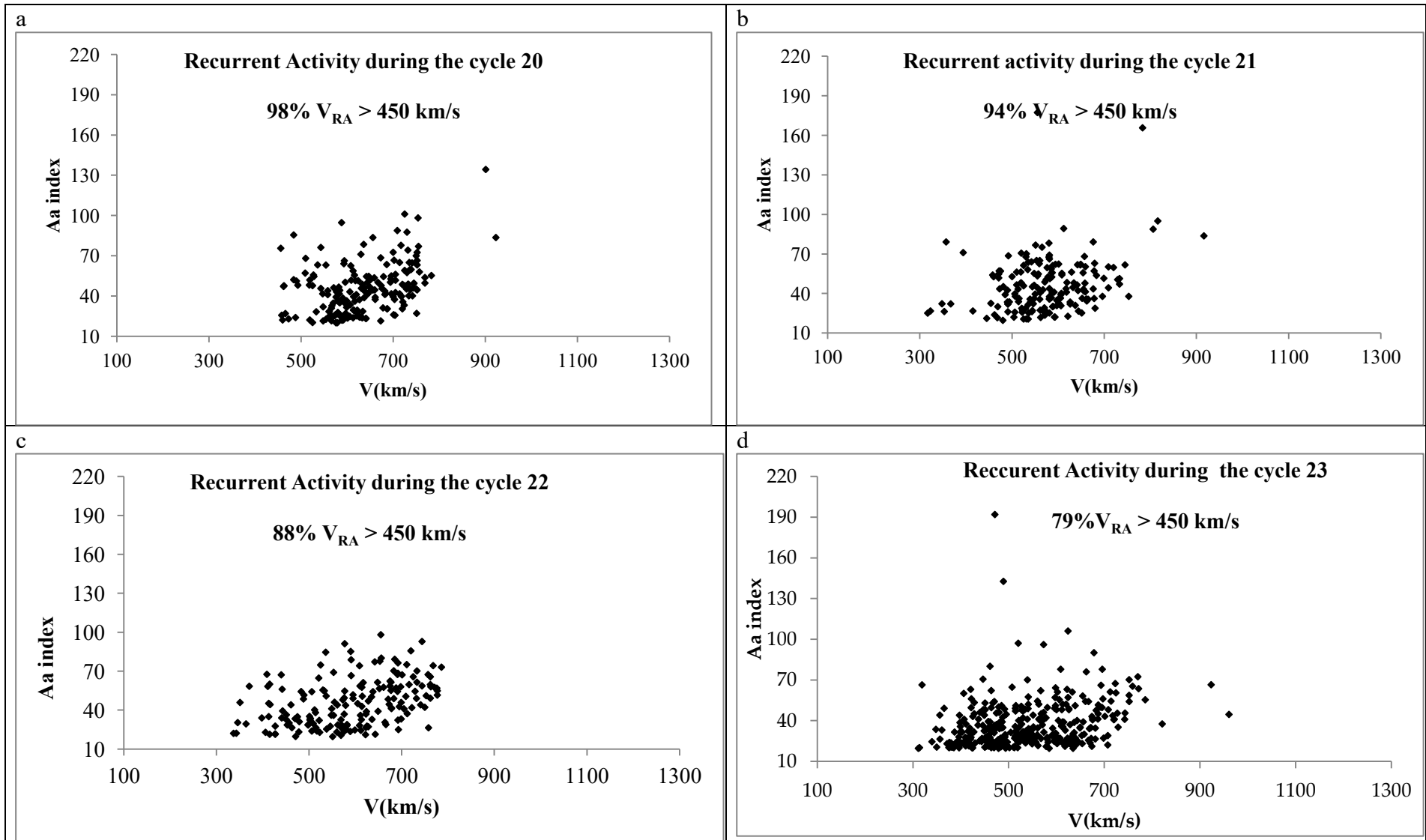


Figure 4.13: Distribution du vent solaire dans la classe de l'activité récurrente

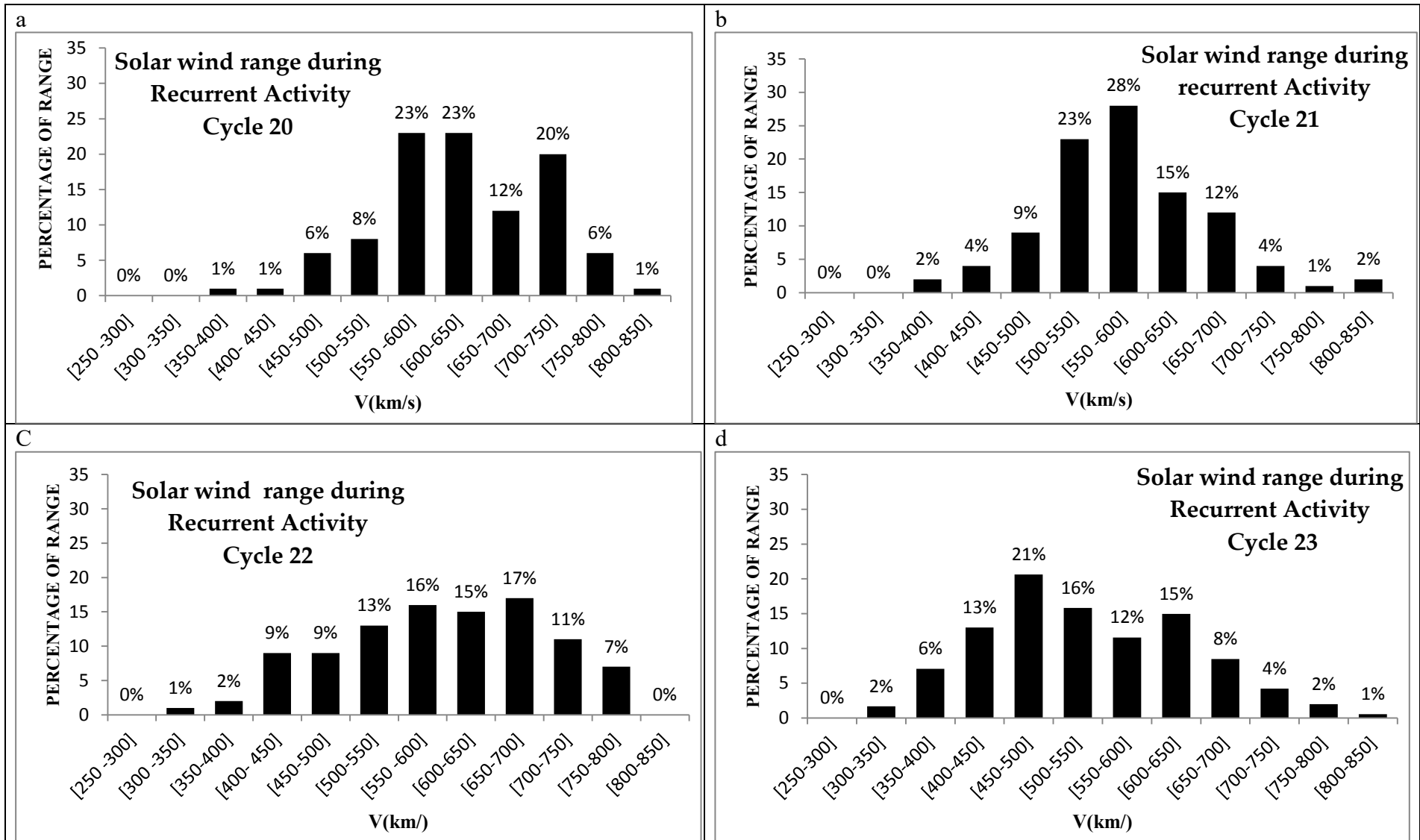


Figure 4. 14 : Pourcentage de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité récurrente

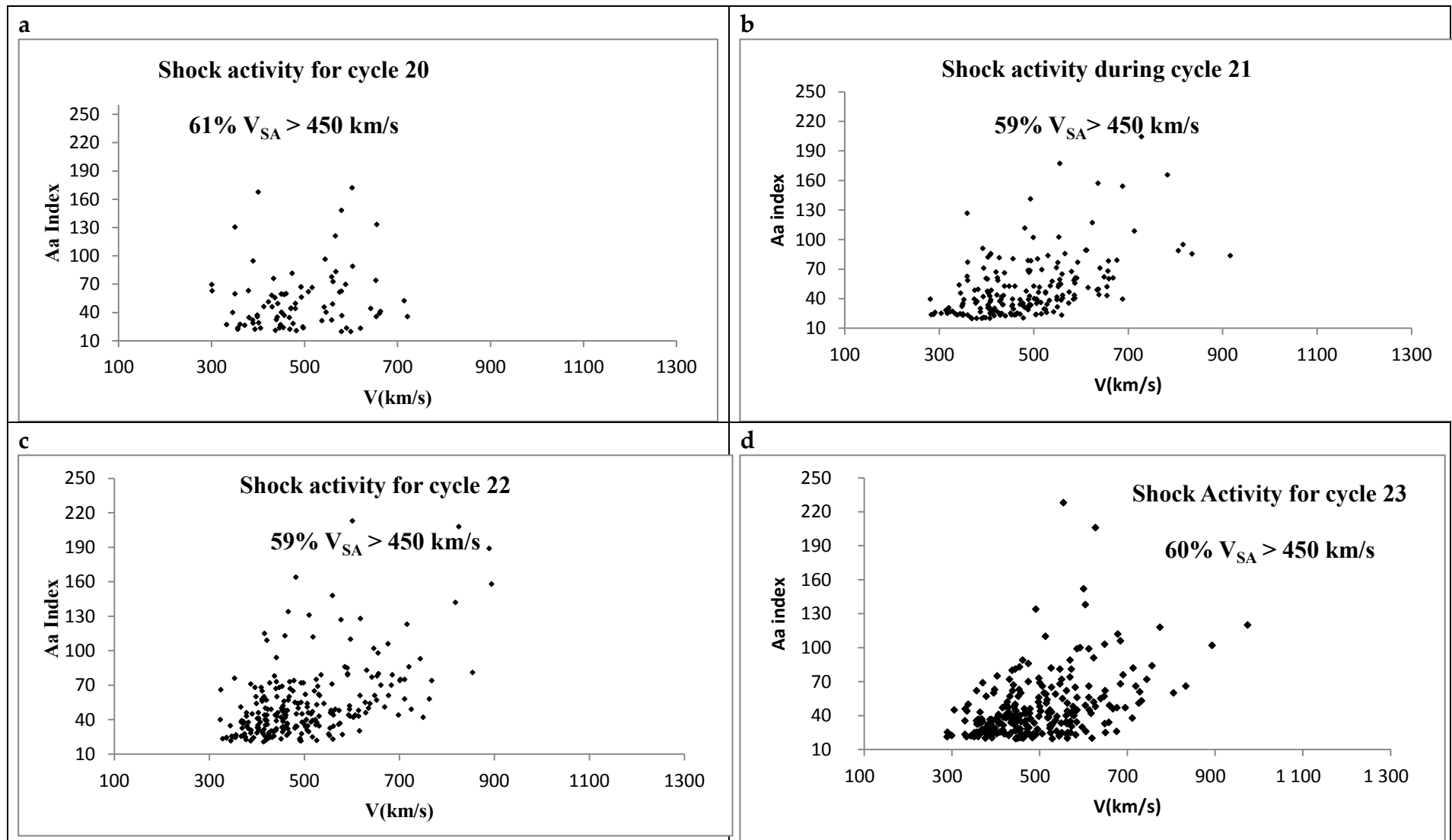


Figure 4. 15 : Distribution du vent solaire dans la classe de l'activité de choc

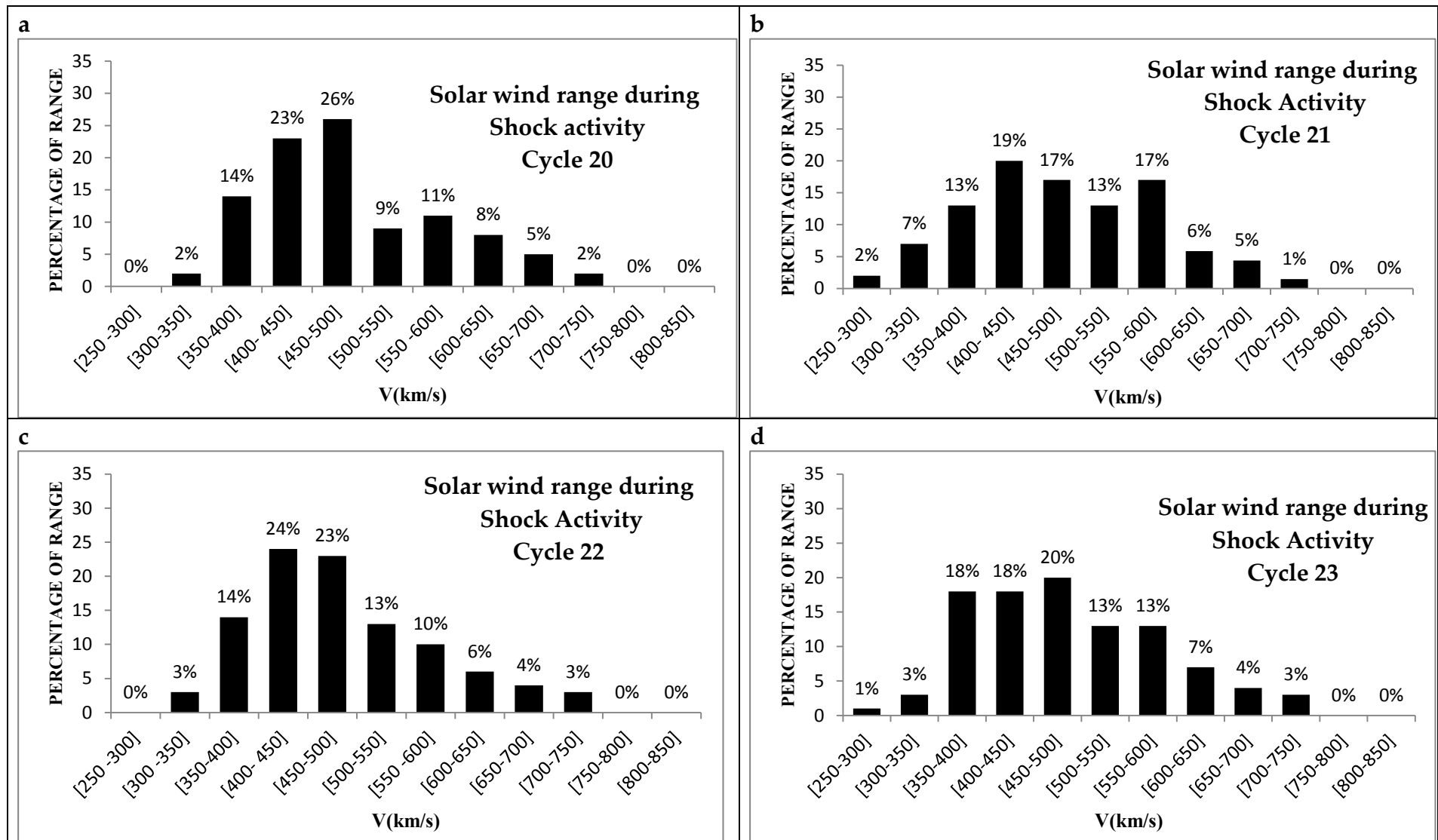


Figure 4. 16 : Pourcentage de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité de choc

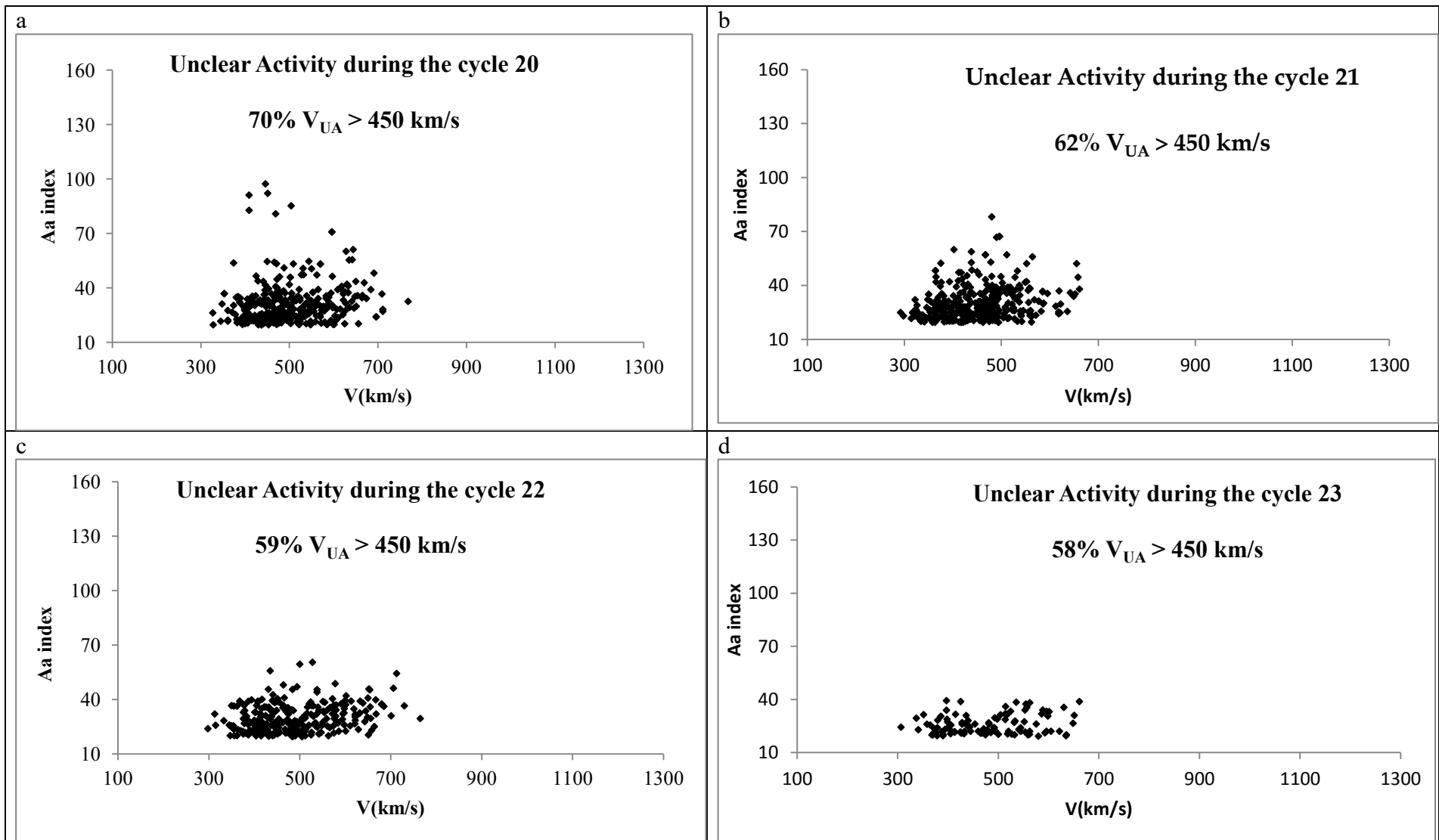


Figure 4.17 : Distribution du vent solaire dans la classe de l'activité non claire

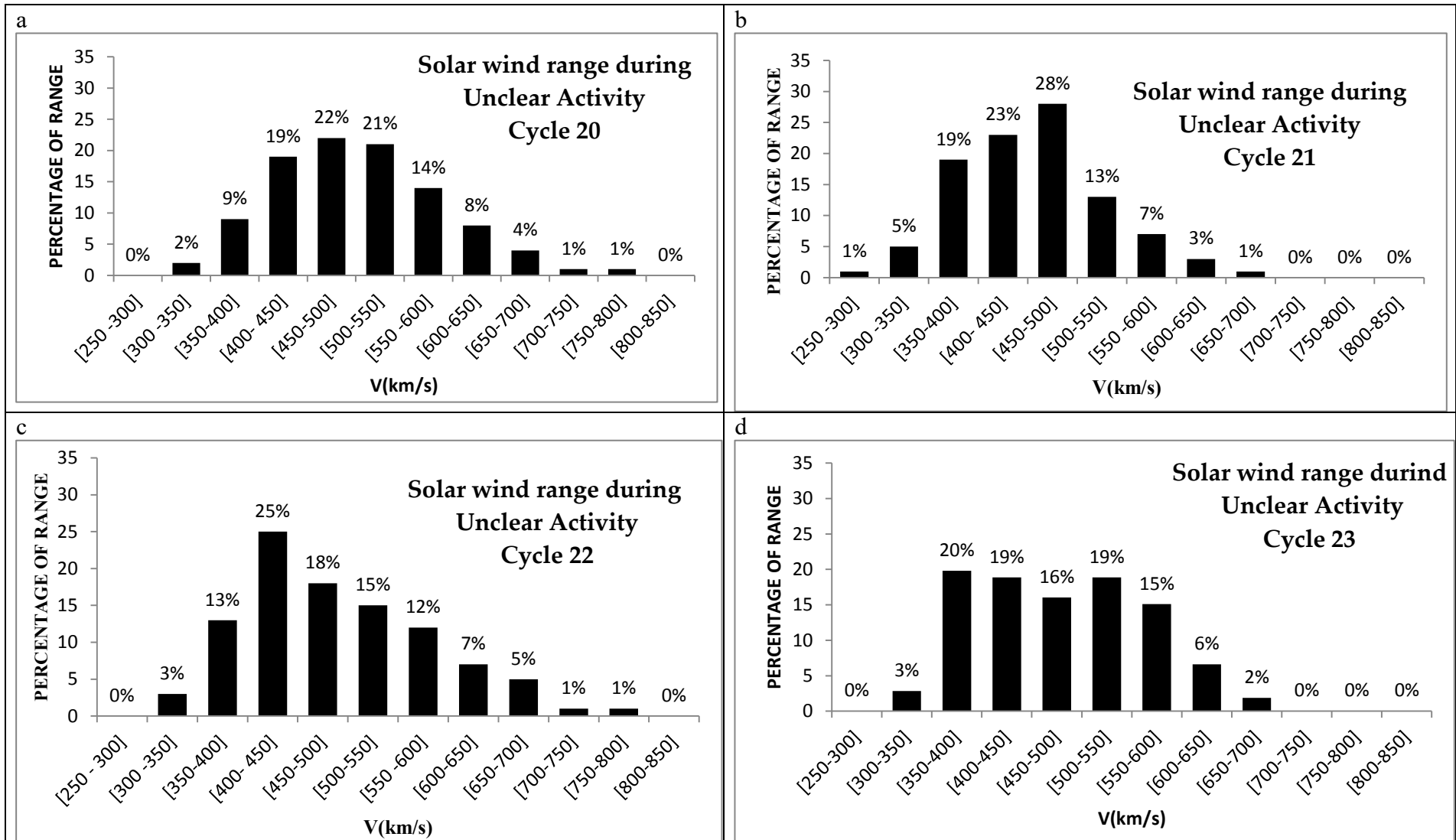


Figure 4. 18: Pourcentage de répartition des vitesses du vent solaire dans la classe de l'activité non claire

Tableau 4. 5: Ordre de grandeur moyenne des conditions moyennes sur le vent solaire dans les quatre classes d'activité géomagnétique.

	Conditions sur le vent solaire
Activité des jours calmes (QA)	330 km/s à 468 km/s
Activité récurrente (RA)	472 km/s à 682 km/s
Activité de chocs (SA)	381 km/s à 582 km/s
Activité non claire (UA)	395 km/s à 565 km/s

Conclusion

L'analyse des longues séries de données disponibles depuis 1868 pour les indices géomagnétique Aa et depuis 1962 pour les données du vent solaire nous a permis :

- (1) de valider la subdivision du géomagnétisme en quatre classe d'activité géomagnétique faite par Legrand et Simon (1989): activité des jours calmes, activité récurrente, activité de chocs et activité fluctuante;
- (2) de montrer que les différentes classes d'activité géomagnétique présentent des contributions variables au cours du cycle solaire et que le cycle 23 est remarquable en ses niveaux d'activité;
- (3) de comprendre que dans le contexte du cycle de taches solaires, les différentes classes d'activité ont des occurrences différentes à travers les phases du cycle de

taches. L'activité de jours calmes se produit majoritairement au cours du minimum de phase, l'activité de chocs est générée au maximum de phase et enfin l'activité récurrente est observée en phase décroissante soit 2 à 3 ans avant le minimum du cycle de tache suivant.

L'importante proportion de l'activité fluctuante dans la classification de Legrand et Simon (1989) nous a inspiré la nécessité de scruter davantage la connexion vent solaire-géomagnétisme en vue de proposer une extension des conditions de classification de l'activité géomagnétique. Ainsi, sur la bases de manifestations physique et de nouvelles conditions sur les indices géomagnétique Aa (Zerbo et al., 2012a), nous avons raffiné l'étude des relations Soleil-Terre en proposant une nouvelle classification : (1) activité de calme magnétique , avec $Aa < 20$ nT ; (2) activité des évènements récurrents ; (3) activité des évènements de choc et (4) l'activité « non claire ». Les trois dernières classes constituent le groupe des jours magnétiquement perturbés ($Aa \geq 20$ nT). Cette extension de la classification de l'activité géomagnétique permet d'identifier clairement de nos jours ~ 80% de l'activité solaire en comparaison de 60% proposé en 1989.

Nous avons ensuite fait une étude de distribution des vitesses du vent solaire qui nous a conduits à des résultats remarquables :

- près de 80% des vitesses du vent solaire $V < 450$ km/s sont observées dans la classe d'activité de calme magnétique;
- environ 80% des vitesses du vent solaire $V > 450$ km/s font parties de la classe de l'activité récurrente;
- l'activité de chocs et l'activité non claire sont semblables dans leurs proportion de vitesses de vent solaire, avec ~ 60% de $V > 450$ km/s.

La statistique montre à quel point les distributions du vent solaire sont similaire pour les quatre cycles (Cycles 20, 21, 22 et 23) couverts par les données archivées. Ce résultat montre clairement que le processus physique d'accélération des vents solaires lents ne change pas même si le flux solaire décroît.

Article: Zerbo et al, 2011

Solar cycle 23 and geomagnetic activity since 1868

Zerbo J-L., Ouattara F., Zoundi C., Gyebéré A.

Rev.CAMES-Série A 12(2) :255-262



Cycle solaire 23 et activité géomagnétique depuis 1868

SOLAR CYCLE 23 AND GEOMAGNETIC ACTIVITY SINCE 1868

ZERBO J-L.¹, OUATTARA F.², ZOUNDI C.³, GYEBRE A.³

1- Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso.

2- Ecole Normale Supérieure de l'Université de Koudougou, BP 376, Burkina Faso.

3- Direction régionale de l'enseignement secondaire du plateau centrale, Ziniaré, Burkina Faso.

*Auteur correspondant, Email : fojals@yahoo.fr

RESUME

Cet article s'intéresse à l'étude et à la distribution de l'activité solaire suivant les phases du nombre de taches. L'étude faite sur les treize derniers cycles (cycle 11 au cycle 23) grâce à l'analyse d'une longue série de données géomagnétiques aa et du nombre de taches montre que l'importance de l'activité solaire varie d'une phase à une autre. L'activité des jours calmes est prépondérante au minimum de phase pendant que l'activité de choc est maximale au maximum de phase. L'activité récurrente due aux vents rapides issus des trous coronaux présente son maximum au cours de la phase descendante du cycle des taches et montre l'existence de la seconde composante (champ poloidal) du champ magnétique solaire. Ces résultats révèlent également que l'activité des jours calmes se produit majoritairement au cours du minimum de l'activité tachée et que l'activité récurrente atteint sa plus grande proportion au cours de la phase descendante du cycle des taches.

©2011 CRUFAOCI Tous droits réservés.

Mot clés : cycle solaire, taches, activité géomagnétique.

ABSTRACT

This article is interested in the study and in the casting of the solar activity following the phases of the sunspot number. The study made on the last thirteen cycles (from cycle 11 to cycle 23) by the analysis of long series of geomagnetic data aa and the number of wolf shows that the solar activity has a variable distribution per sunspot cycle phase. The activity of quiet days is dominating at least of phase while the activity of shock is maximal at sunspot cycle maximum phase. The recurrent activity due to the fast winds stemming from coronal holes presents its maximum during the declining phase of the sunspot cycle and show the existence of the second component (poloidal field) of the solar magnetic field. These results show that the most important contribution of quiet activity occurs around the minimum phase and that recurrent activity is more significant on the declining phase of sunspot cycle.

©2011 CRUFAOCI All rights reserved.

Keywords: solar cycle, sunspot, geomagnetic activity.

INTRODUCTION

Les taches sombres sur le disque solaire, qui sont parfois visibles à l'œil nu, et les aurores sont les manifestations les plus immédiatement visibles de l'activité solaire. On sait depuis plus d'un siècle que cette activité se déroule suivant un cycle de périodicité assez régulière, voisine de onze ans et dont l'intensité est assez variable. Pour mieux appréhender les variabilités de notre étoile, de nombreuses études sont effectuées afin d'associer à chaque variation transitoire du champ magnétique terrestre un événement qui traduirait une réponse à l'activité solaire : apparition de taches, CME's (Ejection de masse coronale), SSC (Commencement Brusque d'Orage). Ces tentatives d'identifier les sources solaires de l'activité géomagnétique ont été basées sur des recherches de coïncidences et l'analyse de longue série de données géomagnétiques et solaires actuellement disponibles. Les travaux les plus connus sont ceux de Legrand et Simon (1989), Simon et Legrand (1989) Richardson et al. (2000), Richardson et Cane (2002), Ouattara et al., (2009), Du ZL (2011). C'est ainsi que pour la première fois l'activité solaire fut organisée en quatre classes d'activité géomagnétique (activité calme, activité récurrente, activité de chocs et activité fluctuante) par Legrand et Simon (1989). Pour déterminer les quatre

classes de 1868 à 1978, Legrand et Simon (1989) ont utilisé un diagramme construit à partir des données d'indice géomagnétique aa calculées par Mayaud, (1973).

Pour le cycle solaire 23 (1996-2009), notre objectif est d'identifier ces quatre classes d'activité en utilisant le diagramme pixel qui représente les données géomagnétiques comme fonction de l'activité solaire pour chaque rotation de Bartels (27 jours) en vue de rendre compte de la géoeffektivité des événements solaires. Ensuite nous placerons ce cycle dans un cadre général par une étude depuis 1868.

TRAVAUX ANTERIEURS

Mayaud (1971) a calculé l'indice géomagnétique aa (ou indice antipodal) afin de mesurer la perturbation du champ magnétique terrestre par celui du soleil. Cet indice reflète ainsi le champ magnétique et l'intensité de l'énergie totale émis par notre étoile. Depuis lors de nombreux travaux sont effectués sur ces variations en vue de comprendre l'activité solaire. Ainsi Svalgaard (1977) étudie et établit une étroite corrélation entre les vitesses du vent solaire (flot de particules solaires) et l'indice géomagnétique aa. Cette corrélation a permis à Legrand et Simon (1989) de proposer pour la première fois une classification de l'activité géomagnétique en quatre types (calme, récurrent, choc et

ZERBO J-L. et al. / CAMES-Série A, 12 (2) : 255-262, 2011

fluctuant). Les suites les plus récentes des ces travaux sont les études faites par Ouattara et Amory-Mazaudier (2009) ainsi que celles faites par Du (2011). L'indentification des différentes activités géomagnétiques est faite sur la base d'une plage de données de l'indice aa disposée sous forme de tableaux de 27 colonnes où chaque ligne représente une rotation solaire.

Par ailleurs, il faut noter que Richardson et al., (2002) et Richardson et cane (2002) ont aussi réussi à classifier l'activité géomagnétique en utilisant les données in situ de vent solaire. Ils ont obtenu également quatre types d'activité (calme, récurrente, choc et non clair). Ouattara et Amory Mazaudier (2009) ont montré que la répartition temporelle des quatre types d'activité de Legrand et Simon (1989) et celle de Richardson et al., (2002) étaient les mêmes validant ainsi la méthode implicite basée sur la relation linéaire entre aa et vent solaire établie par Svalgaard (1977) et la méthode explicite basée sur les mesures in situ de vent solaire.

Le présent travail s'appuiera sur l'ensemble des travaux antérieurs de Legrand et Simon (1989), de Simon et Legrand (1989) et de Ouattara et Amory Mazaudier (2009).

DONNEES ET METHODES

Données

Les données utilisées dans cet article sont : (1) les dates de début brusque d'orages (SSC) pour l'identification des jours de chocs dus aux CMEs (<http://isgi.latmos.ipsl.fr/>), (2) les valeurs moyennes journalières de vitesses du vent solaire qui résultent des compilations normalisées de mesures faites à bord de plusieurs satellites (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>), (3) les valeurs moyennes journalières des indices

géomagnétiques aa et (4) le nombre de Wolf ou nombre de taches (Rz) tous deux obtenus sur National Geophysical Data Centre. Les nombres de taches serviront à déterminer les phases par cycle solaire.

Méthodes

Legrand et Simon (1989) ont basé leurs analyses des données géomagnétiques sur deux faits essentiels, pour élaborer la classification de l'activité géomagnétique:

- 1) La contribution des ondes de choc à l'activité géomagnétique connue aujourd'hui sous le nom d'activité de choc.
- 2) L'étroite corrélation entre l'indice aa (Mayaud, 1971, 1972, 1973, 1980) et le vent solaire (Svalgaard, 1977). Cette corrélation permet de classifier le vent solaire en trois types : les vents lents, les vents fluctuants et les vents rapides. Chaque type est responsable d'une classe d'activité. Ainsi nous obtenons : (1) l'activité des jours calmes, (2) l'activité récurrente, (3) l'activité de choc et (4) l'activité fluctuante.

(1) L'activité des jours calmes correspond aux jours d'indice aa < 20 nT (couleurs blanche et bleue sur la Figure 1) avec une vitesse des vents solaires inférieure à 450 km/s. Les trois autres classes forment le groupe des jours perturbés (activité récurrente, activité de chocs et activité fluctuante) caractérisé par des indices aa ≥ 20 nT. On les distingue comme suit :

(2) L'activité récurrente. Elle est provoquée par les vents solaires rapides issus des trous de la couronne solaire et s'étendant sur une ou plusieurs rotations de Bartels sans orage. Cette classe correspond aux jours d'indice aa supérieur à 40 nT. Un exemple est donné sur la figure 1.

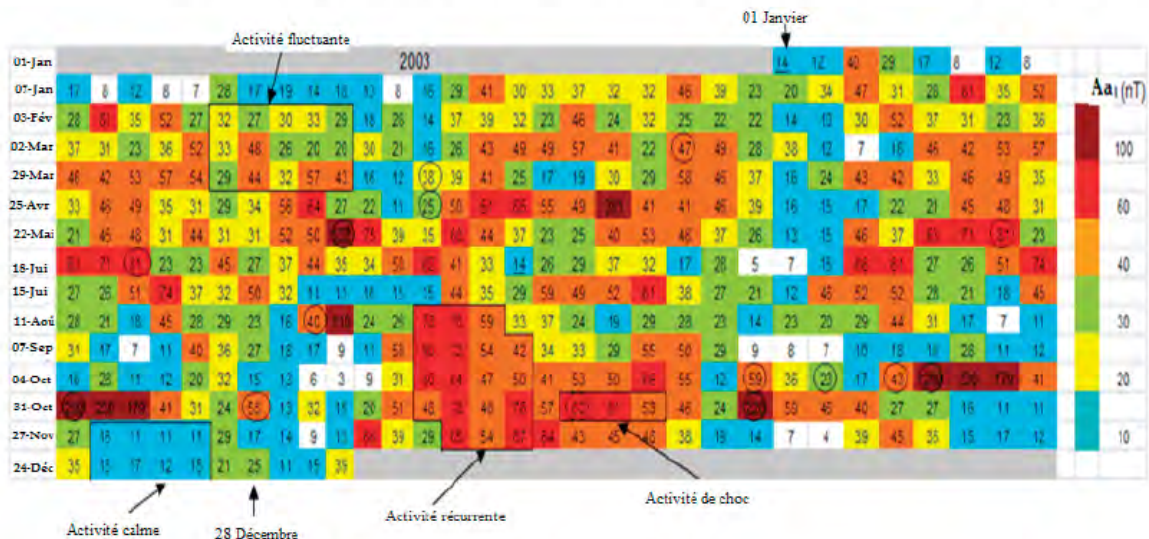


Figure 1 : Diagramme pixel illustrant l'activité solaire.

(3) *L'activité de chocs* est l'effet des éjections de masse coronale qui s'accompagnent des vents solaires rapides. Elle correspond aux dates des SSC pour lesquels les indices restent supérieurs à 40 nT sur un, deux, trois jours (Voir exemple sur la figure 1).

(4) *L'activité fluctuante*. Elle est due aux fluctuations engendrées au cours de l'écoulement des vents solaires modérés et rapides résultant de la fluctuation de la lame neutre du soleil. Elle regroupe tous les jours qui ne sont pas dans les trois premières classes.

Pour caractériser les phases du cycle solaire, nous adopterons les conditions suivantes : 1) minimum de phase: nombre de tache inférieur à 20 ($R_z < 20$) ; (2) phase ascendante: nombre de taches compris entre 20 et 100 ($20 \leq R_z \leq 100$) ; (3) maximum de phase : nombre de taches supérieur à 100 ($R_z > 100$) et (4) phase descendante ou décroissante : Nombre de taches compris entre 100 et 20 ($100 \geq R_z \geq 20$). Pour les petits cycles solaires, c'est-à-dire ceux dont le maximum de taches est inférieur à 100, le maximum de phase est obtenu pour des nombres de taches plus grand que 0,8 fois le nombre de tache maximal ($R_z > 0,8 R_z \text{ max}$).

RESULTATS ET DISCUSSION

Activité solaire de 1868 à 1986

Dans cette section, nous analysons les données géomagnétiques aa sur plus d'un siècle et demi dans le but d'avoir une vue d'ensemble des cycles solaires ainsi que celle de l'évolution de l'activité géomagnétique année par année et aussi cycle par cycle. La Figure 1 est un extrait du continuum annuel de diagrammes pixel qui a servi à identifier les différentes activités géomagnétiques. Pour construire un diagramme pixel, nous disposons les valeurs moyennes journalières de l'indice aa en tableau. Chaque ligne comporte 27 jours et correspond à une rotation solaire de Bartels ; chaque case comporte la valeur moyenne journalière de l'indice aa. Par ailleurs nous faisons figurer sur le diagramme les débuts brusques d'orage ou Sudden Storm commencement (SSC en anglais), sans tenir compte du nombre de SSC observés dans une même journée. Le diagramme est ensuite colorié en fonction de la valeur de l'indice aa et ceci en utilisant un code de couleur développé par Legrand et Simon (1989) ainsi que Ouattara et Amory Mazaudier (2009) et explicité dans la section données et méthodes. Le diagramme couleurs ou diagramme pixel ainsi obtenu permet de mettre en évidence que, à l'exception des orages à débuts brusques et de quelques orages très intenses liés à des ondes de choc survenant au hasard, l'activité géomagnétique s'organise en plages de récurrence bien individualisées que nous pouvons classer en trois catégories : (1) les périodes de faible niveau d'agitation magnétique (activité calme), correspondant à des plages blanches et bleues sur les diagrammes ; (2) les périodes où le niveau de l'activité évolue lentement au cours du temps, qui correspondent à des plages de couleurs homogènes. Cette activité, qui peut s'étendre sur 2 à 4 rotations correspond à des niveaux d'agitation qui varient faiblement sur la

plage colorée du diagramme : ces récurrences traduisent la permanence de sources de vent rapide sur plusieurs rotations solaires (activité récurrente). (3) Les périodes où le niveau de l'activité fluctue, qui forment des zones de couleurs inhomogènes et correspondent à des jets de vents solaires de vitesses fluctuantes provenant de la fluctuation de la lame neutre solaire (activité fluctuante).

Les figures 2a, 2b et 2c présentent les contributions de chacune des quatre classes d'activité géomagnétique suivant les phases du cycle des taches (du cycle 11 au cycle 22). Les pourcentages d'occurrence évalués correspondent aux taux de contribution pour chaque type d'activité géomagnétique. Ces grandeurs évaluent le ratio de l'intensité d'un type d'activité au cours d'une phase donnée du cycle par l'intensité totale du même type d'activité sur l'ensemble du cycle considéré. Nous lisons ainsi à travers ces figures la répartition des différents phénomènes solaires sur dix cycles solaires.

L'activité des jours calmes et l'activité fluctuante, bien qu'évoluant inversement par année, sont permanentes sur l'ensemble des phases de tous les cycles. Ces deux classes d'activité présentent des pics importants au minimum de phase et/ou la phase descendante pour les jours calmes et à la phase ascendante ou à la phase descendante pour les jours à dominance fluctuante. Les proportions les plus importantes de l'activité récurrente apparaissent au minimum de phase ou au cours de la phase descendante du cycle. Pendant ce temps, le maximum de chocs s'observe au maximum de phase avec une légère continuité dans la phase descendante du cycle. Cela nous révèle que la contribution d'un même type d'activité n'est pas uniforme suivant les phases d'un cycle de taches. Toutefois, certains cycles, tels les cycles 18, 19, 20 et 22, présentent des particularités.

Les cycles 18, 19 et 22 présentent une fréquence non négligeable d'activité récurrente au cours du maximum de phases. Ce pic coïncide avec les fortes activités solaires enregistrées au cours des années 1947, 1958 et 1990.

Le cycle solaire 20 présente une activité de chocs globalement constante sur toutes ses phases avec un léger maximum au minimum de phase. Ce pic inhabituel est dû à la considérable éjection de masses coronale (CMEs) des années 1960 survenu pendant le minimum de phase du cycle. Tous ces résultats sont récapitulés dans le tableau I sur les treize derniers cycles solaires. Ce tableau apparaît ici comme une continuité de celui élaboré par Legrand et Simon (Table 2, 1989) que nous appelons tableau II dans cet article. Le tableau II nous renseigne sur la distribution de chacune des quatre classes d'activité géomagnétique suivant les phases du cycle des taches (où m correspond au minimum et M le maximum de phase) et donne ainsi l'importance de la contribution de chaque type d'activité selon que nous soyons au minimum, en phase ascendant, au maximum de phase ou à la phase descendante tout comme l'esprit développé dans le tableau I. Dans ce tableau I, nous avons marqué en couleur les quatre cycles présentant des particularités. En examinant les deux tableaux, on peut dire

ZERBO J-L. et al. / CAMES-Série A, 12 (2) : 255-262, 2011

que les cycles 19, 20, 21, 22 et 23 complètent les travaux de Legrand et Simon (1989) en restant dans la logique des ces auteurs.

Cycle solaire 23

Le cycle solaire 23 apparaît comme étant le cycle le plus long de ce dernier siècle avec ses particularités. D'une durée moyenne de 13 ans (1996-2009), le cycle 23 se caractérise par une année remarquable à savoir l'année 2003. Au cours de cette année, nous avons : (1) des phénomènes majestueux (fortes éruptions solaires en Octobre et Novembre), (2) une intensité de l'activité

Figure 2a

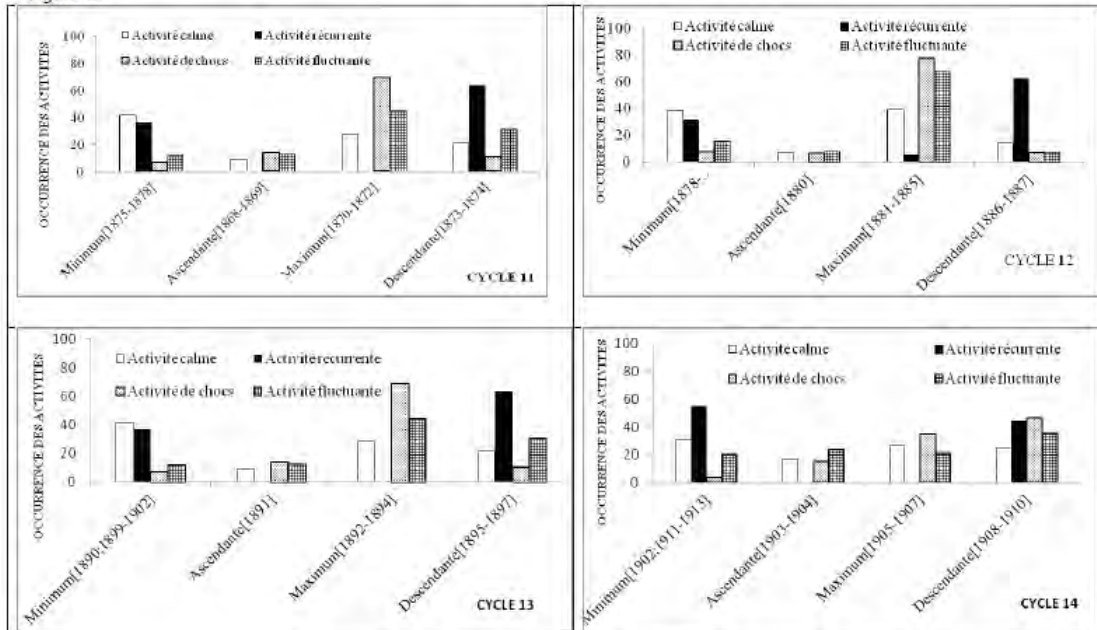
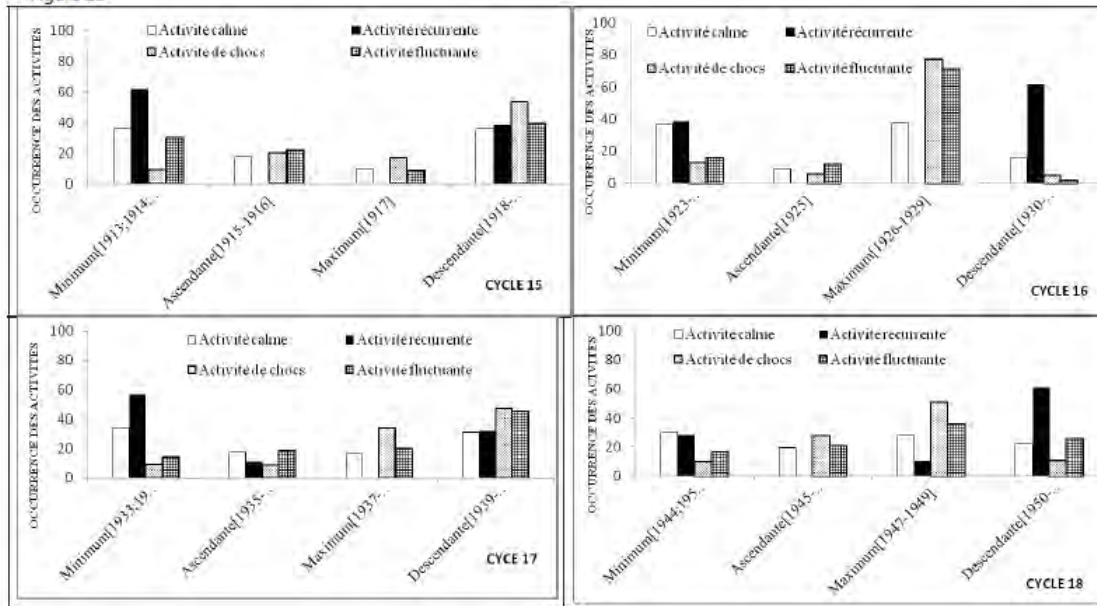


Figure 2b



ZERBO J-L. et al. / CAMES-Série A, 12 (2) : 255-262, 2011

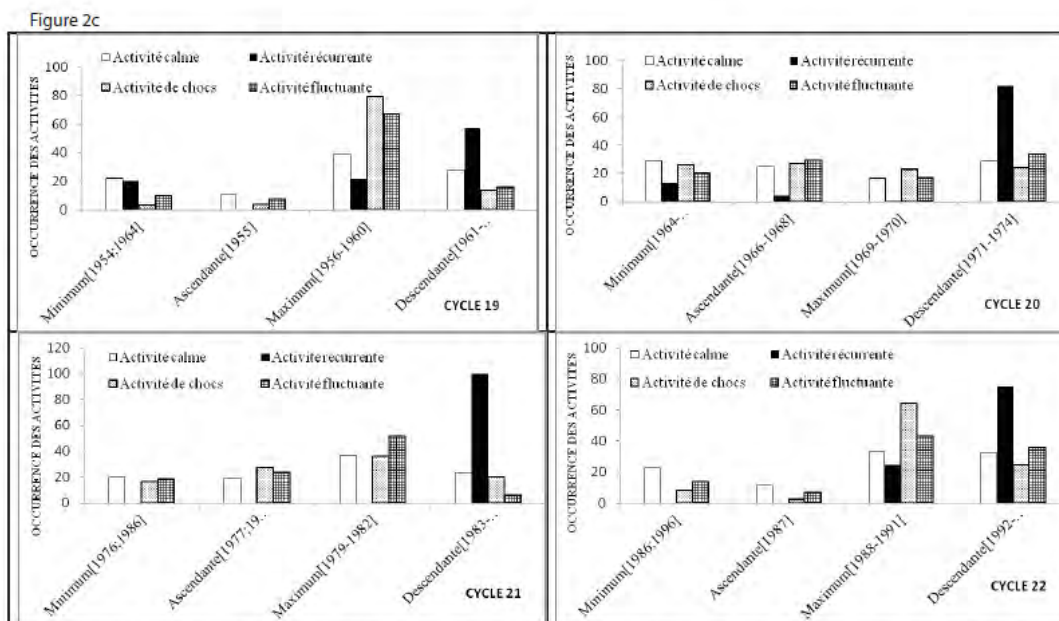


Figure 2 : (a) occurrence des classes d'activité solaire par phase de cycle (du cycle 11 au cycle 14) ; (b) occurrence des classes d'activité solaire par phase de cycle (du cycle 15 au cycle 18) ; (c) occurrence des classes d'activité solaire par phase de cycle (du cycle 19 au cycle 22).

solaire qui se démarque des autres années du cycle et (3) par le nombre très réduit de jours calmes. Le cycle 23 contient en outre une des années la plus magnétiquement calme (année 2009) depuis 1901.

Il est bien connu que les plus grands nombres de taches sont observés au maximum du cycle solaire ; ainsi en plaçant le cycle 23 dans le contexte des phases du cycle des taches comme l'illustre la Figure 3, il ressort que l'activité de chocs atteint son niveau maximal en même temps que le maximum de l'évolution du nombre de taches tandis que la plus importante contribution de l'activité récurrente survient au cours de la phase descendante du cycle de taches. Ces résultats témoignent ainsi de l'existence de deux pics dans l'évolution de l'indice géomagnétique aa au cours d'un cycle solaire. De ce fait, les résultats mettent en évidence l'existence des deux composantes du champ magnétique solaires : l'une toroïdale (champ fermé) qui est en phase avec le cycle de taches et l'autre poloidale (champ ouvert) qui présente un retard de 3,5 ans sur le cycle de taches (Legrand et Simon, 1990). Le soleil en raison de sa rotation différentielle transforme un champ (champ poloidal) qui migre d'un pôle à un autre en un champ intense parallèle à l'équateur (champ toroïdal) qui est la signature du comportement d'une paire de taches solaires. L'une des propriétés importantes du champ poloidal est son reversement cyclique qui prend place aux pôles au voisinage du maximum solaire. Aussi de

l'analyse de résultats présentés, est-il important de relever que l'activité des jours calmes se produit majoritairement au cours du minimum de l'activité tachée et que l'activité récurrente atteint sa plus grande proportion au cours de la phase descendante du cycle de taches. La figure 4, qui présente les variations long-termes de la somme annuelle de l'activité calme et du nombre de taches de 1868 à 2009, montre que l'activité calme est effectivement plus importante au cours du minimum de tache. Cette figure nous permet du même coup de voir l'une des particularités du cycle 23 qui se démarque des cycles précédents avec l'année 2003 qui enregistre le plus faible niveau d'activité calme depuis 1868.

CONCLUSION

Dans cet article, nous reportons des résultats d'analyse d'une longue série de données géomagnétiques dans un contexte des phases de cycle de taches. Nous montrons qu'il est possible de retrouver les quatre classes d'activité géomagnétique (Legrand et Simon, 1989) et d'étudier l'activité solaire suivant quatre phases : minimum de phase, phase ascendante, maximum de phase et phase descendante. Les résultats obtenus montrent que l'importance de chaque classe d'activité est liée à une phase du cycle de taches. Le cas particulier du cycle 23, qui est un cycle de 13 ans respecte la répartition de l'activité solaire et entre dans le cadre général présenté depuis 1868.

ZERBO J-L. et al. / CAMES-Série A, 12 (2) : 255-262, 2011

Tableau I : Fréquence des activités solaires sur un siècle et demi

Maxima des activités	Activité calme	Activité récurrente	Activité de chocs	Activité fluctuante
CYCLE 11	Minimum de phase	Minimum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 12	Minimum de phase	Phase descendante	Phase ascendante	Phase ascendante
CYCLE 13	Minimum de phase	Phase descendante	Ascendante/ Maximum de phase	Phase descendante
CYCLE 14	Minimum de phase	Minimum/Phase descendante	Descendante/Maximum de phase	Phase descendante
CYCLE 15	Minimum/Phase descendante	Minimum de phase	Phase descendante	Phase descendante
CYCLE 16	Minimum/Phase descendante	Phase descendante	Maximum de phase	Phase ascendante
CYCLE 17	Minimum/Phase descendante	Minimum de phase	Phase descendante	Phase descendante
CYCLE 18	Minimum de phase	Descendante /Maximum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 19	Maximum de phase	Descendante/Maximum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 20	Minimum/Phase descendante	Phase descendante	Minimum/ Phase ascendante	Phase ascendante
CYCLE 21	Maximum de phase	Phase descendante	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 22	Maximum/Phase descendante	Descendante/ Maximum de phase	Maximum de phase	Maximum de phase
CYCLE 23	Phase ascendante	Phase descendante	Maximum de phase	Maximum de phase

Tableau II : Fréquence des activités solaires (From Legrand et Simon, 1989)

	Identification in Bartels diagrams	Distribution among the phase of the sunspot cycle	Relationship with sunspot cycle activity
Quiet days	Recurrent patterns of $aa < 20$ nT.	A nearly constant annual level ~ 6 nT A peak in the annual quiet day number at m or $m + 1$	Both the sum(from $m - 4$ to $M + 3$) and the peak of the quiet day numbers are inversely proportional to Rz max (M)
Fluctuating activity	Recurrent patterns of disturbed days with a fluctuating level at the time scales of day and of rotation	From m or $m + 1$ to $M + 3$ or later	Sum(during the full cycle) closely correlated to Rz max (M)
Recurrent storms (High speed wind stream activity)	Smooth high intensity recurrence patterns of more than 3 rotations	With equinoctial properties from $M + 3$ to m or $m + 1$ Without any seasonal property from $M + 1$ to $m - 2$	Sum(during a 4 yr interval) closely correlated to Rz max (M) Not any link at all with any sunspot activity
SSC-Storm (Shock event activity)	A series of definite SSC-Storm of short duration (2-3 days) without any recurrence property	Events occurring in any phase Severe storm ($aa < 100$ nT) grouped from $M - 1$ to $M + 4$ for 88% of them	"Loose" correlation, if any, of the sum (during a cycle) with Rz max

Tableau III : Liste des cycles et leurs différentes phases (du cycle 11 au cycle 23)

Cycles	Période d'extension	Durée moyenne	Minimum de phase	Phase ascendante	Maximum de phase	Phase descendante
11	1867-1878	12 ans	1875-1878	1868-1869	1870-1872	1873-1874
12	1878-1890	11 ans	1878-1879 et 1888-1890	1880	1881-1885	1886-1887
13	1890-1902	12 ans	1890 et 1899-1902	1891	1892-1894	1895-1897
14	1902-1913	12 ans	1902 et 1911-1913	1903-1904	1905-1907	1908-1910
15	1913-1923	10 ans	1913-1914 et 1922-1923	1915-1916	1917	1918-1921
16	1923-1933	10 ans	1923-1924 et 1932-1933	1925	1926-1929	1930-1931
17	1933-1944	10 ans	1933-1934 et 1943-1944	1935-1936	1937-1938	1939-1942
18	1944-1954	10 ans	1944 et 1953-1954	1945-1946	1947-1949	1950-1952
19	1954-1964	11 ans	1954 et 1964	1955	1956-1960	1961-1963
20	1964-1976	12 ans	1964-1965 et 1975-1976	1966-1968	1969-1970	1971-1974
21	1976-1986	10 ans	1976 et 1986	1977-1978	1979-1982	1983-1985
22	1986-1996	10 ans	1986 et 1996	1987	1988-1991	1992-1995
23	1996-2009	13 ans	1996 et 2006-2009	1997-1999	2000-2002	2003-2005

ZERBO J-L. et al. / CAMES-Série A, 12 (2) : 255-262, 2011

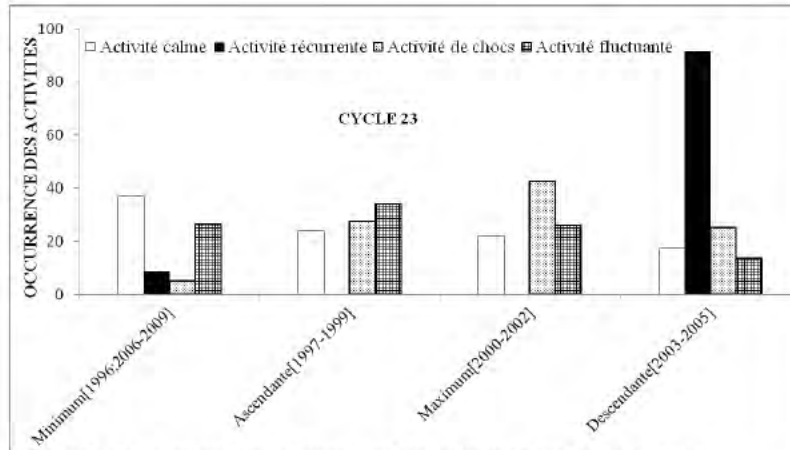


Figure 3 : Activité géomagnétique au cours du cycle 23 suivant les phases de tache solaire

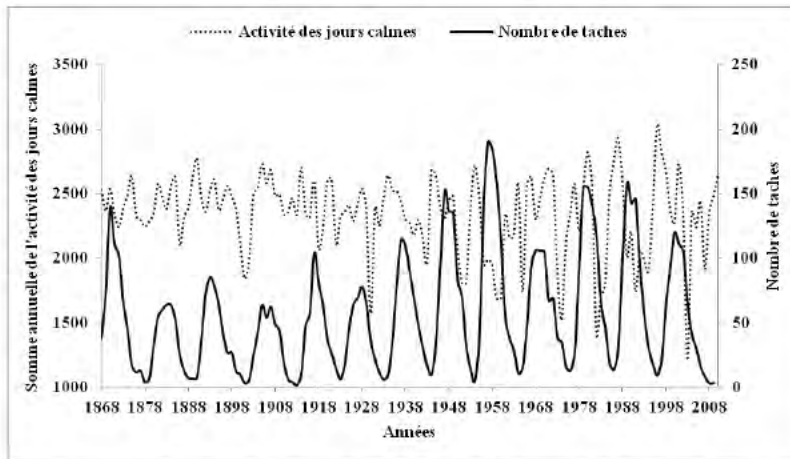


Figure 4 : Variations long-terme de l'activité des jours calmes et du nombre de taches depuis 1868

Remerciements

Les auteurs remercient, the National Geophysical Data Centre (NGDC) pour les données des indices aa. Nous remercions également le ACE data center de la NASA pour les vitesses du vent solaire et les nombre de taches solaires.

REFERENCES

Ahluwalia HS. 2000. Ap time variations and interplanetary magnetic field intensity. *J. Geophys. Res.*, **A12**:27481-27487.
 Du ZL. 2011. The correlation between solar and geomagnetic activity – Part 2: Long-term trends. *Ann. Geophys.*, **29**:1348-1348.
 Feminella F and Storini M. 1997. Large scale dynamical phenomena during solar activity cycles. *Astron. Astrophys.*, **322**: 311-319.

Gosling JT, McComas DJ, Phillips JL, Bame SJ. 1991. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, **A5** :7831-7839.
 Legrand JP, Simon PA. 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. *Ann. Geophys.*, **7** :565-578.
 Mayaud PN. 1971. Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux, *Ann. Geophys.*, **27** :67-71.
 Mayaud PN. 1972. The Aa indices: a 100-year series characterizing the magnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **77**: 6870-6874.

ZERBO J-L. et al. / CAMES-Série A, 12 (2) : 255-262, 2011

- Mayaud PN.1973.A hundred year series of geomagnetic data, 1868–1967, indices Aa, Storm sudden commencements. IAGA Bull. 33 IUGG Publ. Office Paris, 252.
- Mayaud PN.1980. Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. Geophys. Monogr. Ser., 22. AGU, Washington DC,154.
- Ouattara F. 2009a. Relationship between geomagnetic classes' activity phases and their occurrence during sunspot cycle. *Annals of Geophysics.*, **52** : 11-20.
- Ouattara F.2009b.Solar magnetic fields components: Phases, Profiles and their relationship. *Journal des Sciences*, **9**(2) : 9-16.
- Ouattara F, Amory-Mazaudier C. 2009. Solar–geomagnetic activity and Aa indices toward a Standard. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **71**:1736-1748.
- Ouattara F, Amory-Mazaudier C, Menvielle M, Simon PA, Legrand JP. 2009. On the long term change in the geomagnetic activity during the XXth century. *Ann. Geophys.*, **27**: 2045-2051.
- Richardson IG, Cliver EW, Cane HV.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.*, **A8**: 200-213.
- Richardson IG, Cane HV. 2002. Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972-2000). *J. Geophys. Res.*, **107**(A8):1187.
- Simon PA, Legrand JP. 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. *Ann. Geophys.*, **7**: 579-594.
- Webb DF. 1995. Solar and geomagnetic disturbances during the declining phase of recent solar cycles. *Adv. Space Res.*, **16**(9), 57-69.

Article: Zerbo et al, 2012a

Solar wind and geomagnetism: Toward a standard classification of geomagnetic activity from 1868 to 2009.

Zerbo, J. L, Amory Mazaudier, C., Ouattara, F., Richardson, J.D.

Annales Geophysicae, doi: 10.5194/angeo-30-421



Solar wind and geomagnetism: toward a standard classification of geomagnetic activity from 1868 to 2009

J. L. Zerbo^{1,2}, C. Amory Mazaudier², F. Ouattara³, and J. D. Richardson⁴

¹Université Polytechnique de Bobo Dioulasso, 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

²LPP-Laboratoire de Physique des Plasmas/UPMC/Polytechnique/CNRS, UMR 7648, 4 Avenue de Neptune, 94107 Saint-Maur-des-Fossés, France

³Ecole Normale Supérieure de l'Université de Koudougou, BP 376 Koudougou, Burkina Faso

⁴Center for Space Research, M.I.T., Cambridge, USA

Correspondence to: C. Amory Mazaudier (christine.amory@lpp.polytechnique.fr)

Received: 10 October 2011 – Revised: 9 February 2012 – Accepted: 22 February 2012 – Published: 27 February 2012

Abstract. We examined solar activity with a large series of geomagnetic data from 1868 to 2009. We have revisited the geomagnetic activity classification scheme of Legrand and Simon (1989) and improve their scheme by lowering the minimum Aa index value for shock and recurrent activity from 40 to 20 nT. This improved scheme allows us to clearly classify about 80 % of the geomagnetic activity in this time period instead of only 60 % for the previous Legrand and Simon classification.

Keywords. Geomagnetism and paleomagnetism (Time variations, secular and long term)

1 Introduction

Geomagnetic activity may be defined as the magnetosphere's response to the transitory variation of solar activity. Legrand and Simon (1985, 1989) and Simon and Legrand (1989) show the existence of two categories of magnetic perturbation: the first is organized into recurrent features and the second forms a range of intense and short events distributed at random. These authors divide geomagnetic activity into four classes: quiet, recurrent, shock, and fluctuating (Legrand and Simon, 1989; Richardson et al., 2000; Richardson and Cane, 2002; Ouattara et al., 2009; Ouattara and Amory Mazaudier, 2009).

To determine the classes, Legrand and Simon (1989) and Simon and Legrand (1989) built a diagram similar to Bartels' 27-days rotation using the geomagnetic index Aa from 1868 to 1977. This diagram, named a pixel diagram, represents

the geomagnetic data as a function of solar activity for each solar rotation (27 days) and gives an overview of the geoeffectiveness of solar events.

Of these four classes of geomagnetic activity, only three classes (quiet activity, recurrent activity and shock activity) are clearly selected and defined. The fourth (fluctuating) contains all data which does not fit into the other three categories.

In light of the strong correlation between the Aa index and solar wind established by Svalgaard (1977) and the fact that 91.5 % of solar activity is reflected by solar wind speed (Legrand and Simon, 1985, 1989), we decided to try to further refine fluctuating activity to better understand its origins. We find that it is appropriate to subdivide the fluctuating activity into three new classes including Coronal Mass Ejection (CME) manifestations and moderate solar wind effects (Gopalswamy et al., 2003; Ramesh, 2010).

2 Data and analysis

2.1 Data

The times of sudden storm commencements (SSC), which are rapid increases in the magnetic field observed at ground, and the number of CMEs per days are taken from <http://isgi.lammos.ipel.fr/> and http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_List, respectively. The solar wind speed and the international sunspot number (SSN) are obtained from <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. The SSN data are used to determine solar cycle phases.

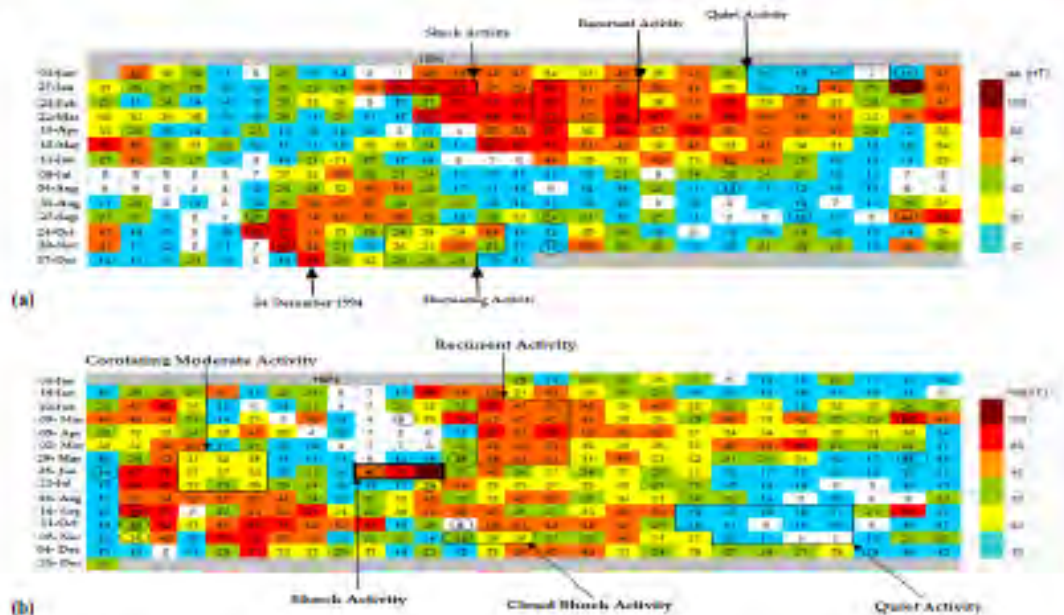


Fig. 1. Pixel diagrams for years 1994 (a) and 1974 (b).

2.2 Data analysis

To classify geomagnetic activity, Legrand and Simon (1989) use the following criteria: (1) SSC times are used to determine when shock events contribute to geomagnetic activity, (2) 91.5 % of solar activity is reflected by solar wind speed, (3) the strong correlation between A_s (Maynard, 1971, 1973, 1980) and the solar wind speed (Svalgaard, 1977). They divided the observations into four classes of geomagnetic activity: Shock activity (SA), quiet activity (QA), recurrent activity (RA) and fluctuating activity (FA), illustrated in Fig. 1a. These four classes are fully described in Legrand and Simon (1989) and Ouattara and Amory-Mazaudier (2009). It is, however, important to note that Legrand and Simon (1985) only classified 43 % of SSCs as shock events, including only those on days with $A_s > 40$ nT. The remainders were classified as fluctuating activity ($V \geq 450$ km s⁻¹). Similarly, they include in RA only times when A_s is greater than 40 nT.

To refine the fluctuating activity (Legrand and Simon, 1989), as suggested in introduction, we use a 142 year-long Bartels diagram of A_s indices, SSC reports and two new classes with the following criteria:

(4a) Corotating Moderate Activity. This category of geomagnetic activity is defined as corotating, stable solar wind stream producing moderate geomagnetic effects, A_s between 20 nT and 40 nT. We identify these events in the pixel diagram (Fig. 1) by the recurrence from on solar rotation to the next of yellow and green areas with no SSCs.

(4b) Cloud Shock Activity. These events are shocks which cause only a moderate increase of activity level. We select only pixels within three days after SSCs with the colours yellow, green in the pixel diagram (Bartels diagram), and so the A_s indices are between 20 nT and 40 nT.

(4c) Unclear Activity. This transient activity is composed of days not included in any other classes. Its annual level is obtained after subtracting Cloud Shock Activity and Corotating Moderate Activity annual levels from the fluctuating activity defined by Legrand and Simon (1989). Thus, we have increased from four to six the number of geomagnetic activity classes. Figure 1a is an example of pixel diagram for year 1994 which illustrates the five clear activity classes: quiet, recurrent, shock (defined by Legrand and Simon, 1989), cloud shock and corotating (defined in this paper).

In the next paragraphs we adopted the following notations: (QA) for Quiet Activity, (SA) for Shock Activity, (RA) for Recurrent Activity, (CSA) Cloud Shock Activity and (CMA) Corotating Moderate Wind Activity. The Unclear Activity due to the oscillation of the neutral sheet will be noted (UA).

For each year, the geomagnetic activity level characterized by the A_s indices can be expressed now by the sum of the six classes of geomagnetic activity:

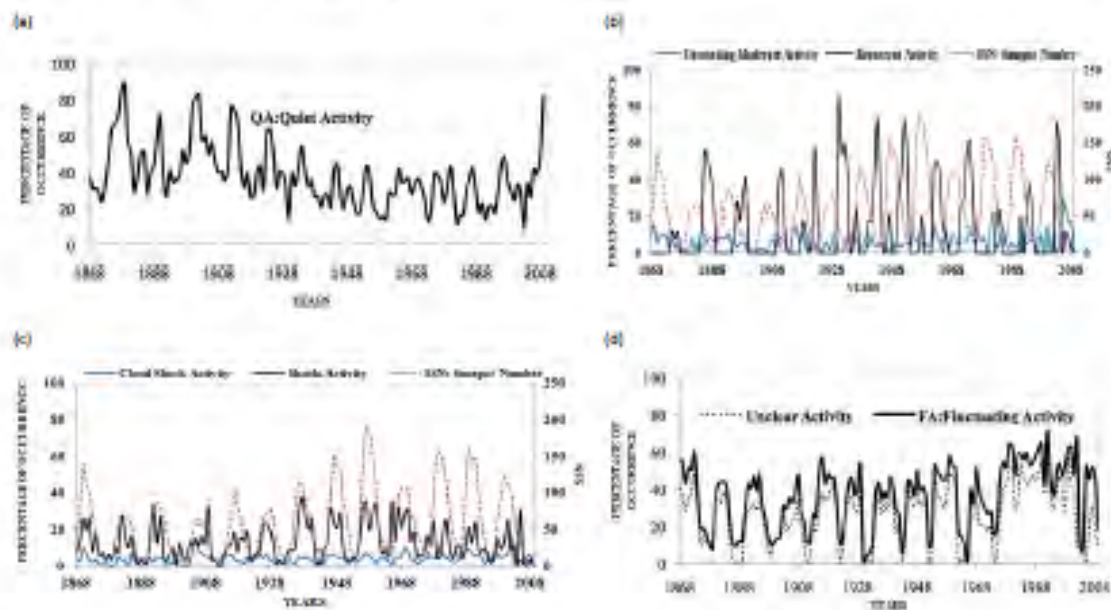


Fig. 2. Levels of quiet activity (a), recurrent activity, corotating moderate activity, and sunspot number levels (b), shock activity, cloud shock activity, and sunspot number levels (c), fluctuating activity and unclear activity levels (d) from 1868 to 2009.

$$\text{Geomagnetic activity} = \text{QA} + \text{SA} + \text{RA} + \text{CSA} + \text{CMA} + \text{UA} \quad (1)$$

By the past with Simon and Legrand (1989), the geomagnetic activity was the sum of four classes of activity:

$$\text{Geomagnetic activity} = \text{QA} + \text{SA} + \text{RA} + \text{FA} \quad (2)$$

with $\text{FA} = \text{CSA} + \text{CMA} + \text{UA}$.

For each class we determine the yearly level of activity as the sum of all the daily A_n of the days of the class.

For example the QA activity level of a year is given by:

$$\text{QA} = \sum_{i=1}^N A_n(\text{Quiet day}) \quad (3)$$

N : number of quiet days in the year.

3 Results

For the 142 years covered by this study, we divided the fluctuating activity into three new classes (corotating activity, cloud shock activity and unclear transient activity) to obtain six classes of geomagnetic activity. Figure 2 plots the yearly levels of the different classes of geomagnetic activity and the sunspot number from 1868 to 2009. Figure 2a shows that quiet magnetic days are more prevalent from the end of the 1800s to ~1930 and at the end of the sunspot cycle 23 (1996–2009) and that the distribution is relatively flat during the second half of the 1900s. Figure 2b superimposes the recurrent activity (Legrand and Simon, 1989), the

corotating moderate activity and the sunspot number. The higher magnetic activity (RA) dominated the CMA activity during most of the solar cycles: from 1868 to 2009. Figure 2c deals with shock activity, cloud shock activity and the sunspot number long time evolution. The lowest shock activity levels were observed during cycles 15 (1913–1923) and 23 (1996–2009) while cloud shock activity reaches its highest level in the same time periods. Figure 2d superimposes the long time variations of fluctuating activity (Legrand and Simon, 1989) and unclear activity. The difference in these two curves is due to the removal of CSA and CMA from fluctuating activity, which will be discussed later. Figure 2c superimposes the yearly sunspot number on the percentages of shock activity and cloud shock activity from 1868 to 2009. We can see a close link between sunspot number and both activity levels time evolution. Figure 2b shows that the largest percentage of recurrent activity occurs after the maximum in the sunspot number. This figure also shows that significant corotating activity is observed near sunspot maximum but that the largest percentage occurs in the declining phase. Figure 3a and b superimposes the sunspot number on the percentage of shock events and recurrent events, respectively. Figure 3a indicates that the highest contribution of shocks occurs near solar maximum. Figure 3b shows that the most important contributions from high-speed solar wind streams are observed in the declining phase of sunspot cycle.

Table 1. Components of the cycle of the geomagnetic activity, Legrand and Simon (1989).

	Identification in Bartels diagrams	Distribution among the phase of the sunspot cycle	Relationship with sunspot cycle activity
Quiet days	Recurrent patterns of aa < 20 nT.	A nearly constant annual level ~6 nT A peak in the annual quiet day number at m or $m + 1$	Both the sum (from $m - 4$ to $M + 3$) and the peak of the quiet day numbers are inversely proportional to $R_{max}(M)$
Fluctuating activity	Recurrent patterns of disturbed days with a fluctuating level at the time scales of day and of rotation	From m or $m + 1$ to $M + 3$ or later	Sum (during the full cycle) closely correlated to $R_{max}(M)$
Recurrent storms (high speed wind stream activity)	Smooth high intensity recurrence patterns of more than 3 rotations	With equinoctial properties from $M + 3$ to m or $m + 1$ Without any seasonal property from $M + 1$ to $m - 2$	Sum (during a 4yr interval) closely correlated to $R_{max}(M)$ Not any link at all with any sunspot activity
SSC-Storm (shock event activity)	A series of definite SSC-Storm of short duration (2-3 days) without any recurrence property	Events occurring in any phase Severe storms (aa < 100 nT) grouped from $M - 1$ to $M + 4$ for 88 % of them	"Loose" correlation, if any, of the sum (during a cycle) with R_{max}

Table 2. Correlation coefficients (SA, CSA) and (RA, CMA) for cycle 11 to cycle 23.

Solar cycle	Correlation coefficient (SA, CSA) yearly level of activity	Correlation coefficient (RA, CMA) yearly level of activity
11	0.93	0.86
12	0.82	0.85
13	0.83	0.74
14	0.81	0.94
15	0.80	0.82
16	0.87	0.78
17	0.89	0.70
18	0.82	0.76
19	0.89	0.77
20	0.84	0.75
21	0.80	0.89
22	0.79	0.93
23	0.79	0.72

4 Discussion and conclusion

We investigate geomagnetic activity and its solar wind origins from 1868 to 2009 (142 years). We define three new classes of geomagnetic activity from the fluctuating activity class of Legrand and Simon (1989). Thus we now define six classes of geomagnetic activity, quiet activity (QA), recurrent activity (RA), shock activity (SA), cloud shock activity (CSA), corotating moderate activity (CMA) and unclear activity (UA). CSA, CMA and UA are extracted from the fluctuating activity previously defined by Legrand and Simon

Table 3. Comparison between the geomagnetic classification (Legrand and Simon criteria) and the classification after the refinement of the fluctuating activity.

	Legrand and Simon (1989)	New classification Extension of RA and SA
Quiet Activity	34 %	34 %
Recurrent Activity	14 %	26 %
Shock Activity	13 %	19 %
Fluctuating/unclear Activity	39 %	21 %

(1989). The new classification allows us to assign about 80 % of the days into specific geomagnetic activity classes (as opposed to the FA and UA classes which are composed of days which fit not other group) in comparison to 60 % assigned with the previous scheme (Legrand and Simon, 1989). From Fig. 2c, it is shown the strong correlation between cloud shock activity level and sunspot number variations.

The concordance between the cloud shock activity and the shock activity time evolutions throughout the many sunspot cycles suggests that both classes have the same mechanism. The different levels of Aa index probably result from differences in shock strength due to differences in the CMEs on the Sun which generate these shocks. We also point out a good correlation (≥ 0.79) between the yearly level of SA and CSA for cycle 11 to cycle 23 as summarized in Table 2. Thus SA and CSA are different parts of a distribution formed from the same type of event and could be combined into one class. Figure 3a shows the sum of shock activity and cloud shock activity levels from 1868 to 2009. This figure points out a fairly constant in shock event levels was present for all the

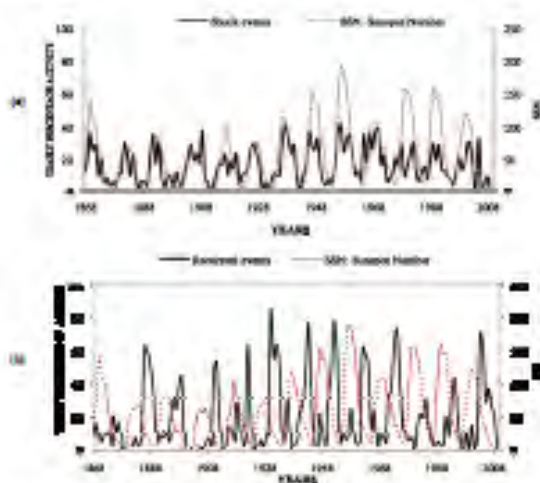


Fig. 3. levels of the shock events and the sunspot number (a), levels of the recurrent events and the sunspot number (b).

solar cycles from 1868 to 2009 in contrary to the time variations of SA and CSA plotted separately in Fig. 2c.

Table 1, taken from Legrand and Simon (1989), summarizes their classification scheme and the variation of each class with the sunspot cycle. The recurrent events reach their peak a few years before the sunspot minimum and sometimes near the sunspot maximum. Figure 2b shows that corotating moderate activity which reaches its peak near the sunspot maximum or few years before sunspot minimum (sunspot declining phase) is in concordance with recurrent events occurrence summarized in Table 1. Sunspot maximum and the declining phase are dominated by recurrent high wind stream flowing from coronal holes. In addition, the yearly level of RA and CMA present significant correlation coefficient (≥ 0.70) for each solar cycle since cycle 11 as shown in Table 2. Thus it appears that CMA and RA are also generated by the same mechanism. These results express the necessity to combine CMA and RA to keep one class as we did for SA and CSA. Figure 3b gives an overview of the recurrent events (CMA plus RA) and the sunspot number from 1868 to 2009. The recurrent events are likely governed by the distribution of coronal hole high-speed solar wind which occurs most often at low-latitudes in the declining phase of the sunspot cycle. The Table 3 summarizes our study and compares it with the results of Legrand and Simon (1989) for the period 1868–2009. We defined four classes of geomagnetic activity but change the criteria from the classifications of (Legrand and Simon, 1989). These new criteria allow us to positively classify 80% (as opposed to 60% previously). Thus we defined: (1) quiet-days, those days with an Aa index of geomagnetic activity below 20 nT; (2) recurrent activity, the days under the control of recurrent high wind stream

with an Aa index above 20 nT without SSC; (3) shock activity, which we attribute to CMEs. We select only those days with non-recurrent SSCs and days within three days after the SSC which show enhanced Aa value above 20 nT; (4) unclear activity. This transient activity is formed by the days which do not fit in the three other classes.

The present refinement in geomagnetic activity classification constitutes a starting point towards a standard classification of solar activity using especially solar physics and solar phenomenon before their geoeffectiveness.

Acknowledgements. The authors thank all the members of LPF/CNRS/UPMC for their welcome.

The authors thank OMNI data base for providing the values of solar wind velocity and sunspot numbers.

We express many thanks to Coopération Française and Burkina Faso for their financial help. JDR was supported by NASA's Wind mission.

Many thanks to Jean-Pierre Legrand for his scientific help and advice.

Topical Editor K. Kauristie thanks C. Demetrescu and L. Svalgaard for their help in evaluating this paper.



The publication of this article is financed by CNRS-INSU.

References

Gopalawamy, N., Lara, A., Yoshino, S., and Howard, R. A.: Coronal Mass Ejections and solar polarity reversal, *The Astrophysical Journal*, 598, L63–L66, 2003.

Legrand, J. P. and Simon, P. A.: Some solar cycle phenomena related to the geomagnetic activity from 1868 to 1980, I. The shock events, or the interplanetary expansion of the triaxial field, *Astron. Astrophys.*, 152, 199–204, 1985.

Legrand, J. P. and Simon, P. A.: Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part I. The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind, *Ann. Geophys.*, 7, 565–578, 1989, <http://www.ann-geophys.net/7/565/1989/>.

Mayaud, P. N.: Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux, *Ann. Geophys.*, 27, 71–73, 1971, <http://www.ann-geophys.net/27/71/1971/>.

Mayaud, P. N.: A hundred series of geomagnetic data, 1868–1967, *LAGA Bull.*, 33, Zurich, p. 251, 1973.

Mayaud, P. N.: Deviation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 22, AGU, Washington, D.C., p. 154, 1980.

Quattrone, F. and Amory-Mazaudier, C.: Solar-geomagnetic activity and Aa indices toward a Standard, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 71, 1736–1748, 2009.

- Ortjans, F., Amory-Mazaudier, C., Menvielle, M., Simon, P., and Legrand, J.-P.: On the long term change in the geomagnetic activity during the 20th century, *Ann. Geophys.*, 27, 2045–2051, doi:10.5194/angeo-27-2045-2009, 2009.
- Ramesh, K. B.: Coronal mass ejections and sunspots-solar cycle perspective, *The Astrophysical Journal Lett.*, 712, L77–L80, 2010.
- Richardson, I. G. and Cane, H. V.: Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000), *J. Geophys. Res.*, 107, 1187, doi:10.1029/2001JA000564, 2002.
- Richardson, I. G., Cliver, E. W., and Cane, H. V.: Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind, *J. Geophys. Res.*, 105, 18200–18213, 2000.
- Simon, P. A. and Legrand, J. P.: Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists Part II. The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity, *Ann. Geophys.*, 7, 579–594, 1989, <http://www.ann-geophys.net/7/579/1989/>.
- Svalgaard, L.: Geomagnetic activity: dependence on solar wind parameters, in: *Coronal holes and high speed wind streams*, edited by: Zirker, J. B., Colorado Ass. Univ. Press, Boulder, 371–432, 1977.

CHAPITRE 5 : VENT SOLAIRE ET IONOSPHERE EQUATORIALE

Introduction

Le géomagnétisme, réponse aux différentes variations transitoires de l'activité solaire, a fait l'objet de nombreuses études qui continuent d'être approfondies depuis l'hypothèse de l'existence du vent solaire au 18^{ème} siècle et les premières mesures effectuées dans les années soixante. Legrand et Simon (1985), Legrand et Simon (1989) ont mis en évidence l'existence de deux grandes catégories de perturbations magnétiques : la première catégorie s'organise en plages récurrentes et la seconde correspond à des événements solaires de fortes intensités de courtes durées et survenant au hasard. Cela a conduit ces auteurs à proposer un découpage de l'activité géomagnétique en quatre classes (activité des jours calmes, activité récurrente, activité de chocs, activité fluctuante). Cette classification a été validée par plusieurs études (Richardson et al., 2000; Richardson and Cane, 2002; Ouattara et al, 2009; Ouattara and Amory Mazaudier, 2009 ; Zerbo et al., 2011) et améliorée par Zerbo et al. (2012a). Dans ce chapitre nous nous intéressons, dans un premier temps, à l'influence de l'activité solaire sur l'ionosphère notamment celle des vents solaires rapides sur les paramètres de la région F2 de l'ionosphère équatoriale à travers l'étude des gros orages magnétiques. Ensuite, nous ferons une étude comparative entre les données de la fréquence critique foF2 de l'ionosphère issues de mesures in situ et les prédictions faites à partir de la version 2007 du modèle International Reference Ionosphere (IRI-2007) en utilisant les deux variantes IRI-URSI et IRI-CCIR. Cette étude fait suite à de nombreux autres travaux utilisant les modèles IRI pour l'investigation et les prévisions ionosphériques (Anderson et al, 1987 ; Adewale, 2001a,b ; Ararujó-Pradere and Fuller-Rowell, 2002; Jin and Park, 2007; Bhuyan and Borah, 2007 ; Ouattara et Fleury, 2011 ; Ouattara, 2012). Pour étudier l'impact du vent solaire sur l'ionosphère, nous utiliserons dans ce chapitre la classification de Legrand et Simon(1989).

5.1. Influence de l'activité géomagnétique sur l'ionosphère

5.1.1. Mise en évidence des deux composantes du champ magnétique solaire

L'étude de l'évolution temporelle de l'activité géomagnétique suivant les classes définies selon les critères de Legrand et Simon (1989), Zerbo et al. (2012a) offre des profils intéressants et révèle certains phénomènes physiques. La Figure 5.1 présente les profils d'évolution des classes d'activité récurrente, de chocs et du nombre de tache Rz superposés à ceux de la variation de l'indice aa pour la période allant de 1868 à 2010. Les Figure 5.1a et Figure 5.1b montrent les variations de l'indice géomagnétique Aa superposées aux profils de l'activité récurrente et de l'activité de choc respectivement. La figure 5.1c donne une superposition des profils des valeurs moyennes annuelles de l'indice Aa et du nombre de taches Rz.

De l'analyse des panneaux de cette figure, il apparaît clairement que l'indice géomagnétique Aa présente deux pics dans son évolution et cela sur chaque cycle solaire de 11 ans. Ceci a été observé par Echer et al.(2004), Ouattara (2009a ; 2009b). Le pic de l'activité de chocs survient en même temps que le premier pic de l'indice géomagnétique Aa sur un cycle solaire pendant que celui de l'activité récurrente coïncide avec le second pic de l'indice géomagnétique Aa au cours du même cycle solaire. Ces deux pics dans l'évolution du profil de l'indice Aa au cours d'un cycle solaire témoignent de l'existence de deux mécanismes responsables de l'activité géomagnétique. En nous inspirant des travaux de Legrand et Simon (1990), il ressort que l'activité solaire est gouvernée par deux composantes du champ magnétique solaire qui sont rigoureusement distinctes mais intimement liées. Ces deux composantes sont responsables chacune d'un pic enregistré dans les perturbations engendrées par le champ magnétique solaire sur celui de la Terre.

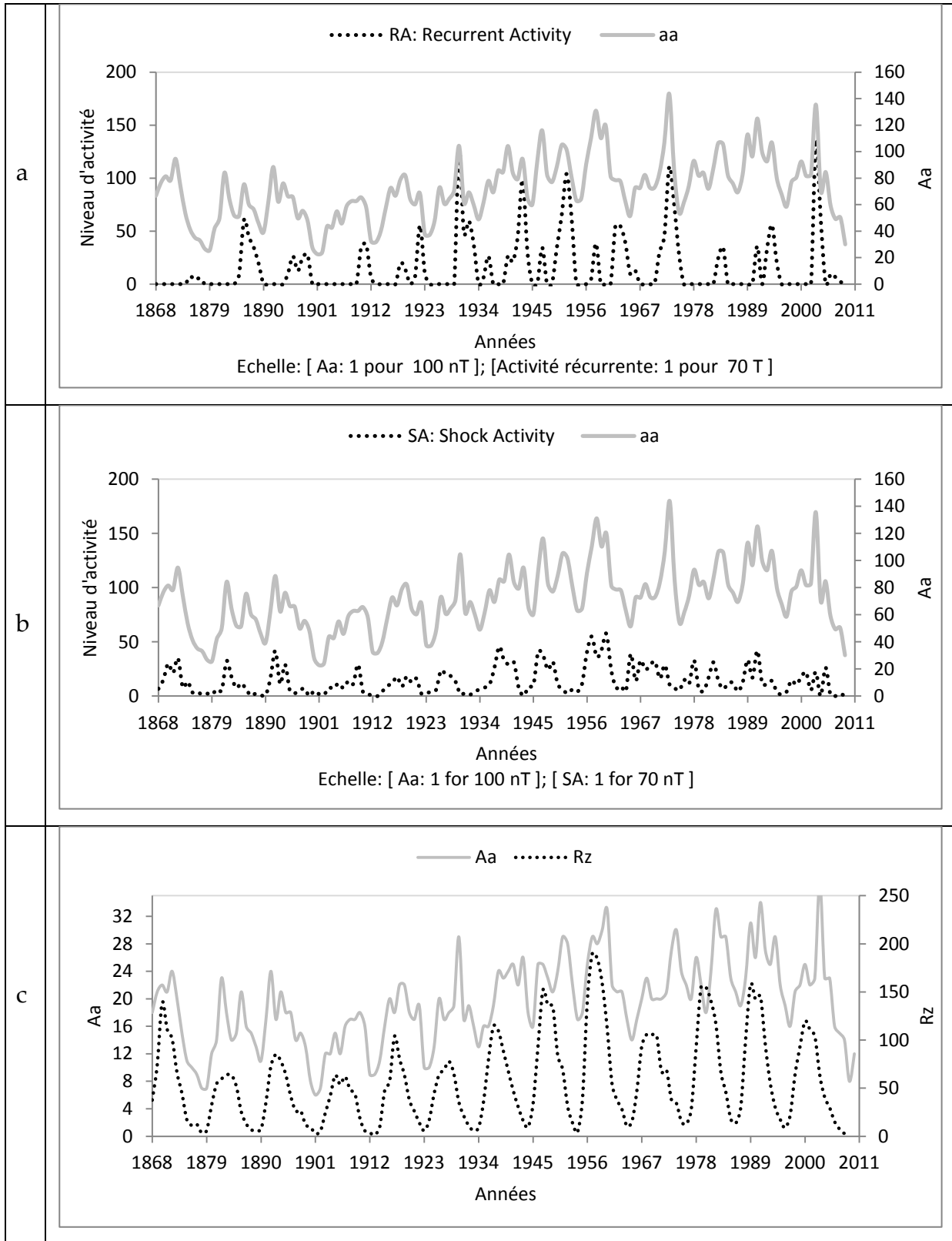


Figure 5. 1 : Mise en évidence des deux composantes du Champ solaire

La composante en phase avec le nombre de taches solaires reflète l'intensité du champ magnétique fermé ou toroïdal dû aux régions actives ; celle qui est en avance

de phase reflète l'intensité du champ ouvert ou poloïdal dû aux trous coronaux. Il est alors possible d'évaluer dans ces conditions, l'intensité des deux composantes du champ magnétique solaire. Les études montrent (Figure 5.1c) qu'en un siècle, la composante poloïdale a augmenté deux fois plus que la composante toroïdale. Cela signifie que le soleil calme contribue de façon non négligeable aux variations de l'irradiation totale.

5.1.2. Influence de l'activité géomagnétique sur la région F2 de l'ionosphère

L'ionosphère, couche supérieure de l'atmosphère terrestre (Figure 5.2), est le siège de fluctuations de vitesses et de gradients de densité d'ionisation qui apparaissent dans une très vaste gamme d'amplitudes et d'échelles spatiales. Ces irrégularités, dont les tailles caractéristiques varient du millier de kilomètres à quelques centimètres, font de l'ionosphère une région turbulente à presque toutes les latitudes, longitudes et altitudes. Les précipitations de particules de basse énergie (< 500 keV), reliées à l'activité solaire, sont à l'origine de la formation d'arcs auroraux qui affectent la haute atmosphère entre 100 et 200 km d'altitude du côté jour et entre 90 et 150 km du côté nuit. Les précipitations se traduisent par un accroissement de l'ionisation en région F qui donne lieu à des structures de surdensité (environ $2 \cdot 10^5$ e $^-$.cm $^{-3}$) de grande échelle. Elles influent également sur la conductivité et donc sur la fermeture des courants et la convection (Zhu et al, 1997). La région F, au-delà de 150 km, se subdivise en régions F1 et F2; elle résulte de l'ionisation par l'ultraviolet solaire entre 9 et 91 nm. Cette région subsiste pendant la nuit, bien que la densité électronique puisse se réduire d'un facteur 100 pendant la période nocturne. Les variations de l'état des régions ionosphériques diurnes, ou à plus long terme, influencent aussi les télécommunications radio-électriques. Les deux régions F ont également la propriété de réfléchir les ondes radios de fréquences entre 5 et 10MHz ou de les transmettre dans l'espace (vers un satellite par exemple) si leur fréquence est plus élevée.

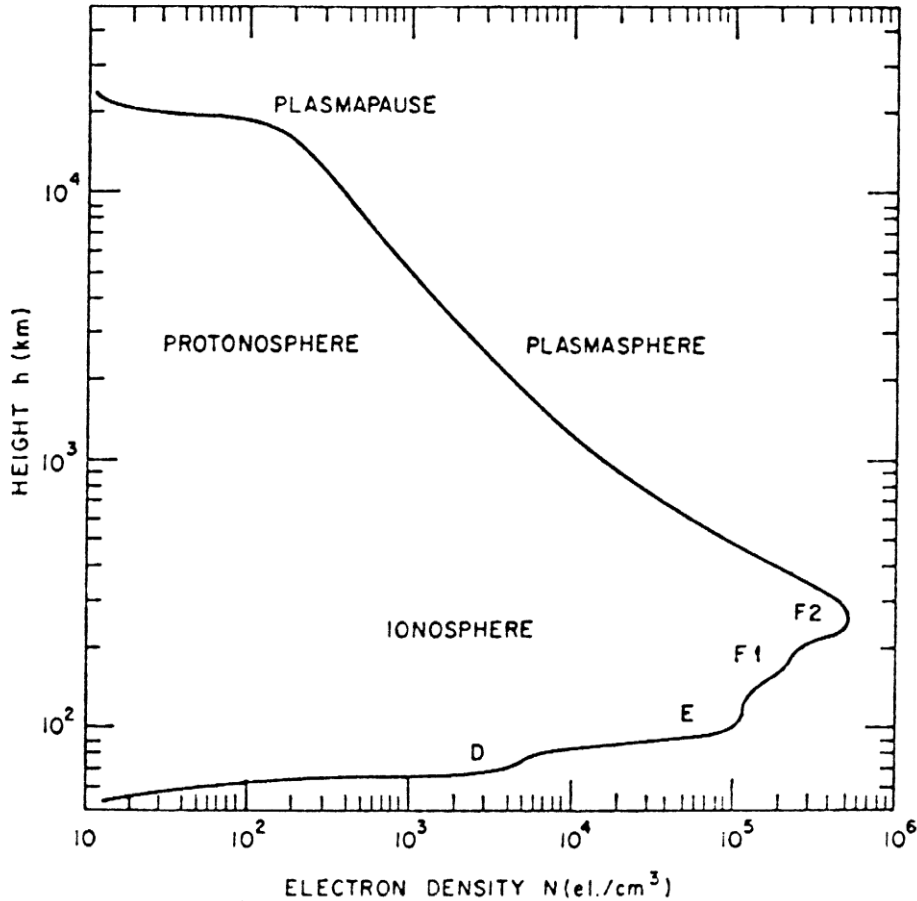


Figure 5. 2: Les différentes régions de l'ionosphère (Rishbeth et Garriott, 1969).

5.2. Orages sévères, vents solaires et couche F2 de l'ionosphère

Les influences étudiées dans cette section sont essentiellement celles des orages sévères et de vents solaires rapides et fluctuants survenant à des dates bien déterminées. Ces jours sont caractérisés dans la classification de l'activité géomagnétique (Legrand et Simon, 1989 ; Zerbo et al., 2012a) par les valeurs de $Aa > 100$ nT. Sur la base de ces critères, l'activité récurrente est exclue de la présente étude pour la simple raison que la majorité des Aa contribuant à cette activité est inférieur à 100 nt (Ouattara et Amory, 2009). Seules les activités de choc et fluctuante sont concernées ici. Nous cherchons ainsi à comprendre les impacts des gros orages magnétiques engendrés par les CMEs (éjections de masse coronale) et les vents rapides fluctuants sur la région F2 de l'ionosphère. En rappel, l'identification et la

classification de l'activité géomagnétique ont été développées dans le Chapitre 4 de cette thèse. Nous sélectionnons alors les valeurs des paramètres de la région F2 (foF2, h'F2) correspondant aux jours de chocs et de fluctuant répondant à notre condition sur Aa (Aa > 100 nT) puis nous représentons les variations saisonnière et annuelle de ces jours (CMEs et vents rapides fluctuants). Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- 1) montrer les effets des évènements solaires (CMEs, et fluctuations des vents solaires rapides) sur les paramètres de la région F2 en zone équatoriale de l'Afrique ;
- 2) déterminer la contribution de chaque type d'activité sur les variabilités observées aux maxima équinoxiaux des paramètres foF2 ;
- 3) faire ressortir les variabilités de l'ionosphère suivant chaque type de perturbations.

Les données des paramètres foF2 et h'F2 exploitées dans ce paragraphe proviennent de la station d'ionosonde de Ouagadougou (12,4° N ; 1,5° W) qui a fonctionné de juin 1966 à Février 1998. Sur cette période de 33 ans, nous avons sélectionné au total 72 valeurs à l'aide des diagrammes pixels construits à l'aide des moyennes journalières de Aa et des dates des orages brusques (SSC). A titre d'exemple le tableau 5.1 donne les dates des chocs sévères, les activités fluctuantes sous la condition Aa > 100 nT extraites du pixel de l'année 2004 (figure 5.3).

Tableau 5. 1 : Chocs Sévères et activité fluctuante ; jours et valeurs de Aa au cours de l'année 2004

	Rotation solaire 1		Rotation solaire 8				Rotation solaire 12			
	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)
Chocs	22 Jan	101					9 Nov	140	10 Nov	183
Fluctuant			25 Juil	143	27 Juil	192	8 Nov	162		



Figure 5. 3: Pixel traduisant l'activité géomagnétique en 2004

La figure 5.4 présente la variation de la fréquence critique foF2 (a) et la hauteur virtuelle h'F2 (b) en fonction de l'indice de flux solaire radio F10.7. Ces Figures montrent une bonne corrélation (0,9 53) entre foF2 et F10.7 et une assez bonne anti corrélation (0,585) entre h'F2 et F10.7 (b). Ces résultats montrent que les différents paramètres de la région F2 peuvent être utilisés comme des proxys du flux radio solaire F10.7. Nous pouvons alors apprécier la contribution de chaque type de perturbation aux orages sévères par une simple analyse des équations de régression. Un tel résultat fait remarquer une périodicité de 11 ans dans le profil d'évolution des paramètres foF2 et h'F2. Si nous notons « y » la valeur expérimentale des paramètres de la région F2 et « y' » la valeur théorique donnée par « $y' = aF10.7 + b$ » où a et b sont des coefficients réels. « y' » correspond à la contribution de la composante toroïdale du champ magnétique solaire et « $y - y'$ » celle du champ poloïdale. Nous en déduisons alors que ces deux paramètres de la région F2 dépendent des deux composantes du champ magnétique solaire. Examinons maintenant les variations annuelles et mensuelles des paramètres y et y' de la région F2 de l'ionosphère représentés sur les figures 5.5a et 5.5b.

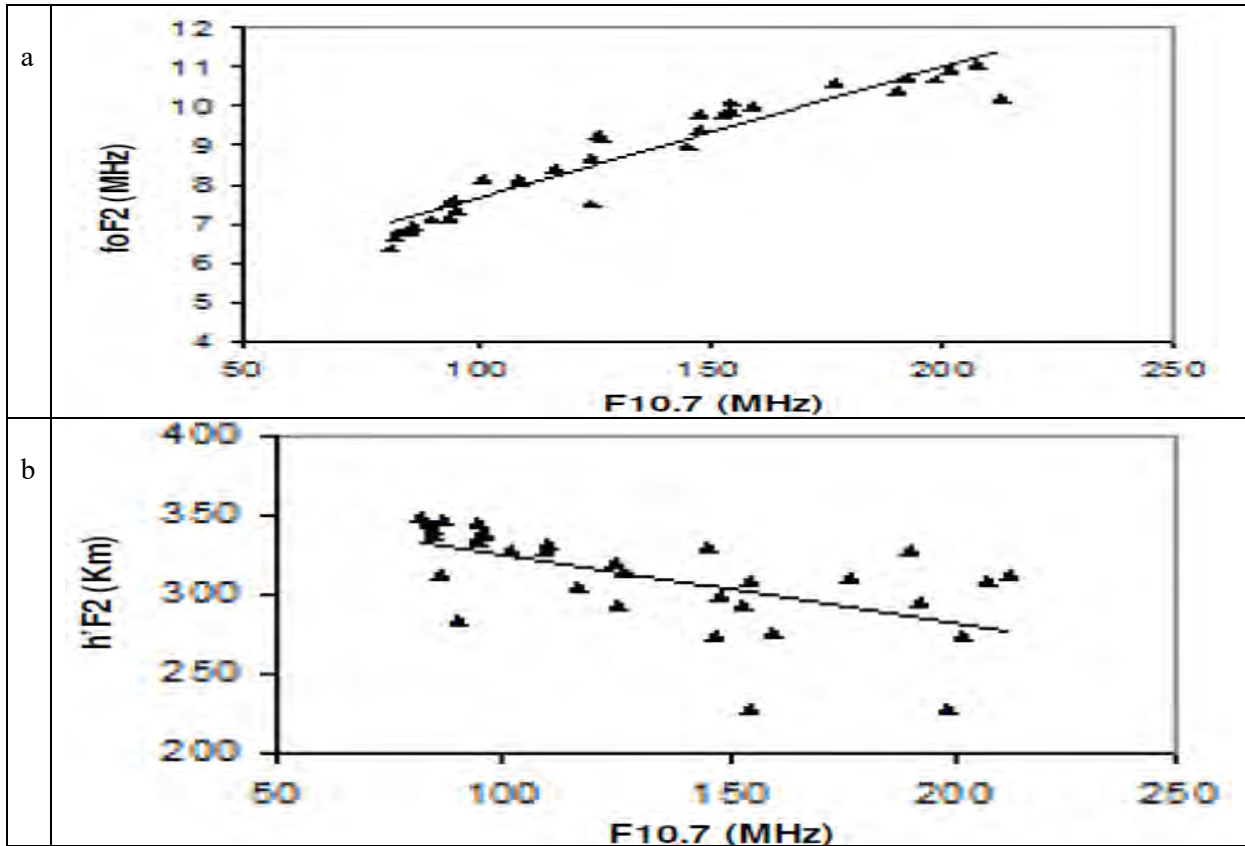


Figure 5. 4: Corrélation entre F10.7 et foF2(a) puis h'F2(b)

Les Figures 5.5a et 5.5b montrent les profils annuelles de foF2 et h'F2. Ces figures illustrent bien l'effet de chacune des deux composantes du champ magnétique solaire sur les paramètres foF2 et h'F2 sur trois cycles solaires. Sur la Figure 5.5b, en effet, il est facile de voir que les pics dans le profil des anomalies du paramètre foF2 surviennent au cours des phases ascendante et décroissante du cycle solaire. Ce résultat traduit la manifestation d'intenses activités géomagnétiques (activité fluctuante) engendrées par les fluctuations de l'héliosheet du soleil. Cela montre que les CMEs sont effectivement la manifestation du Champ toroïdal et que les vents solaires fluctuants représentent celles de la composante poloidale du champ magnétique solaire (Legrand et Simon, 1989 ; Legrand et Simon, 1990 ; Ouattara, 2009b). La figure 5.5b montre que le profil temporel du paramètre h'F2 présente son pic au cours du minimum de phase du cycle des taches. De la figure 5.5, nous pouvons retenir que les CMEs provoquent l'augmentation de la densité électronique au cours du maximum de phase tandis que les vents solaires rapides fluctuants la

provoquent au cours des phases ascendante et décroissante de la phase du cycle des taches. Il apparaît alors clairement que la taille (épaisseur) de la couche F2 de l'ionosphère croît au tour du minimum et décroît autour du maximum solaire.

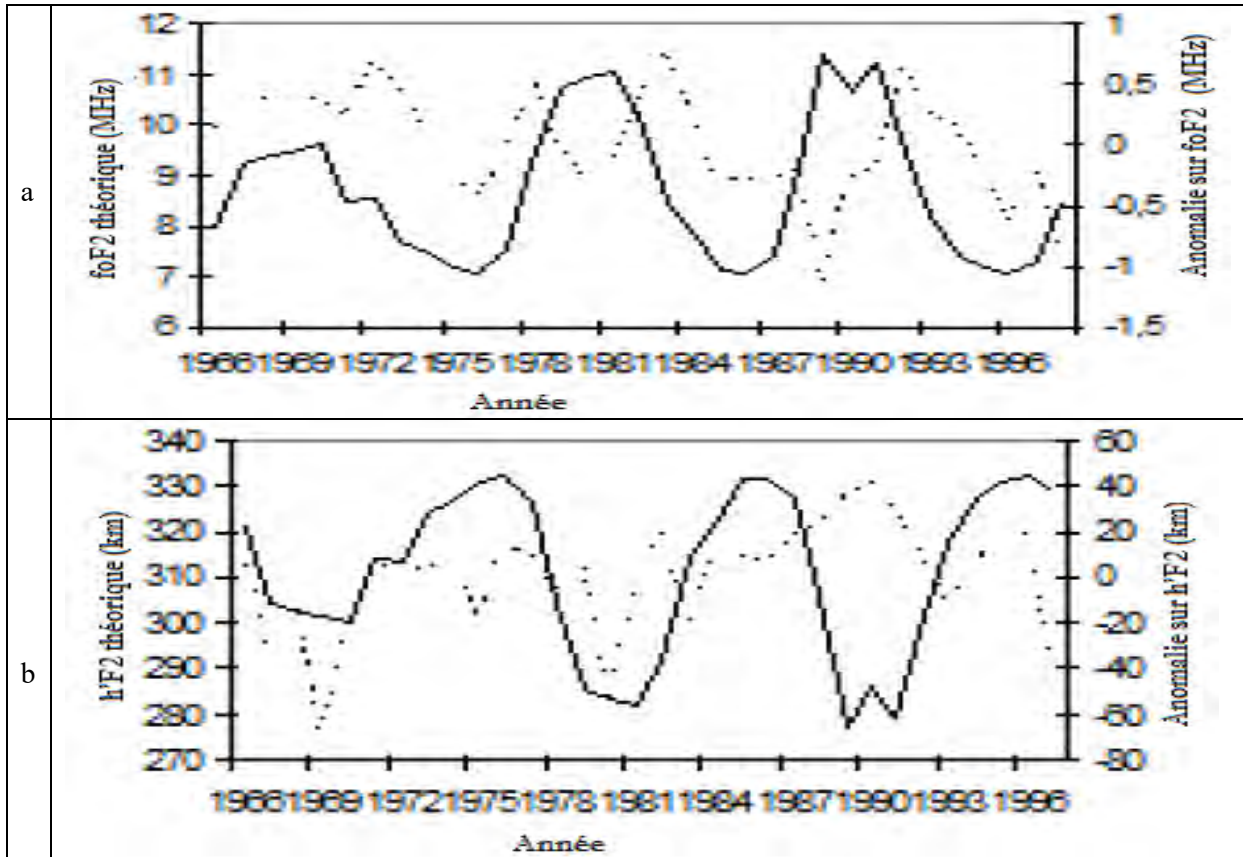


Figure 5. 5: Valeurs théoriques et anomalie sur (a) foF2 et (b) h'F2

La figure 5.6 qui présente la distribution des jours d'orages sévères montre qu'il se produit plus de perturbations magnétiques aux équinoxes. Nous constatons également l'existence d'une asymétrie équinoxiale dans l'évolution du nombre de jours magnétiquement perturbés. La Figure 5.7 qui présente les variations mensuelles des paramètres de la région F2 de l'ionosphère exprime l'impact des perturbations magnétiques sur les paramètres foF2 et h'F2. De la Figure 5.7a, il ressort que les activités perturbées n'ont pas d'effets remarquables sur le profil de la fréquence critique de la couche F2 et que les pics équinoxiaux sont la manifestation des perturbations magnétiques. En même temps, la Figure 5.7b nous fait comprendre que le creux observé pendant l'équinoxe de mars n'est pas l'effet de l'activité perturbée.

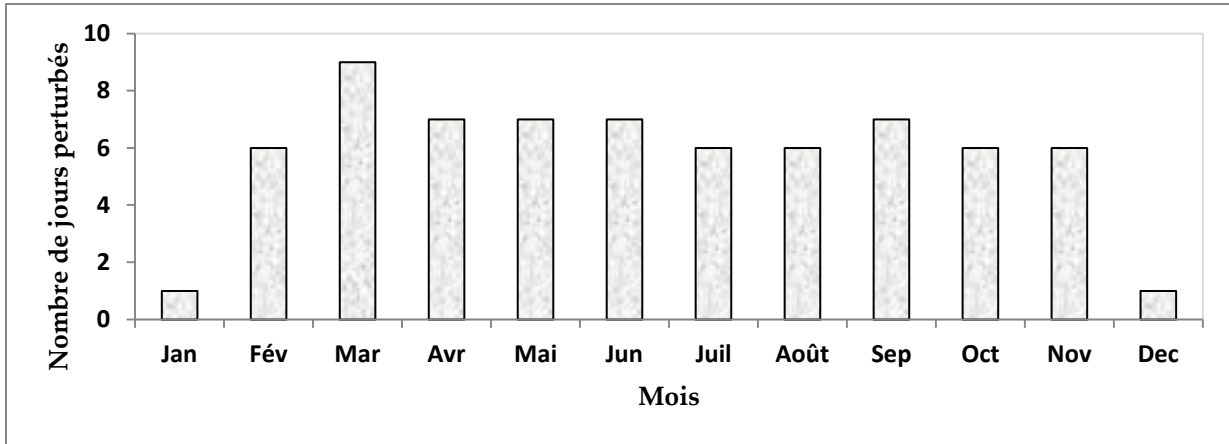


Figure 5. 6: Répartition statistique des jours perturbés sur la période étudiée

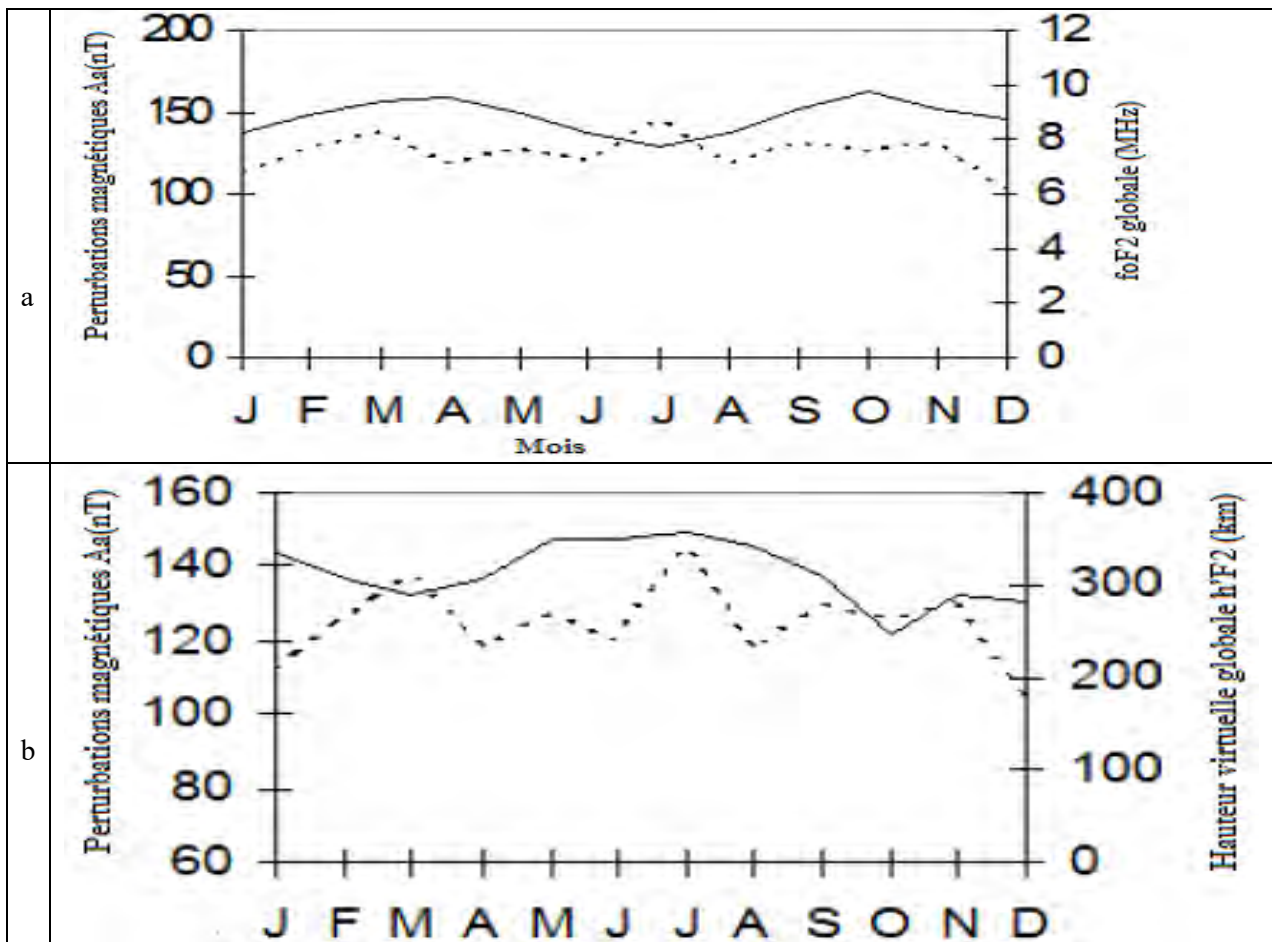


Figure 5. 7: variations mensuelles des paramètres foF2 et h'F2 de l'ionosphère

La Figure 5.8 renseigne sur les effets de chaque type de perturbations magnétiques (activités de choc et fluctuante) sur la variation des valeurs mensuelles de la fréquence critique foF2. Les traits pleins sur les Figure 5.8a et Figure 5.8b correspondent suivant la figure analysée au profil temporel des valeurs

expérimentales et théoriques de foF2. Quand aux pointillés, ils montrent le profil d'évolution des valeurs moyennes de Aa associées aux ondes de chocs. Les Figure 5.8c et Figure 5.8d s'occupent essentiellement des profils des valeurs théoriques et expérimentales ainsi que celui de l'activité fluctuante. La Figure 5.8a montre que les chocs sévères n'ont aucun effet remarquable sur le profil de la fréquence critique foF2. La figure 5.8b confirme ce résultat et montre que le pic de l'équinoxe de mars est la manifestation des deux classes d'activités perturbées sur le profil mensuel de la hauteur virtuelle h'F2. Aussi pouvons-nous remarquer à travers la Figure 5.8a que les chocs ont une importante contribution au maximum d'été et sont responsables du creux observé dans le profil temporel de h'F2 à l'équinoxe d'Octobre. La Figure 5.8b précise que le profil de h'F2 est la manifestation des chocs du mois de Juillet à celui de Décembre. Dans la même logique, la figure 5.8c montre que l'activité fluctuante a un effet très important au maximum d'été tout en provoquant le creux observé au cours de l'équinoxe de mars. De plus la figure 5.8d précise que l'activité fluctuante détermine le profil de h'F2 sur la période décembre- juillet.

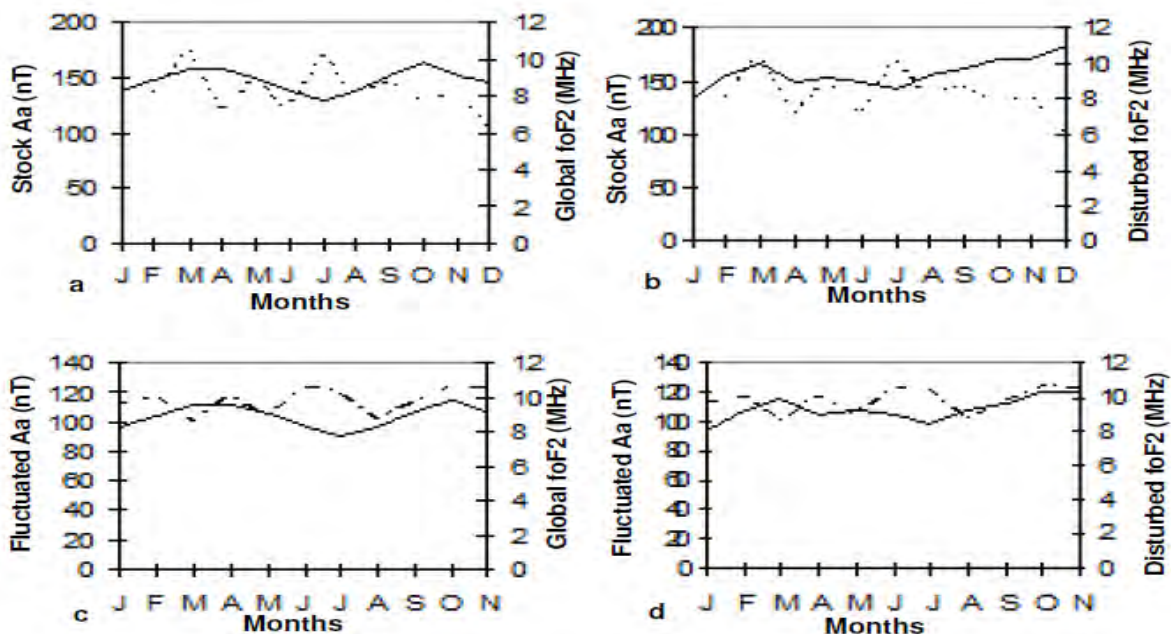


Figure 5. 8: effet des différents perturbations sur les paramètres foF2 et h'F2

5.3. Modèle IRI et Mesures in situ des paramètres foF2 de l'ionosphère équatoriale.

5.3.1. Données analysées

Dans cette étude comparative portant sur des années du cycle solaire 22, nous utilisons les données enregistrées par l'ionosonde de la station de Ouagadougou (12,4° N ; 1,5° W) qui a fonctionné de Juin 1966 à Février 1998. Cette étude porte sur les jours de calme magnétique caractérisés par les indices géomagnétique $A_a < 20$ nT (Classification Legrand et Simon, 1989 ; Zerbo et al., 2012a). Ce choix a pour intérêt majeur d'éviter toutes les fluctuations engendrées par les perturbations sporadiques.

Pour avoir une vue globale sur l'ensemble des mesures couvrant le cycle 22, nous nous intéressons aux quatre traditionnelles saisons (hiver, printemps, été et automne) pour des années situés au minimum, à la phase ascendante, au maximum et à la phase descendant du cycle de taches solaires : Hiver (Décembre, Janvier et Février), Printemps (Mars, Avril et Mai), Eté (Juin, Juillet, et Août), Automne (Septembre, Octobre et Novembre).

Pour notre modélisation, nous utilisons deux sous-routines du modèle IRI (International Ionosphere Reference) i.e. IRI-URSI (Union de Radio Science International), IRI-CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) version 2007.

Pour l'appréciation de la prédiction du modèle IRI, nous allons comme Bertoni (2004) et Ouattara (2012) utiliser la déviation relative σ_{rel} entre prédiction et mesure in situ définie par :

$$\sigma_{rel} = \frac{x_i^0 - x_i^m}{x_i^m} \times 100 \quad \text{avec } x_i^0 \text{ et } x_i^m \text{ sont les moyennes horaires des mesures in situ de}$$

la fréquence critique foF2 et de sa prédiction IRI 2007, respectivement. Pour mémoire, les observations des variations de la fréquence critique foF2 (Fayot et Vila, 1979) ont été classées suivant les cinq catégories ci-dessous:

- le profil de type "M" : pic du Matin;
- le profil de type "R" : Renversement du pic;
- le profil de type "B" : double pic centré sur 12h temps local;
- le profil de type "P" : Plateau;
- le pic de type "D" : Dôme.

5.3.2. Mesures in situ et prédictions IRI-2007

Nous considérons, ici, les observations faites au cours des mois de Mars, de Juin, de Septembre et de Décembre correspondant respectivement à des périodes de printemps, d'été, d'automne et d'hiver dans l'hémisphère nord. Pour notre étude spécifique, nous analyserons les compilations de données issues des observations de l'ionosonde de Ouagadougou (ionosphère équatoriale) et les prédictions obtenues à partir des deux subroutines IRI-URSI, et IRI-CCIR pour les mêmes périodes. Cinq jours magnétiquement calmes ont été sélectionnés pour chaque mois considéré pour les données de la fréquence critique foF2 de la région F de l'ionosphère. La figure 5.9 traduit les profils temporels des mesures in situ de la fréquence critique foF2 sur l'ensemble du cycle solaire 22. La figure 5.9.1 correspond aux équinoxes de Mars (rouge) et de Septembre (bleu) pendant que la figure 5.9.2 se consacre aux solstices de Juin (rouge) et de Décembre (bleu). La figure 5.9.1 montre que le profil de foF2 présente une même morphologie pour toutes les phases du cycle solaire 22. Toutes les courbes présentent un profil de type "B" (noon bite out profile) au cours du minimum de phase et à la phase ascendante. Pour le maximum de phase, nous avons un pic matin ou profil de type "M" (Morning peak) en Mars et un profil de type "B" en Septembre. L'analyse de la figure 5.9.2 (solstices), montre qu'au minimum de phase la variation de foF2 offre un profile B pour le mois de Juin et un profil plateau ou profil de type "P" pour le mois de Décembre. Au cours de la phase ascendante du cycle solaire, le profil de type "R" (reversal afternoon profile) est prédominant en Juin pendant que le profil de type "B" est remarquable en Décembre

avec un léger profil de type "R". Pour le maximum de phase, nous remarquons un profil de type "M" en Décembre et un profil "B" en Juin. Une lecture simple des panneaux de la figure 5.10a fait remarquer une asymétrie équinoxiale entre 9h et 11h temps local au cours du minimum de phase. Pour le maximum de phase, l'asymétrie se situe entre 9h et 11h ; entre 10h et 17h temps local. De même, la figure 5.9.2 montre une asymétrie entre 8h et 16h temps local seulement pour le maximum de phase du cycle solaire. Les figures 5.10 à 5.13 présentent les profils de variations horaires des mesures in situ de la fréquence critique foF2 et les prédictions de données de foF2 avec les subroutines IRI-URSI et IRI-CCIR suivant des années choisies dans chacune des quatre phases du cycle de taches solaire (Minimum de phase, phase ascendante, maximum de phase et phase descendante). La figure 5.10 correspond au maximum de phase, la figure 5.11 au minimum de phase, la figure 5.12 à la phase ascendante et la figure 5.13 à la phase descendante.

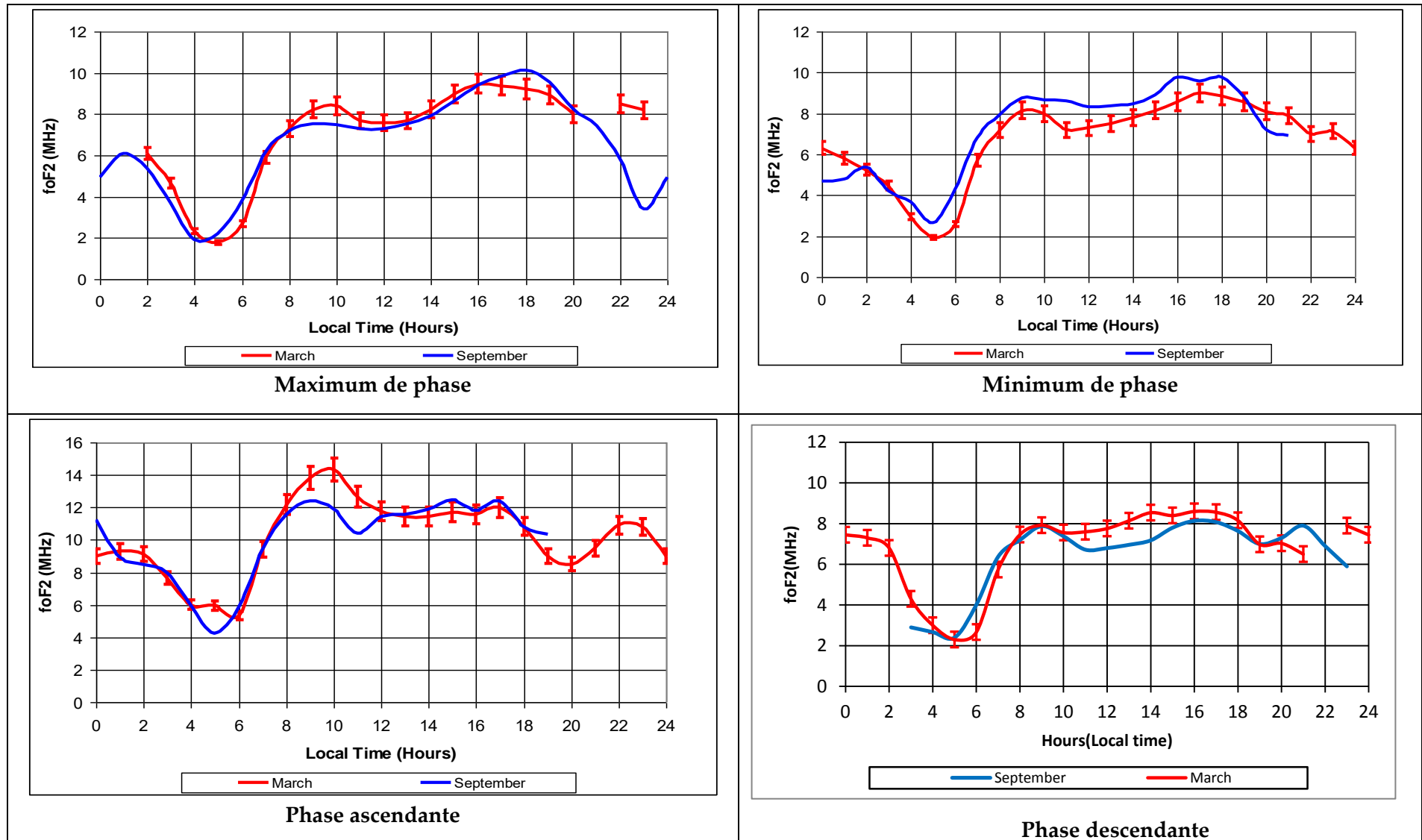


Figure 5.9.1: Profils de foF2 au cours des saisons d'équinoxe (Mars et Septembre, Ouattara 2012).

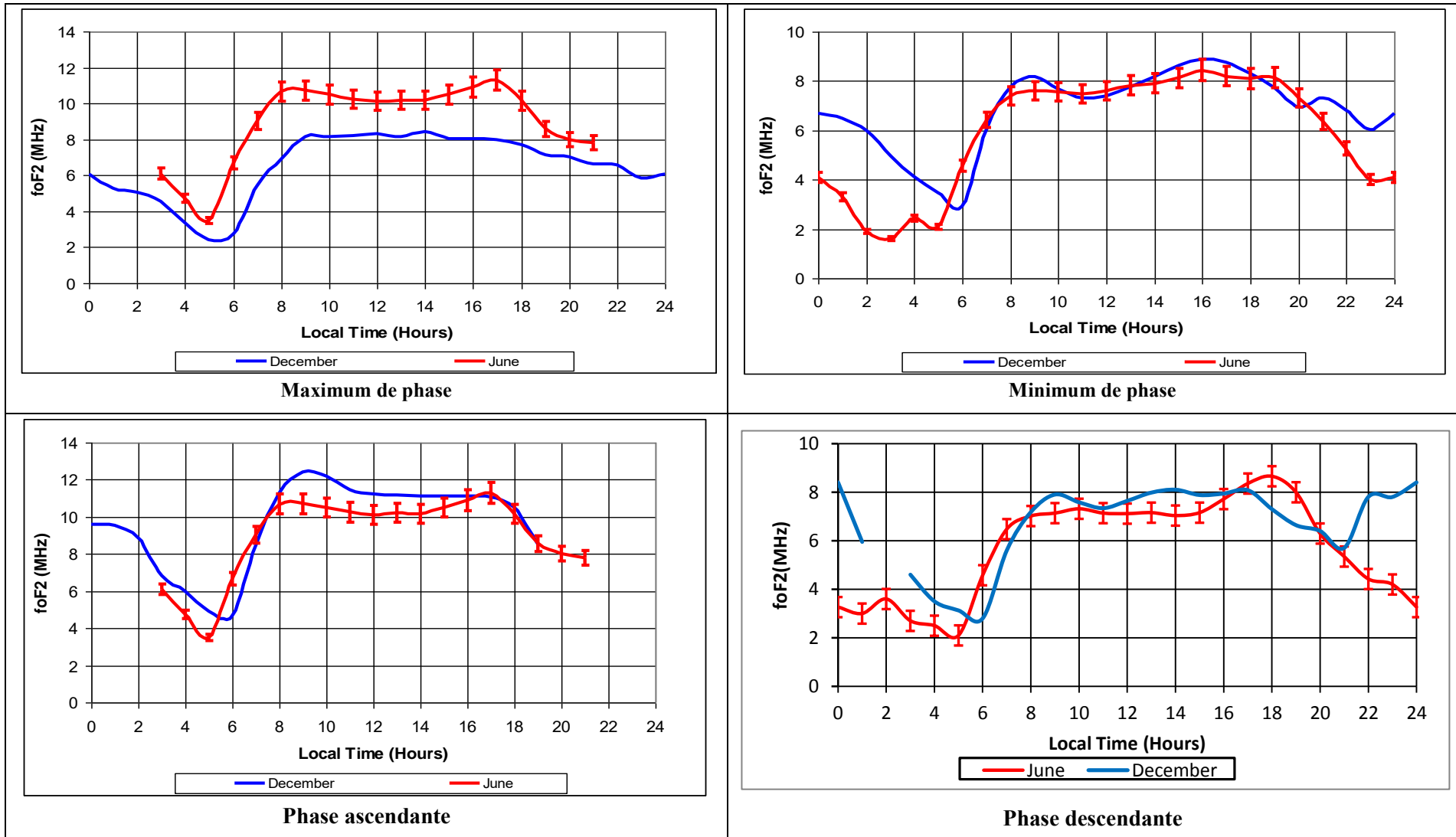


Figure 5.9.2 : Profils de foF2 au cours des saisons de solstice (Décembre et Juin, Ouattara 2012)

Les figures 5.10.1, 5.11.1, 5.12.1, 5.13.1 renseignent sur les mois d'équinoxe pendant que les figures 5.10.2, 5.11.2, 5.12.2, 5.13.2 traitent des mois de solstice. Sur chacune de ces figures, nous comparons les profils d'évolution des mesures in situ de foF2 et les prédictions faites avec la subroutine IRI-CCIR (panneaux a) et la subroutine IRI-URSI (panneaux b) : les courbes en couleur bleu représentent le profil des mesures in situ, les courbes en couleur verte celui des prédictions de IRI-CCIR et les courbes de couleur rouge ceux obtenue avec de IRI-URSI.

Maximum de phase : année 1990

L'analyse de la figure 5.10.1 (équinoxes de Mars et Septembre) montre que pour le mois de Mars, les subroutines IRI-CCIR et IRI-URSI donnent respectivement un profil de type "M" et un profil de type "R", tous deux très peu prononcés. Pour le mois de Septembre, le profil des prédictions est de type R avec les deux subroutines CCIR et URSI. L'évolution des mesures in situ présente trois pics importants pour Mars [10h (14,33 MHz), 17h (11,73 MHz) et 23h (8,50 MHz)] et deux pics pour Septembre [09h (12,48 MHz) et 16h (11,88 MHz)]. Figure 5.10.1a : pour l'équinoxe de Mars (panneau gauche), mis à part l'intervalle de temps 09h – 11h, les prédictions IRI-CCIR sont largement supérieures aux données de mesure in situ. De même, au cours de l'équinoxe de Septembre (panneau droit), les prédictions IRI-CCIR sont supérieures aux données in situ sur l'ensemble de la journée à l'exception de la période 8h-10h. La figure 5.10.1b montre essentiellement un pic de type "M" et un pic de type "R" au cours de l'équinoxe de Mars pour le modèle IRI-URSI. Là encore, les prédictions sont supérieures aux mesures in situ pour chacun des deux panneaux de la figure 5.10.1b. De cette figure, il est intéressant de retenir qu'en dehors des écarts constatés, les profils des mesures in situ et les prédictions IRI présentent grossièrement des tendances assez proches aux équinoxes de Mars et de septembre. En ce qui concerne la figure 10.2 (les solstices de Décembre et Juin) le modèle IRI présente un profil "R" avec ses deux versions au cours du solstice de Juin. Au cours du mois de Décembre, le modèle IRI-CCIR donne un profil de type "M" alors que la

version IRI-URSI donne un léger profil "B". Toutes les prévisions IRI sont largement au dessus des observations in situ au cours du solstice de Décembre et seulement avec le modèle IRI-URSI au cours du solstice de Juin. Les prédictions sont inférieures aux mesures des observations entre 06h et 10h pour les deux sous-routines de IRI.

Minimum de phase : année 1986

La figure 5.11.1 (équinoxes) montre un profil de type "R" avec le modèle IRI. Les profils des mesures des données issues des observations montrent deux pics essentiels : 10h (8,40 MHz) et 18h (9,48 MHz) au cours du mois de Mars (panneau gauche) ; 09h (7,56 MHz) et à 18h (10,42 MHz) pour l'équinoxe de Septembre. Les doubles pics constatés dans le profil des observations sont en concordance avec les pics du modèle IRI même si les creux de midi n'apparaissent pas très clairement dans le modèle. Toutefois, il est important de constater que la meilleure approximation des valeurs de foF2 s'observe en Septembre avec IRI.

Pour les mois de solstice, nous observons un léger profil de type "D" en Juin contre un profil de type "P" en Décembre. Par contre les prévisions IRI montrent un profil de type "R" en Juin et Décembre avec et un profil "D" très peu prononcé au cours du solstice de Décembre pour le modèle IRI-CCIR. Au cours du mois de Juin, les prévisions IRI-CCIR sont nettement inférieures aux mesures in situ pendant la journée. Pendant la même période les mesures in situ et les valeurs de foF2 obtenues avec le modèle IRI-URSI se confondent sensiblement.

En établissant un parallèle entre le minimum et le maximum, nous constatons que les données (valeurs in situ et prévisions IRI) obtenues durant une année de minimum solaire (1986) montrent une morphologie plus nette que celles obtenues pour une année de Maximum solaire (1990). Cependant, il convient de noter que les pics sont plus prononcés au cours du Maximum solaire en raison de l'intensité de la production (densité électronique) ionosphérique au cours de cette phase du cycle solaire.

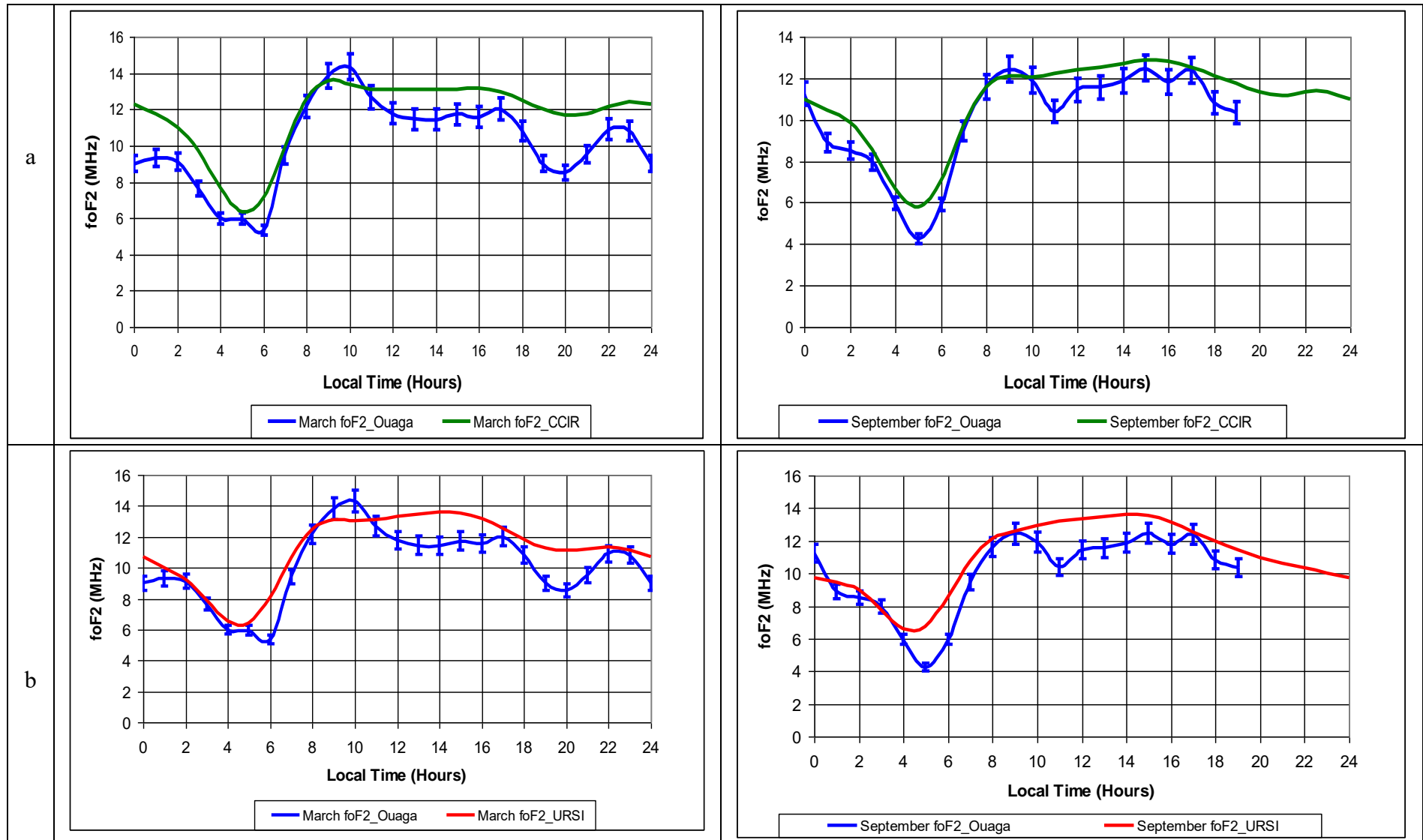


Figure 5.10.1 : Maximum solaire (année 1990, Ouattara 2012)

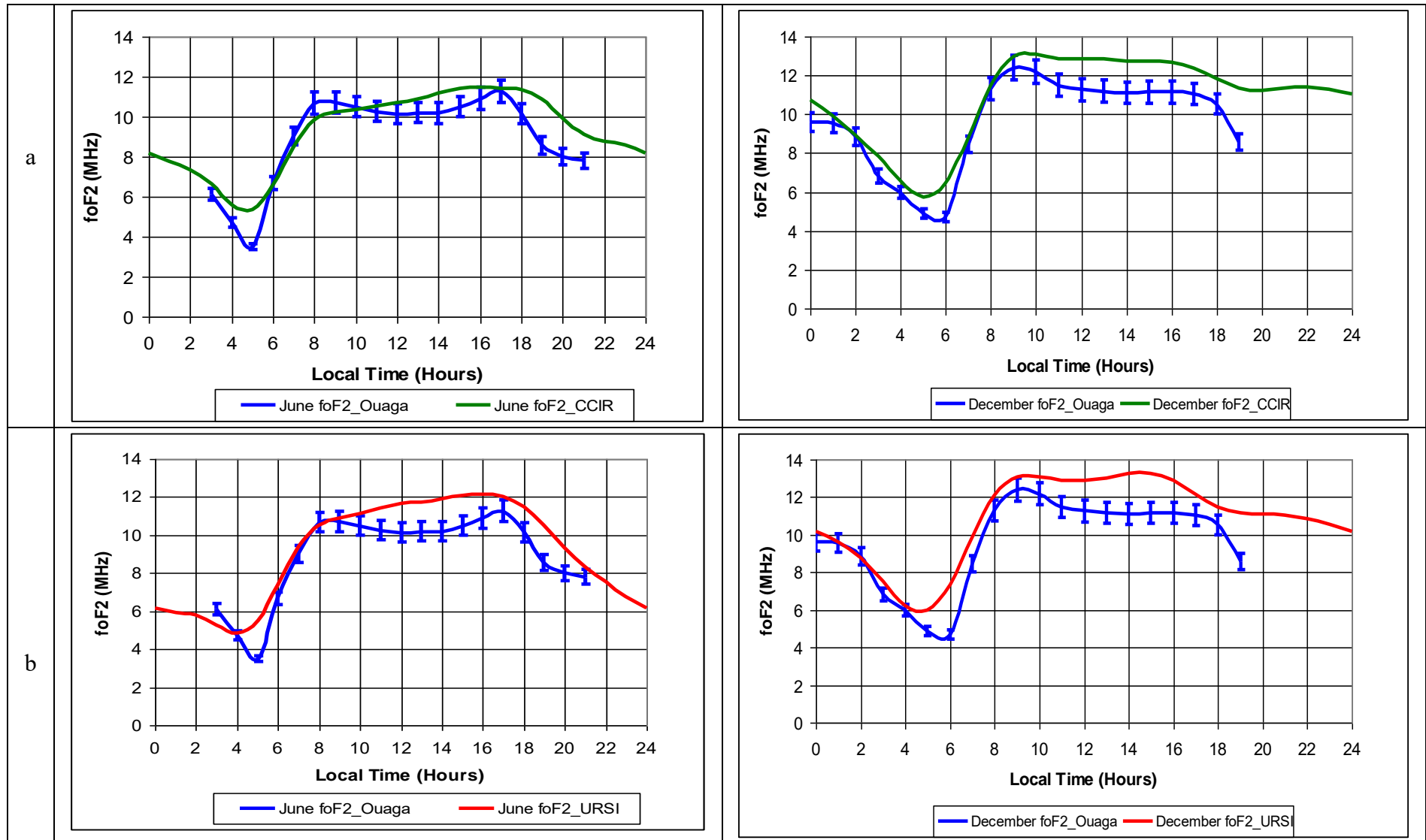


Figure 5.10.2 : Maximum solaire (année 1990, Ouattara 2012)

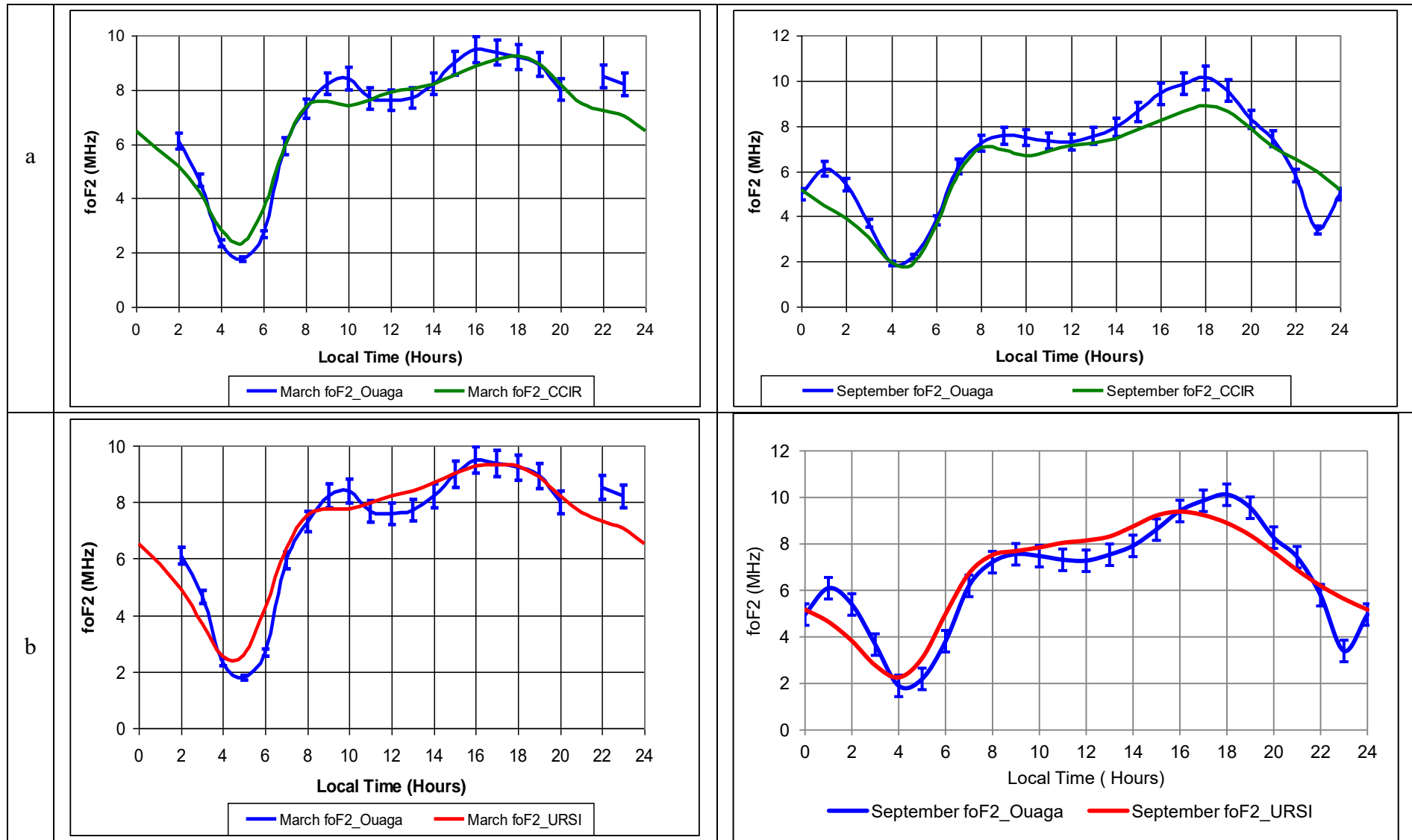


Figure 5.11 .1 : Minimum solaire (année 1986, Ouattara 2012)

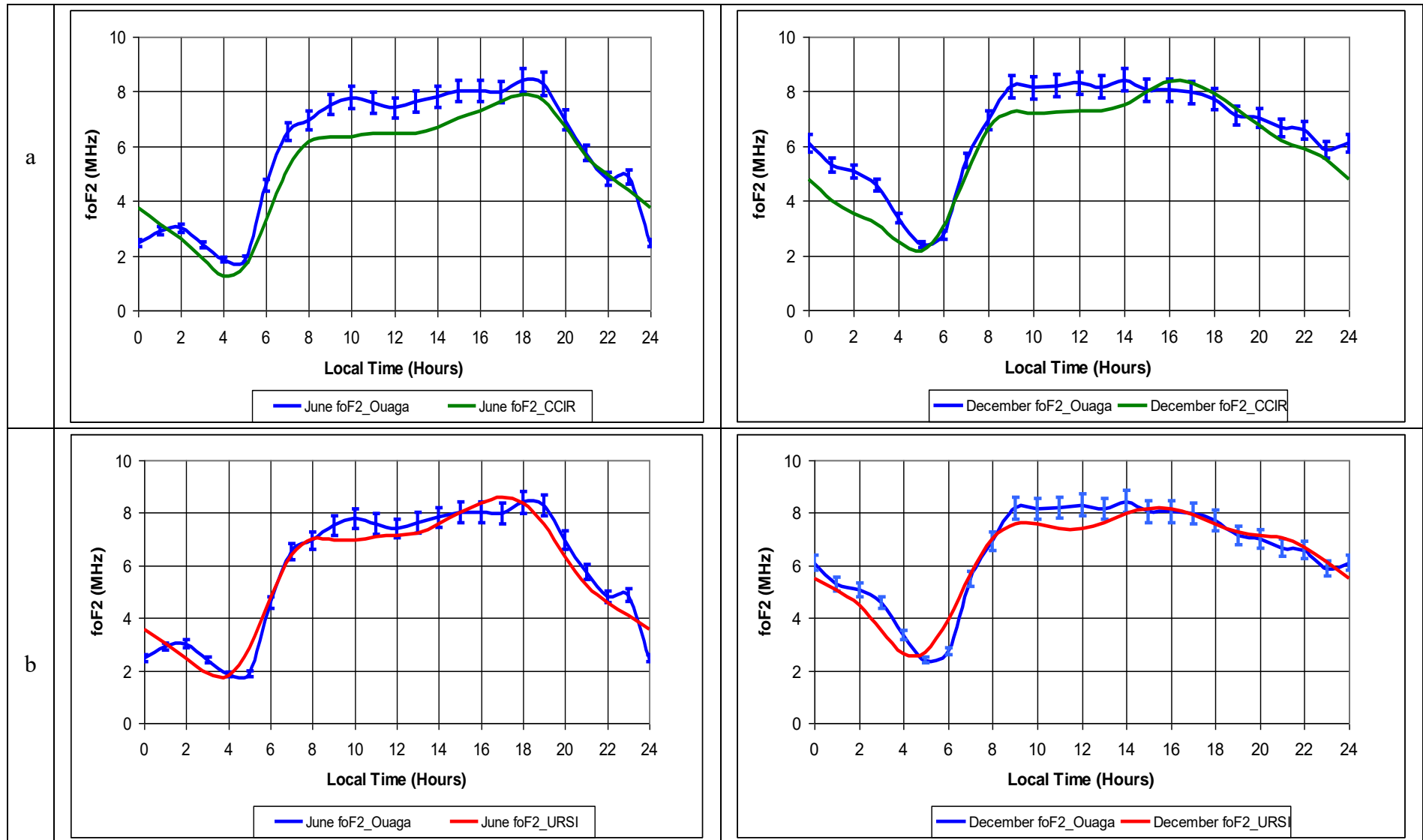


Figure 5.11.2 : Minimum solaire (année 1986, Ouattara 2012)

Phase ascendante : année 1987

Les variations des observations de la fréquence critique foF2 donnent un profil d'évolution de type "B" avec un pic très important dans l'après-midi pour les équinoxes de Mars et Septembre (Figure 12.1). Le premier pic se situe vers 09h00 (8,2 MHz) pendant que le second a lieu autour de 18h00 (9 MHz) temps local. Pour les mêmes périodes, les prédictions avec le modèle IRI (IRI-CCIR et IRI-URSI) ne présentent qu'un profil de type "R". Les meilleures approximations entre les prédictions et les observations sont obtenues en Mars avec le modèle IRI-CCIR et en Septembre avec le modèle IRI-URSI.

Au cours des mois de solstice, les mesures in situ présentent des profils différents : profil de type "P" pour le mois de Juin et profil de type "B" pour Décembre avec un pic vers 21h00. Pour le profil R le maximum a lieu entre 15h00 et 19h00 (8,2-8,9 MHz). Les deux pics majeurs dans le profil B se situent respectivement à 9h00 (8,2 MHz) et 16h00 (8,9 MHz). A l'exception du mois de Juin où les prédictions avec IRI-URSI et les mesures in situ semblent se confondre, il apparaît clairement que les prédictions sont largement supérieures aux mesures d'observation en Décembre, du lever jusqu'au coucher du soleil. Il résulte des ces comparaisons que les meilleures prédictions des valeurs de foF2 au cours de la phase ascendante du cycle solaire sont données pour les équinoxes en Mars avec le modèle IRI-CCIR (Figure 12.1) et pour les solstices en Juin avec le modèle IRI-URSI (Figure 12.2).

Par simple comparaison, il ressort que les prédictions IRI sont meilleures au cours de la phase ascendante qu'au minimum de phase du cycle.

Phase descendante : année 1994

Au cours de la phase descendante du cycle solaire, les mesures in situ offre un profil de type "B" pour les équinoxes de Mars et Septembre comme le montre la figure 13.1. Le premier pic survient autour de 9h00 et le second vers 17h00. Au cours de cette phase et pour les mêmes périodes, les prédictions avec le modèle IRI-2007 donnent, pour toutes ses versions, un profil de type "P" avec un important pic soir.

Le modèle IRI-CCIR donne la meilleure prédiction des valeurs de foF2 (mois de Mars) au cours de cette phase du cycle solaire.

La figure 13.2 montre les profils de foF2 au cours des solstices de Juin et Décembre. Ici, les mesures in situ montrent une évolution plateau qui semble être en bonne corrélation avec le profil "P" obtenu avec les modèles IRI-CCIR et IRI-URSI. L'impressionnante observation au cours de cette phase est la remarquable approximation des modèles CCIR et URSI avec les mesures in situ des valeurs de la fréquence critique foF2 de l'ionosphère équatoriale pendant le solstice de Juin. Pour le mois de Décembre, il apparaît une quasi-parfaite corrélation entre les modèles et les données mesurées entre le lever du soleil et le coucher du soleil. D'une manière générale, le modèle IRI-CCIR offre les meilleures prédictions pour les solstices au cours de la phase descendante du cycle solaire.

Les variations d'une saison à l'autre observées sur les périodes de calmes magnétiques proviennent du couplage des mouvements de dérive du champ électrique zonal de la dynamo locale.

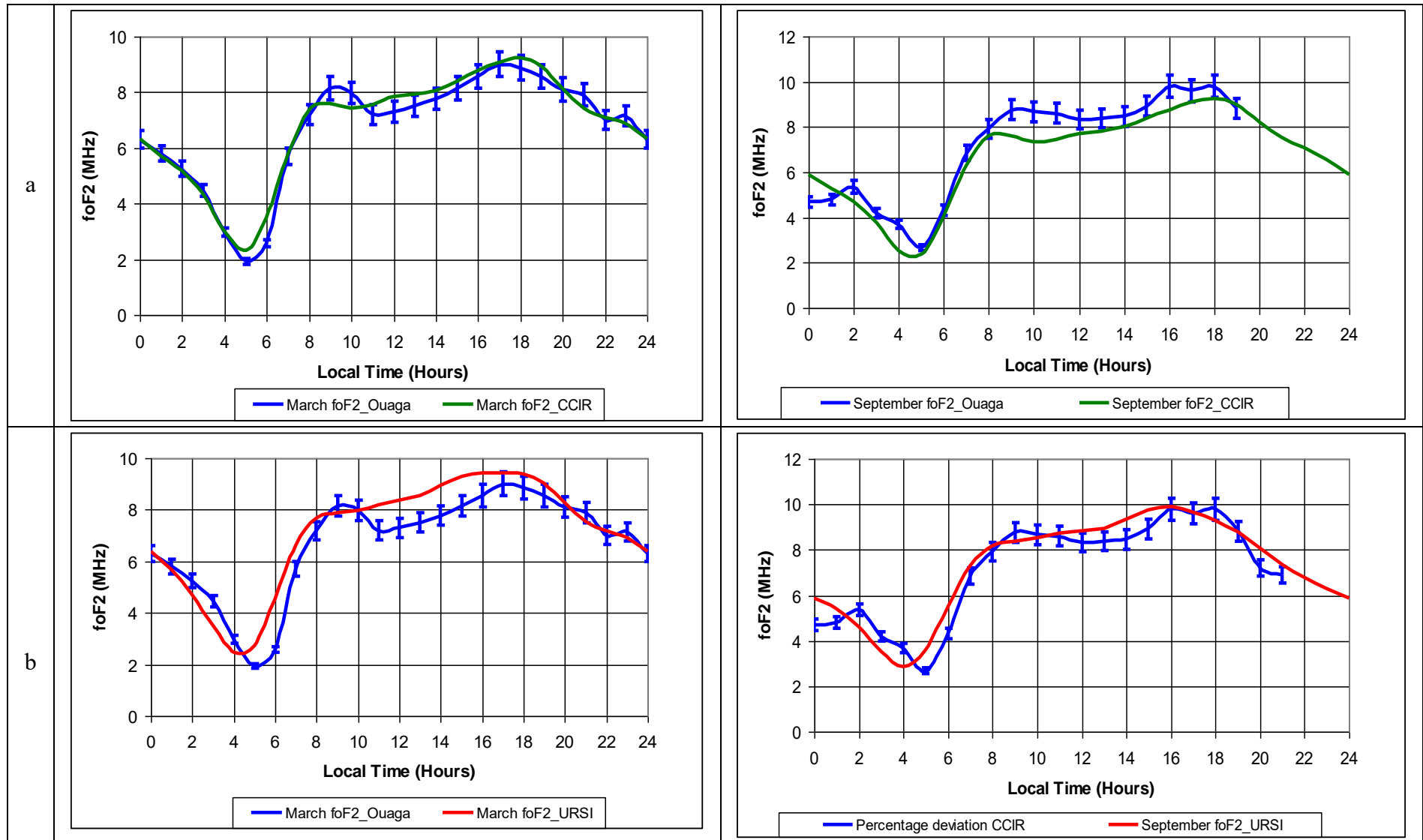


Figure 5.12.1 : Phase ascendante (année 1987, Ouattara 2012)

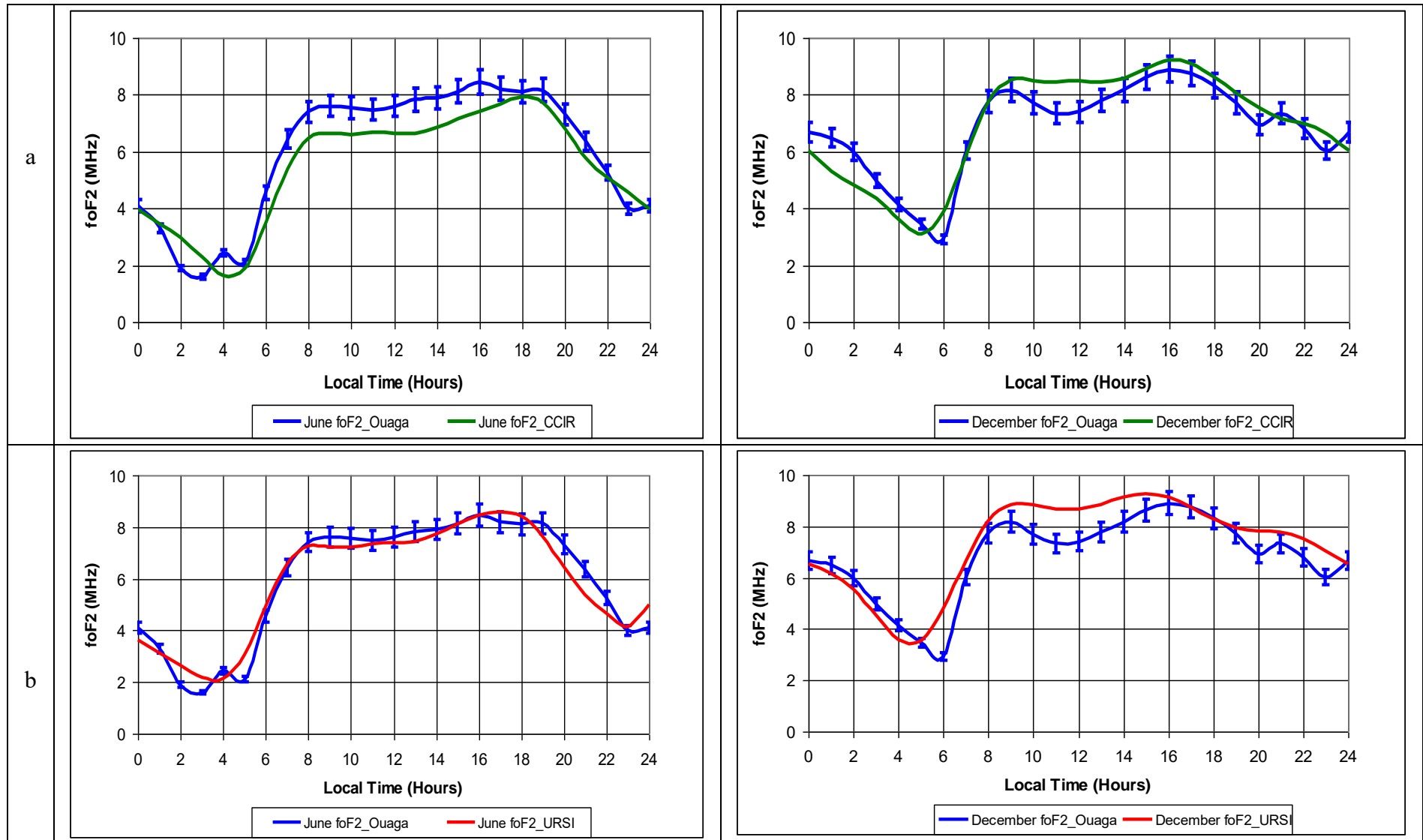


Figure 5.12.2 : Phase ascendante (année 1987, Ouattara 2012)

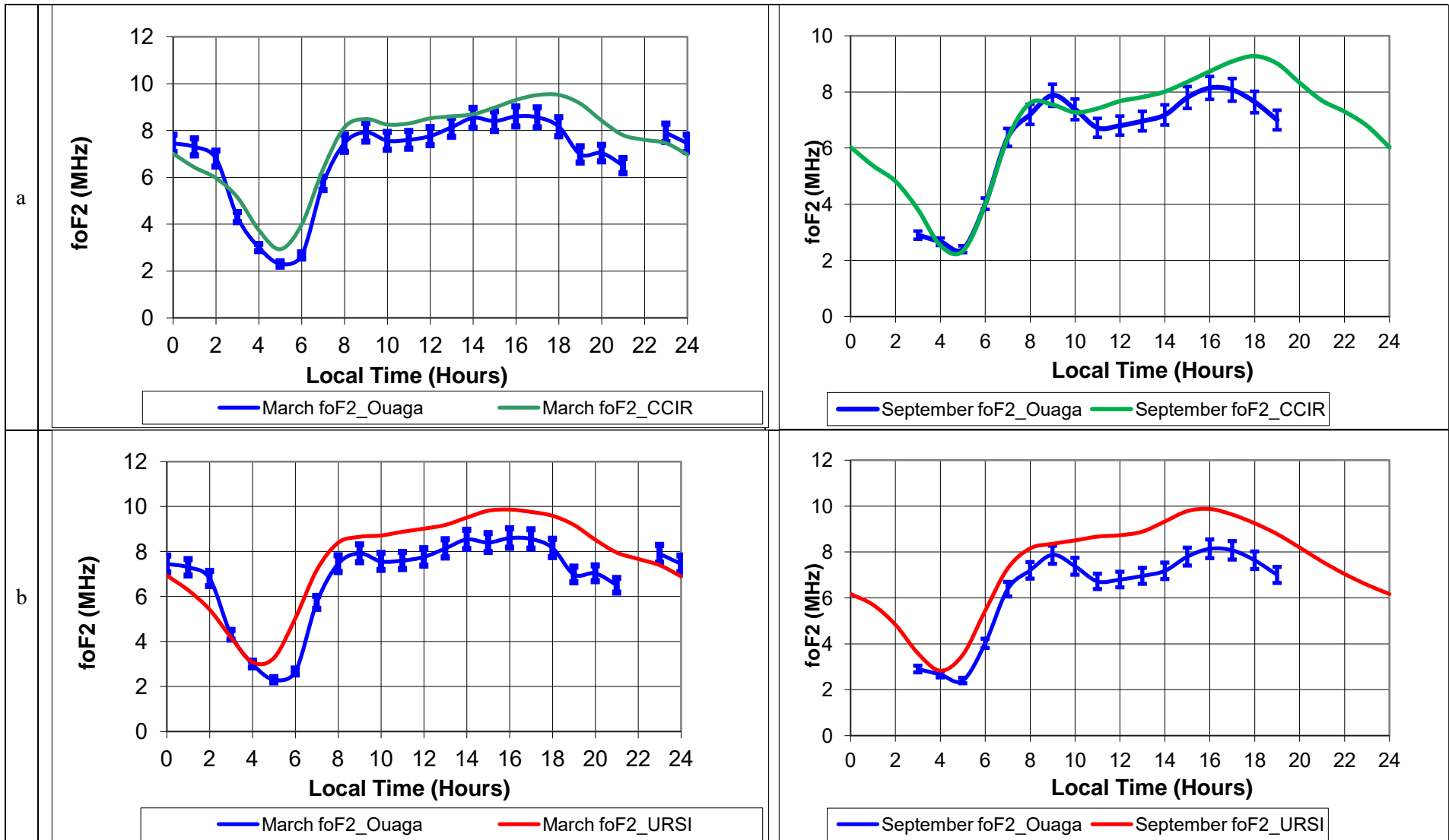


Figure 5.13.1 : Phase descendante (année 1994, Ouattara 2012)

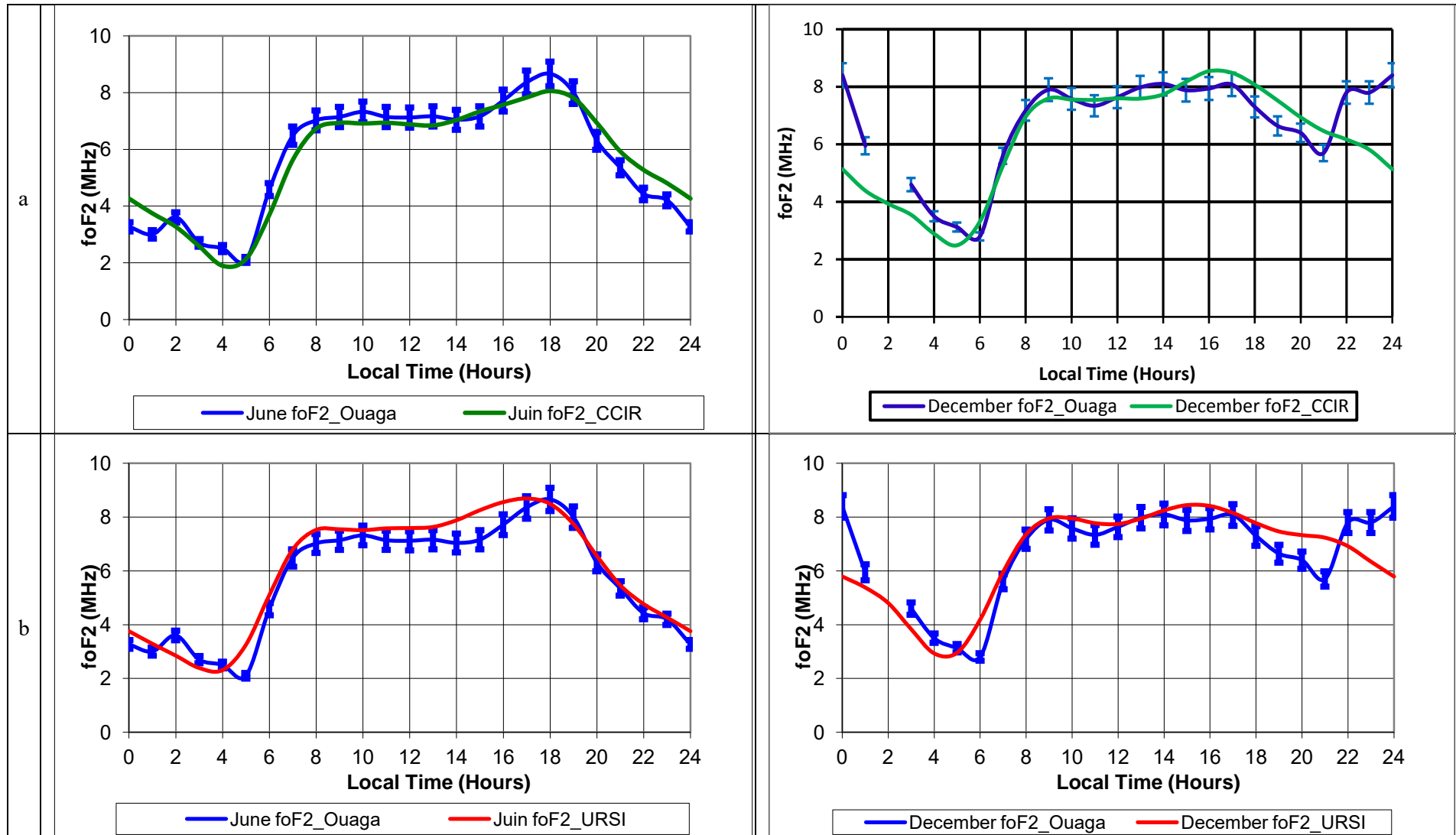


Figure 5.13.2 : Phase descendante (année 1994, Ouattara 2012)

5.3.3. Appréciation du Modèle IRI

Pour apprécier le modèle IRI-2007 en ses versions CCIR et URSI, nous avons évalué l'écart moyen (paragraphe 5.3.1), en terme de taux de déviation standard σ , entre les prédictions IRI et les données des mesures in situ de la fréquence critique de l'ionosphère équatoriale de la stations d'observation de Ouagadougou.

Si $\sigma > 0$, le modèle IRI sous-estime la valeur de la fréquence critique et lorsque $\sigma < 0$ IRI la surestime.

La figure 14.1 récapitule les différents pourcentages de déviation des prédictions CCIR et URSI pendant les quatre phases du cycle solaire pour les équinoxes de Mars (Figure 14.1a) et de Septembre (Figure 14.1b). De l'analyse de cette figure, il apparaît clairement que les modèles URSI et CCIR présentent des variabilités semblables en taux de déviation pour toutes les phases du cycle solaire à l'exception de la phase ascendante pour l'équinoxe de Septembre qui montre des taux relativement faible. Pour cette période d'exception, il est facile de constater que la précision des prédictions est néanmoins mauvaise entre 00h00 et 06h00 temps local. D'une manière générale, les précisions des prédictions sont acceptables de 08h00 au coucher du soleil pour la plupart de phases du cycle solaire. Toutefois, le maximum de phase se distingue toujours par un important taux de déviation entre 08h00 et 11h00. En définitive, la meilleure précision est obtenue au cours de la phase ascendante du cycle solaire et la plus mauvaise revient au maximum du cycle solaire. Les courbes de la Figure 14.1 montrent également qu'avant 04h00 les prédictions avec IRI-CCIR sont meilleures qu'avec celles faites avec IRI-URSI au cours du minimum et de la phase ascendante. Au cours au maximum de phase c'est le phénomène contraire qui est observé.

La figure 14.2 résume les pourcentages de déviation pour les modèles URSI et CCIR durant les mois de solstice : Juin (figure 14.2a) et Décembre (Figure 14.2b). Exception faite pour le minimum et la phase ascendante de Décembre, toutes les courbes

présentent un profil similaire. Au cours du minimum et du maximum de phase du cycle solaire, les prédictions des valeurs de foF2 sont meilleures avec le modèle IRI-CCIR. Contrairement aux résultats précédents, les prédictions sont meilleures avec le modèle URSI pendant la phase ascendante.

Que nous soyons en saison d'équinoxe ou de solstice, les prédictions (bien que mauvaises) avec la subroutine CCIR sont meilleures que celles faites avec la subroutine URSI au cours de la phase descendante du cycle solaire.

Cette étude comparative, montre clairement que les prédictions sont meilleures au minimum et au cours de la phase ascendante du cycle solaire et cela, même pour les périodes de relatif calme magnétique.

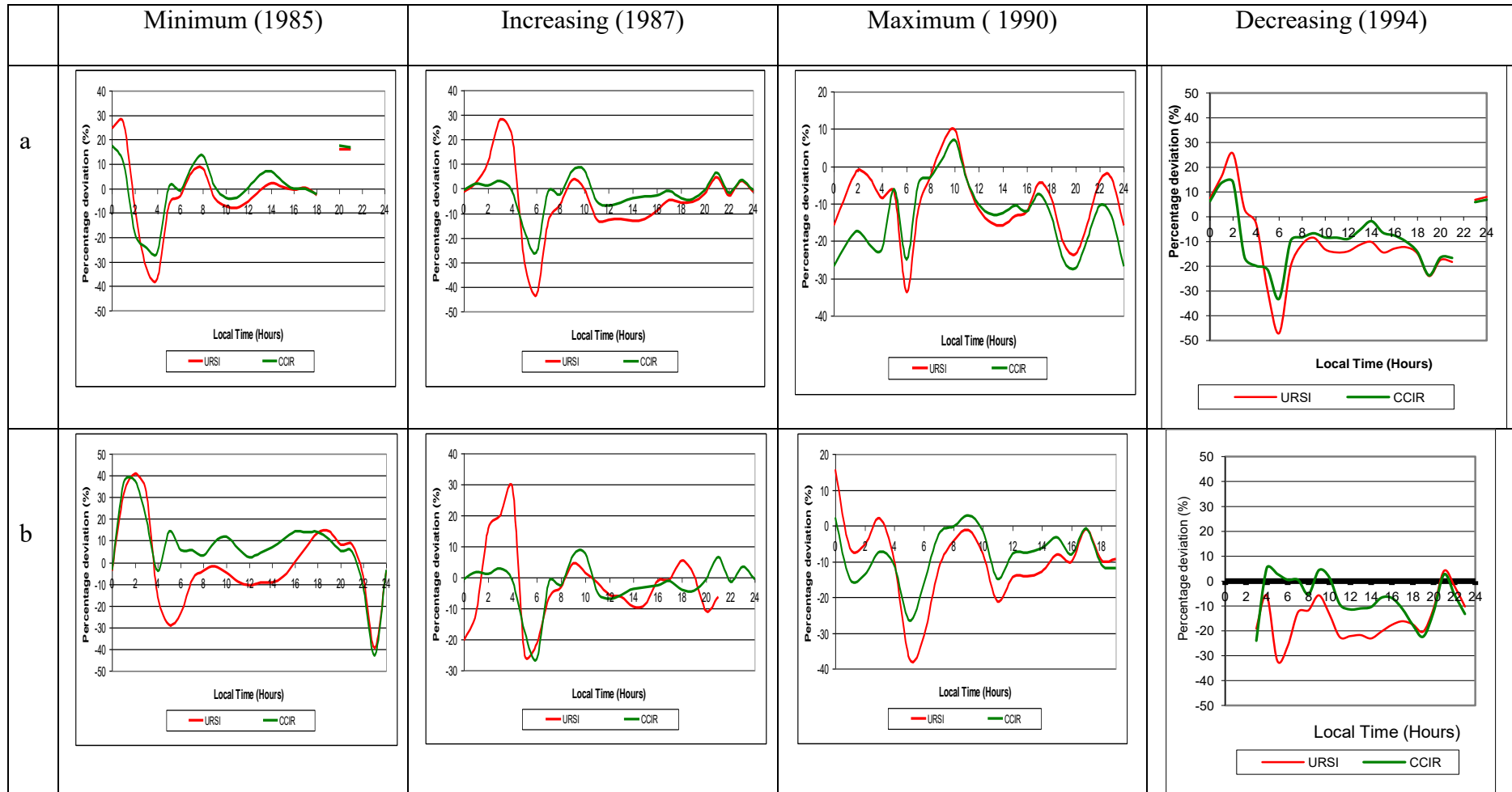


Figure 5.14.1 : Saisons d'équinoxe(Ouattara 2012)

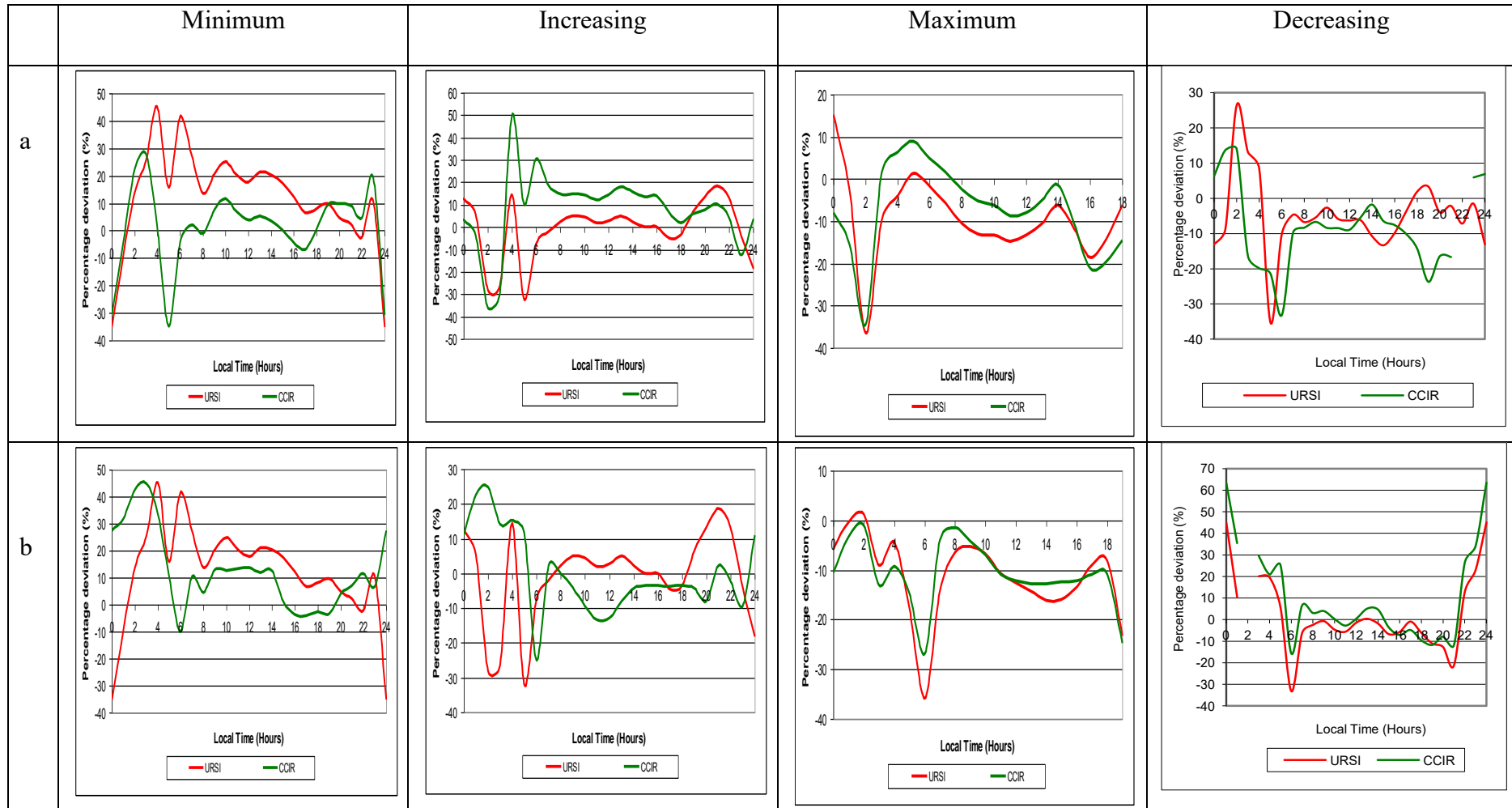


Figure 5.14.2 : Saisons de solstice (Ouattara, 2012)

Conclusion

Le soleil provoque d'importantes modifications aux voisinages de l'environnement proche de la terre. Nous avons étudiée ici les effets des gros orages magnétiques et ceux des vents solaires rapides à caractère fluctuant, sur la couche F2 de l'ionosphère reliés à la source vent solaire. De résultats intéressants ont été obtenus à partir de l'étude de la variation de la fréquence critique foF2 et de la hauteur virtuelle :

- 1) La répartition mensuelle des perturbations magnétiques les plus élevées ($A_a > 100$ nT) présente une asymétrie équinoxiale;
- 2) Les plus gros orages surviennent pendant les équinoxes;
- 3) Les grosses éjections de masse coronale engendrent le pic de mars et les intenses activités fluctuantes provoquent le pic d'Octobre dans le profil d'évolution de la fréquence critique foF2;
- 4) l'activité de choc est responsable du creux observé dans de la hauteur virtuelle en octobre.

Un autre aspect important de notre étude est l'appréciation des prédictions faites avec le modèle IRI-2007 en ses variantes URSI et CCIR pour la détermination des valeurs de foF2 durant les jours magnétiquement calmes correspondant à la source rayonnement solaire. L'examen des taux de déviation qui traduisent la dispersion des prédictions par rapport aux valeurs mesurées montre que les meilleures prédictions sont faites avec le modèle CCIR au cours du minimum du cycle de taches et durant sa phase ascendante. Toutefois des dispersions non négligeables sont aussi observées sur toutes les phases du cycle solaire pour les périodes de calme magnétique. Ceci indique la nécessité de réviser le modèle en vu de l'améliorer et l'étendre au période magnétiquement perturbées ($A_a \geq 20$ nT, Legrand et Simon, 1989 ; Zerbo et al., 2012a).

Article: Ouattara et Zerbo, 2011

Ouagadougou station F2 layer parameters yearly and seasonal variations during severe geomagnetic storms generated by coronal mass ejections (CMEs) and fluctuating wind streams.

Frédéric Ouattara and Jean-Louis Zerbo

International Journal of Physical Sciences, Vol.6 (20), pp.4854-4860.

Full Length Research Paper

Ouagadougou station F2 layer parameters, yearly and seasonal variations during severe geomagnetic storms generated by coronal mass ejections (CMEs) and fluctuating wind streams

Frédéric Ouattara^{1*} and Jean Louis Zerbo²

¹Ecole Normale Supérieure, Université de Koudougou, Burkina Faso.

²Université polytechnique de Bobo Dioulasso, 01 BP 1091, Bobo Dioulasso 01, Burkina Faso.

Accepted 20 June, 2011

Solar sources of geomagnetic activity are determined by means of (1) Mayaud aa index values from 1868 to now; (2) sudden storm commencement (SSC) dates and (3) pixel diagrams. From 1966 to 1998 that is, during 33 years severe geomagnetic storms characterised by $aa \geq 100$ nT have been identified and their solar sources determined. During these three solar cycles (cycles 20, 21 and 22) the effects of these solar disturbance events on Ouagadougou ionosphere F2 parameters (foF2 and h'F2) variations are studied. Each disturbed F2 parameters morphology variations are computed and shown and after compared to each whole F2 parameters morphology variation. The analysis of whole and disturbed F2 parameter morphologies and their variations gives the main following results: (1) Severe storms are responsible for equinoctial anomaly in foF2; (2) shock activity causes vernal equinoctial asymmetry in foF2 and autumnal equinoctial asymmetry in h'F2; (3) fluctuating wind streams produce autumnal equinoctial asymmetry in foF2 and vernal equinoctial asymmetry in h'F2; (4) Geomagnetic activities produced negative storms from 1966 to 1981 and positive storms from 1981 to 1987; (5) For the seasonal variation we have positive storms all through the year except in April where we observe negative storms.

Key words: Coronal mass ejections (CMEs), fluctuating wind streams, equinoctial anomaly, geomagnetic activity.

INTRODUCTION

It is well-known the four geomagnetic classes of activity (Legrand and Simon, 1989; Simon and Legrand, 1989; Richardson and Cane, 2000; Richardson et al., 2002). Following Legrand and Simon's Classification, we distinguish: (1) quiet days activity and disturbed days activity which is divided into three classes: (2) shock activity generated by coronal mass ejections (CMEs), (3) recurrent activity due to high wind streams coming from coronal hole and (4) Fluctuating activity caused by

fluctuating winds stream due to the fluctuation of solar heliosheet. Quiet days activity is obtained by considering daily $aa < 20$ nT and disturbed activity is determined by taking into account daily $aa \geq 20$ nT. This paper is concerns with disturbed activity characterized by daily $aa \geq 100$ nT. For this aa condition, only shock and fluctuating activities are concerned. Recurrent activity is excluded by this study for the major daily aa which contributed to this geomagnetic activity is inferior to 100 nT (Ouattara and Amory, 2009). Our goal is to study the impact of severe geomagnetic storms ($aa \geq 100$ nT) generated by CMEs and fluctuating wind streams in F2 region. Thus, we use aa pixel diagrams (for example, Figure 1: pixel diagram of year 2004) to determine each daily class of activity. In Figure 1, white and blue colours correspond to quiet day activity and the others to disturb

*Corresponding author. E-mail: fojals@yahoo.fr

Abbreviations: CMEs, Coronal mass ejections; NGDC, National Geophysical Data Center.

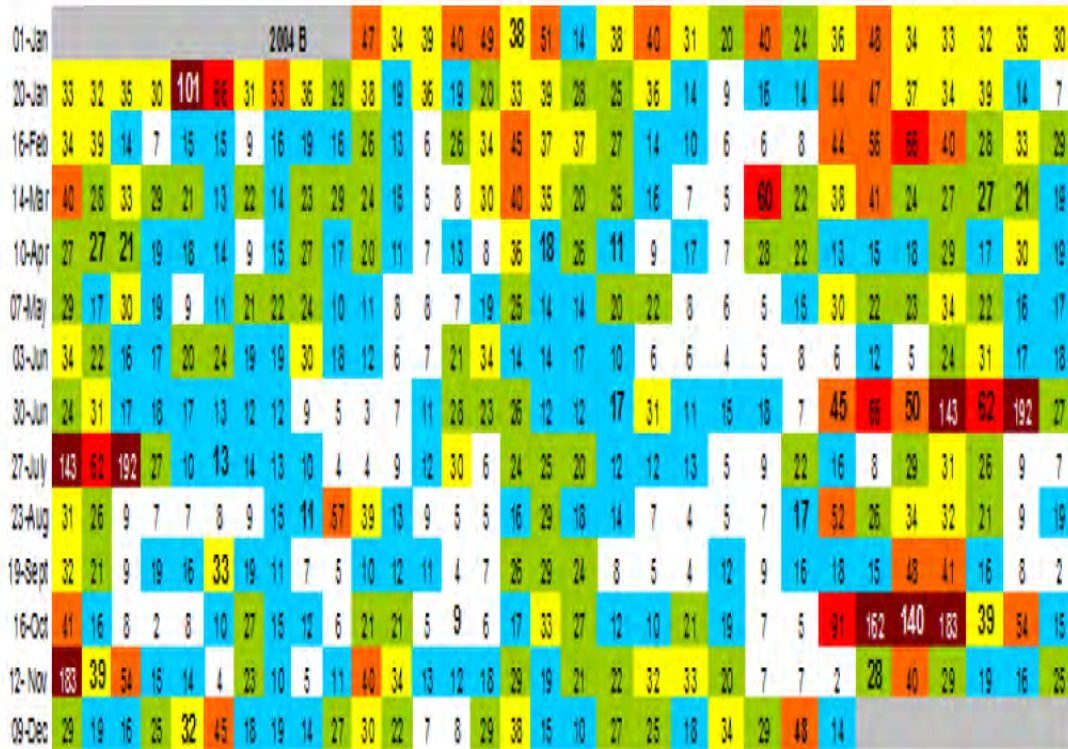


Figure 1. Different classes of geomagnetic activity during year 2004: Pixel diagram of year 2004.

one. As each line of the diagram corresponds to one Bartels rotation, several rotations with orange or red colour indicate recurrent activity. The merged disturb colours (green, yellow, orange, red and olive red) indicate the presence of fluctuating activity. Shock activity begins by sudden storm commencement (SSC) days (days with black thick aa value in Figure 1) and is identifying by one, two or three days with orange, red or olive red colour. After that, we select the corresponding days values of F2 layer parameters (foF2 and hF2). Yearly and seasonal variation of these selected days (CMEs and fluctuating days) F2 layer parameter values are performed and compared with the whole yearly and seasonal F2 layer parameter values respectively. This study

objectives are (1) to show the effects of disturbed solar events (CMEs and fluctuating wind streams) in African equatorial F2 region parameters (foF2 and hF2) yearly and monthly morphological variations; (2) to point out the contribution of each type of disturbance on the variability of foF2 equinoctial maxima, and (3) to exhibit ionosphere variability under each type of disturbance.

DATA SETS

Data used in this work are provided by ENST Bretagne. The data concern F2 layer parameters (foF2 and hF2) which are obtained by using Ouagadougou ionosonde station (12.4°N, 1.5°W; dip +5.9). This station worked from June 1966 to February 1998. We also used geomagnetic activity indice (aa) computed by Mayaud (1971, 1972,

1973) and solar activity indice F10.7 obtained from National Geophysical Data Center (NGDC) data base.

METHODOLOGY

Determination of daily values of aa, foF2 and hF2 contributing to shock activity and fluctuating activity

In this paper, we analyse the effect of severe shock and fluctuating activities (aa >= 100 nT) in the F2 layer parameter (foF2, hF2) behaviours. The whole values of aa >= 100 nT from June 1966 to February 1998 (72 values) are identified in aa pixel diagrams which corresponding to 33 years (from 1966 to 1998). The method of identifying the contribution of the shock activity and the part of the fluctuating activity is: (1) we identify in given pixel diagrams severe geomagnetic activities (shock and fluctuating activities) by olive red colours corresponding to aa >= 100

Table 1. Severe shock and fluctuating activities days and Aa values during year 2004.

	Line 1		Line 8			Line 12				
	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)	Date	Aa (nT)
Shock	22 January	101					9 November	140	10 November	183
Fluctuating			25 July	143	27 July	192	8 November	162		

nT. SSC dates help us for the determination of shock activity days. These days aa values are expressed by thick black daily values of aa in pixel diagrams. (2) Daily values contributing to shock activity are those with no recurrent SSC. This condition includes effectively the corresponding day and one or two additional days after the non recurrent SSC day. Fluctuating wind stream activity days are obtained by selecting on the one hand days with recurrent SSC and on the other hand by taking into account days with severe geomagnetic activity days without SSC. For example, Table 1 gives severe shock activity and fluctuating activity day values and aa values for the year 2004 extracted from 2004 pixel diagram. It can be seen in this table that during the year 2004, we have 3 severe shock activities and 3 severe fluctuating activities. After the determination of daily foF2 and h'F2 which contribute to severe shock and fluctuating activities by mean of pixel diagrams of years 1966 – 1998, we calculate these parameters monthly values by averaging daily values. Annual values are obtained by averaging daily values also.

Determination of "theoretical" and "anomaly" values of F2 parameters

Figure 2 shows foF2 (panel a) and h'F2 (panel b) variations as F10.7 function. In panel a of Figure 2, one can see very good correlation between the critical frequency of F2 layer and the solar activity parameter F10.7 (correlation coefficient 0.953) and good anti correlation between the latter parameter and the virtual height of F2 layer (anti correlation coefficient 0.585) in panel b. Such results show the 11-years periodicity of yearly foF2 and yearly h'F2 data. This periodicity is not consistently 11-years when the time scale is changed. In fact, according to Somoye (2009) hourly average of foF2, some hours exhibits 8-years periodicity while in some the periodicity is 14-years. The present results show that each F2 layer parameter can be expressed as a proxy of F10.7. For that, we are able to appreciate each severe disturbed storm effect by using regression analysis. For this analysis, "theoretical" value (named here Y') of each experimental F2 layer parameter values (named here Y) is defined as a function of F10.7 by reference to the linear dependence between each F2 layer parameter and F10.7 (Figure 2). This function can be expressed as: $Y' = a F10.7 + b$ with a and b as coefficients. The "anomaly" parameter (expressed here by ΔY) is obtained by subtracting theoretical values (Y') from experimental values (Y). "Anomaly" parameter is given by the following equation:

$$\Delta Y = Y - Y'$$

It is important to note that Y' corresponds to the part of sunspot cycle that is, the part due to the toroidal component of solar magnetic field, and ΔY evaluates the part of the action of the poloidal component of solar magnetic field. Thus each parameter depends on the effect of the two components of solar magnetic.

RESULTS AND DISCUSSION

Yearly variations of "theoretical" and "anomaly" values of

F2 layer parameters (foF2 in panel a and h'F2 in panel b) are shown in Figure 3. In Figure 3, theoretical value variations are given by full curve while dotted curve expresses anomaly value variations. Figure 3 highlights the part of each solar magnetic component in foF2 and h'F2 variability during fairly 3 solar cycles. In panel a, it can be seen that maximum peaks of foF2 "anomaly" variation appear during increasing and decreasing solar phases. These observations show that out of solar maximum the annual variability of foF2 may be due to severe geomagnetic activity (fluctuating activity) provoked by the fluctuation of solar heliosheet. In fact, it is well known that shock due to CMEs is a manifestation of solar toroidal magnetic field, and fluctuating solar wind is due to solar poloidal magnetic field (Legrand and Simon, 1989; Simon and Legrand, 1989; Ouattara, 2009). Panel b shows that during solar minimum h'F2 is maximum. We can retain from Figure 3 that CMEs increase electron density at solar maximum and fluctuating solar wind increases electron density during increasing and decreasing phases. The height of F2 layer is higher at solar minimum and lower at solar maximum. Figure 4 concerns the distribution of the number of severe disturbed days throughout the year for the whole 3 solar cycles. Figure 4 shows that there are more disturbed days during equinoctial months. It can be seen equinoctial asymmetry in the evolution of severe disturbed days. Figure 5 gives monthly F2 layer parameter variations. Experimental values (which can be also called here global values: sum of "theoretical" values and "anomaly" values) variability is given by full curve. Disturbed values variability is expressed by dotted curve. Figure 5 describes the impact of disturbed geomagnetic activity in foF2 and h'F2 monthly variations. Panel a shows that, disturbed activity has no effect in foF2 profile trough. Equinoctial peaks are due to disturbed activity. In panel b it emerges that the trough of March equinox is not due to disturbed activity. Figure 6 highlights the effect of each disturbed activity (shock and fluctuating activities) on monthly F2 critical frequency. In panels a and b, full curves concern experimental and disturbed value variations respectively. Dotted curves give the variation of shock geomagnetic indice aa values. In panels c and d, full curves show experimental and disturbed values variability respectively. Dotted and dashed curves highlight fluctuating geomagnetic aa value variations. Panel a shows that, shock activity has no effect in foF2 profile trough. March equinoctial peak may be due to shock activity. Panel b confirms that March equinoctial peak is

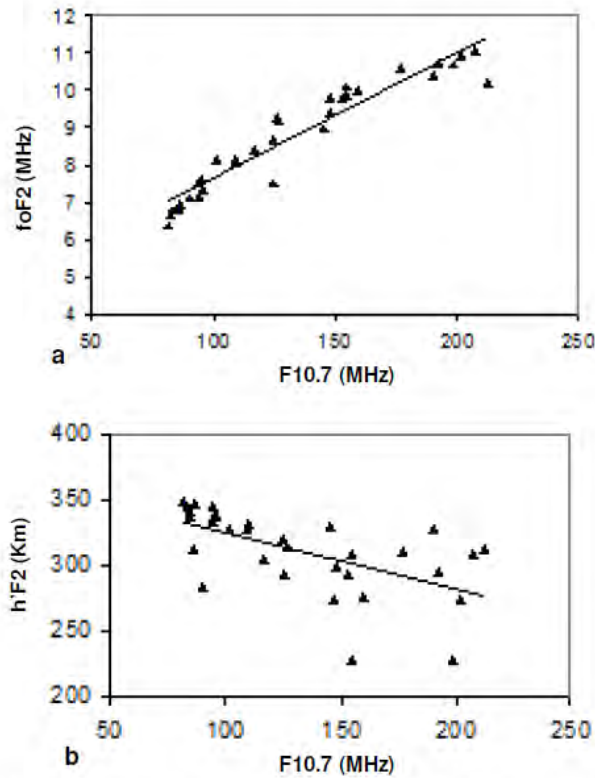


Figure 2. Correlation between F2 layer parameters and solar flux index (a) Correlation between foF2 and F10.7 (b) Correlation between h'F2 and F10.7.

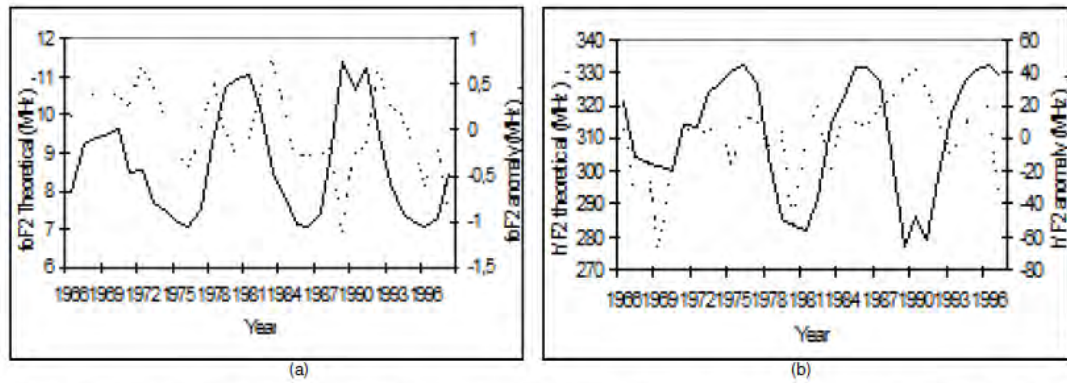


Figure 3. Yearly variation of theoretical and anomaly values of F2 layer parameters. a) Yearly variation of theoretical and anomaly values of foF2. b) Yearly variation of theoretical and anomaly values of h'F2.

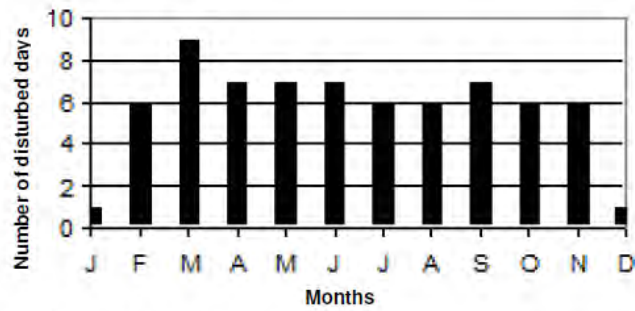


Figure 4. Monthly evolution of disturbed days number.

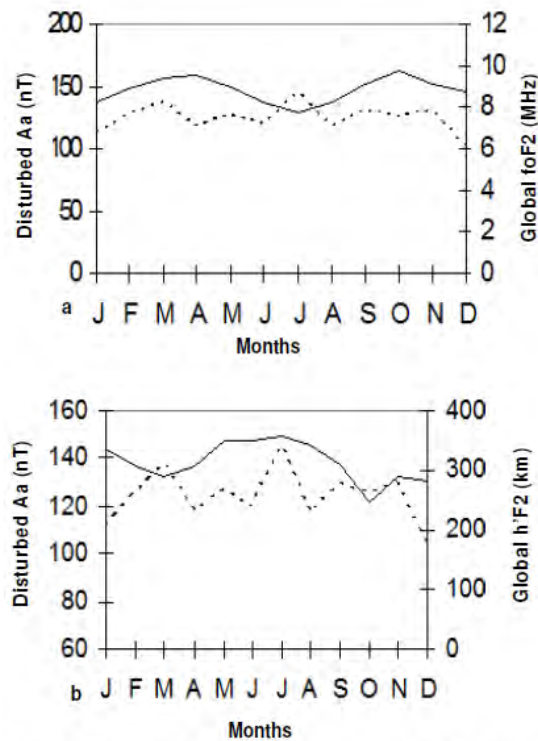


Figure 5. a, Monthly effects of disturbed Aa in whole foF2; b, Monthly effects of disturbed Aa in whole h'F2.

due to the effect of shock activity. In panel c, it can be seen that October equinoctial peak is due to fluctuating

activity. Panel d exhibits the effect of fluctuating activity in October equinoctial peak. Figure 7 describes the effect of

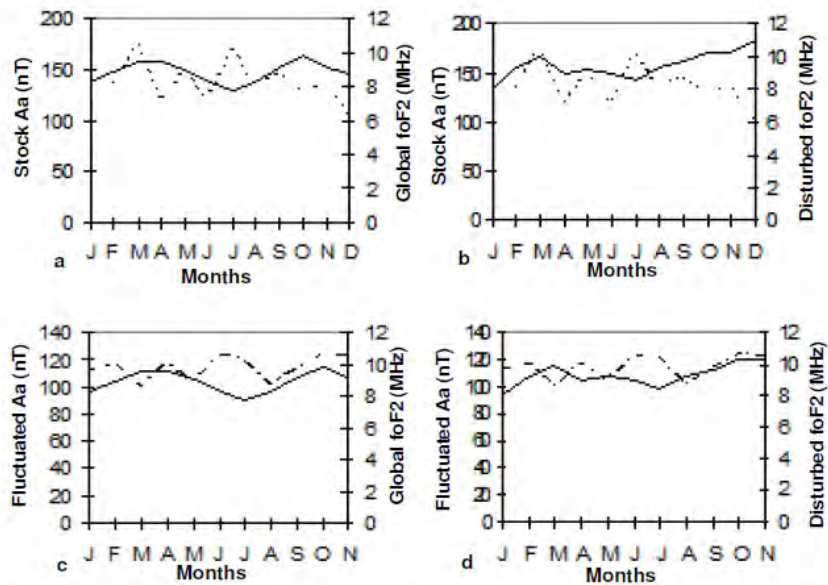


Figure 6. Monthly effects of shock and fluctuated Aa in F2 layer global critical frequency and disturbed critical frequency values (a) Monthly effects of shock Aa in whole foF2 (b) Monthly effects of shock Aa in disturbed foF2 (c) Monthly effects of fluctuated Aa in whole foF2 (d) Monthly effects of fluctuated Aa in disturbed foF2.

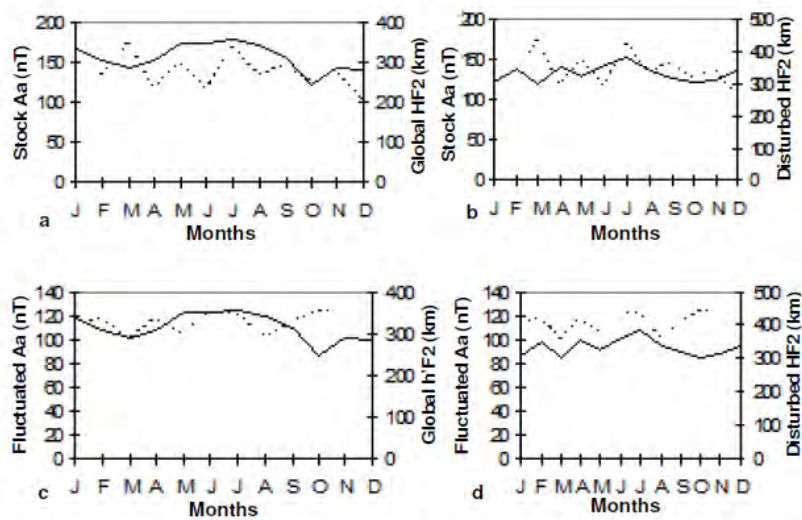


Figure 7. a, Monthly effects of shock Aa in whole h'F2; b, monthly effects of shock Aa in whole disturbed h'F2; c, monthly effects of fluctuated Aa in whole h'F2; d, monthly effects of fluctuated Aa in disturbed h'F2.

different disturbed activities (shock and fluctuating activities) in the h'F2 monthly profile. In panels a and b, full curves concern experimental and disturbed value variations respectively. Dotted curves express the variation of shock geomagnetic indice aa values. In panels c and d, full curves show experimental and disturbed value variability respectively. Dotted curves highlight fluctuating geomagnetic aa value variations. One can see that in panel a, shock activity contributes to summer maximum, and is responsible for October equinoctial trough in h'F2 profile. Panel b confirms such observation and highlights that from July to December h'F2 monthly profile is due to shock activity. In panel c fluctuating activity contributes to summer maximum and is responsible for March equinoctial trough. Panel d shows that from January to July fluctuating activity determines h'F2 monthly profile.

Conclusion

This study allows us to identify the effect of each solar magnetic field component in F2 layer parameters. Severe fluctuating activity acts during increasing and decreasing phases, and severe shock activity produces severe geomagnetic storms during solar maximum. Monthly severe disturbed days show equinoctial asymmetry. Severe geomagnetic storms occur during equinoctial months. Severe shock produces March peak and fluctuating wind provokes October peak in foF2 profile. Shock activity contributes to summer maximum and is responsible for October equinoctial trough in h'F2 profile. Fluctuating activity contributes to summer maximum and is responsible for March equinoctial trough. The present results constitute the first step toward the analysis of the impact of each class of disturb activity (shock activity, re-current activity and fluctuating activity) in foF2 asymmetry and equinoctial through in h'F2 profile.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors thank Ecole National de Télécommunication de Bretagne for providing ionosonde data and ex Centre d'étude des Environnements Terrestres et Planétaires for aa geomagnetic data. Authors also thank (1) Inspector Paulin Somé for proof reading and (2) the reviewers and IJPS Editor for their remarks and suggestions which allow us to improve the paper.

REFERENCES

- Cander LR, Mihajlovic SJ (1998). Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 103: 391-398.
- Field PR, Rishbeth H (1997). The response of the ionospheric F2-layer to geomagnetic activity: an analysis of worldwide data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59: 163-180.
- Field PR, Rishbeth H, Moffett RJ, Idenden DW, Fuller-Rowell TJ, Millward GH, Aylward AD (1998). Modelling composition changes in F-layer storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60: 523-543
- Fuller-Rowell TJ, Codrescu MV, Moffett RJ, Quegan S (1994). Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 99: 3893-3914.
- Fuller-Rowell TJ, Codrescu MV, Rishbeth H, Moffett RJ, Quegan S (1996). On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 101: 2343-2353
- Legrand JP, Simon P (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. *Ann. Geophys.* 7(6) : 565-578
- Quattara F (2009). Contribution to the study of the relationship between the two components of solar magnetic field and equatorial ionosphere. Super PhD. Cheikh Anta Diop University of Dakar.
- Quattara F, Amory-Mazaudier C (2009). Solar-geomagnetic activity and Aa indices toward a standard classification. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 71:1736-1748
- Prolss GW, Roemer M, Slowey JW (1988). Dissipation of solar wind energy in the earth's upper atmosphere: The geomagnetic activity effect, *CIRA 1986. Adv. Space Res.*, 8 (5): 215-261
- Prolss GW (1991). Thermosphere-ionosphere coupling during disturbed conditions. *J. Geomag. Geoelectr.*, 43: 537-549
- Richardson IG, Cane HV (2002). Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000). *J. Geophys. Res.*, 107 (A8): 1187.
- Richardson IG, Cliver EW, Cane HV (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.*, 105 (A8):18200–18213.
- Rishbeth H (1991). F-region storms and thermospheric dynamics. *J. Geomag. Geoelectr. Suppl.* 43: 513-524
- Rishbeth H (1998). How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60: 1385-1402
- Simon PA, Legrand JP (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. *Ann. Geophys.*, 7 (6): 579-594
- Somoye EO (2009). Periodicity of solar cycle from diurnal variations of foF2 at Ibadan. *Int. J. Phys. Sci.*, 4 (3): 111-114.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le but de ce travail était d'étudier les relations Soleil-Terre, à travers l'étude de l'activité solaire, du vent solaire, du géomagnétisme et de l'ionosphère équatoriale afin de mieux comprendre l'impact des forts événements solaires sur l'ionosphère équatoriale et prévoir les réponses de l'ionosphère face aux sollicitations du vent solaire.

Pour ce travail nous avons utilisé d'importantes bases de données géomagnétiques et solaires disponibles dont l'inventaire a été fait dans le chapitre 3. Dans ce chapitre, une analyse morphologique des paramètres les plus importants pour notre étude, le vent solaire et l'indice géomagnétique Aa, a montré l'existence d'années avec des activités solaire et géomagnétique exceptionnelles.

Nous avons analysé les données géomagnétiques Aa, en lien étroit avec le vent solaire (Svalgaard, 1977), grâce aux diagrammes pixels et ainsi validé, dans le chapitre 4 de cette thèse et dans Zerbo et al. (2011), la classification de l'activité géomagnétique proposée par Legrand et Simon (1989). Dans le même chapitre, une nouvelle classification standard (Zerbo et al., 2012a) a été proposée. Les points importants cette classification se présente comme suit :

- 1) Activité de calme magnétique : jours où les indices $Aa < 20$ nT et les vitesses du vent solaire $V < 450$ km/s;
- 2) Activité récurrente : jours où les indices $Aa \geq 20$ nT et les vitesses du vent solaire $V \geq 450$ km/s sur plusieurs rotations solaires;
- 3) Activité de choc: jours des SSC où les indices $Aa \geq 20$ nT.
- 4) Activité non claire : tous les jours avec $Aa \geq 20$ nT et non inclus dans les deux précédentes classes et consécutifs aux fluctuations dans le vent solaire.

Les variations temporelles de ces quatre classes d'activité géomagnétique, de 1868 à nos jours, ont montré une augmentation de l'activité solaire au cours de ces dernières

années (cycles 21, 22, 23) avec des similitudes entre certains cycles : le cycle 23 est semblable aux cycles observés dans la seconde moitié des années 1800 et le cycle 22 à ceux de la première moitié des années 1900.

Pour établir l'interconnexion vent solaire-géomagnétisme, nous avons procédé à une étude statistique de la distribution des vitesses du vent solaire dans chaque classe d'activité géomagnétique. Nous avons obtenus les résultats suivants :

-près de 80% des vitesses du vent solaire $V < 450$ km/s pour la classe d'activité de calme magnétique, avec $V \in [330 \text{ km/s}, 468 \text{ km/s}]$;

-environ 80% des vitesses du vent solaire $V > 450$ km/s pour la classe de l'activité récurrente, avec $V \in [472 \text{ km/s}, 682 \text{ km/s}]$;

-l'activité de chocs et l'activité non claire sont semblable dans leurs proportion de vitesses de vent solaire, avec $\sim 60\%$ de $V > 450$ km/s et les vitesses sont de l'ordre de 381 km/s à 582 km/s.

Ces résultats statistiques montrent que les activités calme et récurrente sont les effets des vents solaires lents et rapides, respectivement. L'activité non claire est due aux fluctuations dans le vent solaire tandis que l'activité de chocs est la contribution des ondes de chocs à l'activité géomagnétique globale.

Nous avons étudié, dans le chapitre 5, les effets des vents solaires fluctuants et des chocs (Ejection de Masse Coronale) sur l'ionosphère équatoriale à partir des observations faites avec l'ionosonde de la station de Ouagadougou (Burkina Faso).

Nous montrons qu'il y a des variations saisonnières suivantes des paramètres foF2 et h'F2: (1) les gros orages engendrent l'anomalie équinoxiale dans foF2, (2) l'activité de chocs est responsable d'une asymétrie équinoxiale printanière dans le profil de foF2 et d'une asymétrie équinoxiale d'automne dans h'F2, (3) les intenses fluctuations dans le vent solaire provoquent une asymétrie équinoxiale printanière dans le profil de h'F2 et une asymétrie équinoxiale d'automne dans foF2.

L'étude comparative entre les données observées à la station d'ionosonde de Ouagadougou (ionosphère équatoriale) et celles prédites avec le modèle IRI-2007 montre que ce modèle ne traduit pas correctement les ionosphériques dans

l'ionosphère équatoriale. En dépit des écarts constatés entre le modèle et l'observation, il est important de souligner la meilleure approximation des valeurs peut être attribuée à la version CCIR du modèle IRI-2007 comparé à la version URSI. Cependant, nous concluons que les deux versions du modèle IRI-2007 surestime l'ionisation en région équatoriale ouest africaine et mériterait d'être amélioré pour avoir une portée planétaire.

Pour nos travaux futurs : (1) nous explorerons les différents résultats présentés dans cette thèse en vue de comprendre l'impact de l'activité solaire sur l'ionosphère à travers la classification standard (Zerbo et al., 2012a), (2) nous étudierons les années exceptionnelles mise en évidence dans cette thèse pour chercher un possible lien entre l'activité solaire et le climat, (3) nous nous intéresserons aux modélisations dans le vent solaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdu, M. A., Batista, I. S., and de Souza, J. R.: 1996, An overview of IRI-observational data comparison in American (Brazilian) sector low latitude ionosphere, *Adv. Space Res.*, 18, 13–22.

Adeniyi, J. O. and Adimula, I. A.: 1995, Comparing the F2-layer model of IRI with observations at Ibadan. *Advances in Space Research*, vol. 15, no. 2, pp. 141–144.

Ahluwalia, H. S., S .S. Xue, and M .M. Fikani.: 1994, Geomagnetic activity index and solar wind speed for solar cycles, in 8th International Solar-Terrestrial Physics Symposium, Sendai edited by H. Oya and G. Rostoker, vol.1, p. 120, Tohoku University Press Sendai.

Ahluwalia HS.: 2000, Ap time variations and interplanetary magnetic field intensity. *J Geophys Res*, A12:27481-27487. Appleton, E. V., Two anomalies in the ionosphere, *Nature* 157, 691.

Appleton, E. V.: 1946, Two anomalies in the ionosphere, *Nature* 157, 691.

Balan, N., and G. J. Bailey.: 1995, Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer, *J. Geophys. Res.*, 100, 21,421.

Bartels, J.: 1957, The technique of scaling K and Q of geomagnetic activity, *Ann. Int. Geophys. Year*, 4, 215.

Batista, I. S., Abdu, M. A., de Medeiros, R. T., and de Paula, E.R.: 1996, Comparison between IRI predictions and digisonde measurements at low latitude station, *Adv. Space Res.*, 18, 49–52.

Batista, I. S., and Abdu, M.A.: 2004, Ionospheric variability at Brazilian low and equatorial latitudes: Comparison between observations and IRI model. *Advances in Space Research*, vol. 34, no. 9, pp. 1894–1900.

Bertoni, F., Sahai, Y., Lima, W.L.C., Fagundes PR, Pillat VG, Becker-Guedes F, Abalde J.R.:2006, IRI-2001 model predictions compared with ionospheric data observed at Brazilian low latitude stations, *Ann. Geophys.* 24: 2191–2200.

Bittencourt, J. A. and Chryssafidis, M.: 1994, On the IRI model predictions for the low-latitude ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 995–1009.

Bramley, E. N. and M. Peart, Diffusion and electromagnetic drift in the equatorial F region, *J. Geophys. Res.*, 69, 4609, 1964.

Bramley, E. N., and Peart, M.: 1965, Diffusion and electromagnetic drift in the equatorial F2-region, *J. Atmospheric Terrest. Phys.* 27, 1201-1211.

Barlier, F., Berger, C., Falin, J. L., Kockarts, G., and Thuillier, G.: 1979, Comparisons between various semi-empirical thermospheric models of the terrestrial atmosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.* 41, 527.

Chapman, S., and J. Bartels.: 1940, *Geomagnetism*, Oxford Univ. Press, New York.

Chapman, S.: 1931, the absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth, *Proc.Phys.Soc.*,43, 26-45.

Chapman, S., and R. S., Lindzen.: 1970, *Atmospheric tides*, D. Reidel, Dordrecht.

Courtillot, V., and J. L. Le Mouel.: 1988, Time variations of the Earth's magnetic field: From daily to secular, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16, 389.

Courtillot, V., and J. L. Le Mouel.: 1976, On the long period variations of the Earth's magnetic field from 2 months to 20 years, *J. Geophys.Res.*, 81, 2941.

Delouis, H. and P.N. Mayaud.: 1975, Spectral analysis of the geomagnetic activity index aa over a 103-years interval, *J. Geophys.Res.*, 80, 4681-4688.

Du ZL.: 2011, The correlation between solar and geomagnetic activity – Part 2: Long-term trends. *Ann Geophys*, 29:1348-1348.

Echer, E., W. D Gonzalez, A.L.C. Gonzalez, A. Prestes, L. E. A. Vieira, A. Dal Lago, F. L. Guarnieri, N. J. Schuch.: 2004, Long-term correlation between solar and geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics* 66, 1019-1025

Feminella F and Storini M.: 1997, Large scale dynamical phenomena during solar activity cycles. *Astron. Astrophys*, 322: 311-319.

Francis K.C., Knipp,D.J., M.G., Macharg., G.Lu., B.A., Emery., S.,Vennerstrom.,O.A.,Troshichev.: 1999, Polar cap index as a proxy for hemispheric Joule heating, *J.Geophys. Letter*, vol.26, NO.8, p.1101-1104, 1999.

F. Ouattara: 2009, Contribution à l'étude des relations entre les deux composantes du champ magnétique solaire et l'ionosphère équatoriale, Thèse de Doctorat d'Etat,UCAD,Dakar.

Hapgood,M.A.: 1993,A double cycle in the 27-day recurrence of geomagnetic ,*Ann.Geophys.*,11,248.

Gopalswamy,N., Lara,A., Yashiro,S., Howard, R.A.: 2003, Coronal Mass Ejections and solar polarity reversal, *The Astrophysical Journal*, 598:L63–L66.

Gonzalez, W.D., Gonzalez, A. L. C., Tsurutani, B. T.: 1990, Dual peak cycle distribution of intense geomagnetic storms. *Planetary Space Sciences* 38, 181-187.

Gonzalez, A. L. C., W. D. Gonzalez, S. L. G. Dutra, and B. T. Tsurutani.: 1993, Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the Ap index, *J. Geophys. Res.*, 98, 9215.

Gosling, J. T., Bame, S. J., McComas, D. J., and Phillips, J. L.: 1990, Corona mass ejections and large geomagnetic storms, *Geophys. Res. Lett*, 17, 901-904.

Gosling J.T, McComas D.J, Phillips J.L, Bame S.J.: 1991, Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections, *J. Geophys. Res.*, A5 :7831-7839.

Hady, A. A.: 2006, Solar activity and its effects during the last 23 cycles, Historical events and people in aeronomy, geomagnetism and solar-terrestrial physics, Band/volume VII, Heft/N° I.

Herbert Friedman: 1986, Sun and Earth

Kobe, A. T., C. A. Mazaudier, J. M. Do, H. Luehr, E. Houngrinou, J. Vassal, E. Blanc, J. J. : 1998, Curto, Equatorial electrojet as part of the global circuit: a case study from the IEEY, *Ann. Geophys.*, 16, 698-710.

Legrand, J. P. : 1984, Introduction élémentaire à la physique cosmique et la physique des relations soleil-terre, Territoire des terres australes et antarctiques françaises.

Legrand J. P. : 1985, J-J Dortous de Mairan et l'origine des aurores représentent cet effet d'équinoxe de printemps, *La vie des Sciences Compte-rendus série générale tome 2, n°5*, pp. 487-509.

Legrand, J.P. and Simon, P.A. : 1985, Some solar cycle phenomena related to the geomagnetic activity from 1868 to 1980, I. The shock events, or the interplanetary expansion of the toroidal field, *Astron. Astrophys.*, 152-199.

Legrand J. P and P.A. Simon: 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. *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.

Legrand, J. P. and Simon, P. A.: 1992, Toward a model of two-component solar cycle, *Solar Phys.* 141, 391-410.

Legrand J. P, Legoff M., Amory Mazaudier, C., Schröder W. : 1991, La vie des sciences, CR tome 1, N°3, pp. 181-210.

Mayaud, P. N. : 1971, Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux, *Ann, geophys.*, 27, 71.

Mayaud, P.N.: 1972, The aa indices: a 100-year series characterizing the magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 77, n° 34, p. 6870-6874.

Mayaud, P. N.: 1973, A hundred year series of geomagnetic data, 1868–1967, indices aa, Storm sudden commencements, *IAGA Bull.* 33, 252 pp., 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.

Obrou K. O. : 2008, Ionosphere equatoriale: contribution a l'amélioration du modèle International Reference Ionosphere (IRI), These de Doctorat d'état es Sciences Physiques, UFR SSMT. Université de Cocody.

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.: 2009, Solar magnetic fields components: Phases, Profiles and their relationship. *Journal des Sciences.* 9(2) : 9-16.

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*, vol. 6, no.20, pp. 4854–4860.

Ouattara, F.: 2012, IRI-2007 foF2 predictions at Ouagadougou station during quiet time periods from 1985 to 1995. *Submitted to special issue IRI over Africa of Advance in Space Research*

Paterno,L.: 2006, the history of the solar cycle, edited by Schröder, AKGGP/ SHGP, science Edition, Bremen/Pots dam

Ramesh,K.B.: 2010, Coronal mass ejections and sunspots-solar cycle perspective, *The Astrophysical Journal Letters*, 712:L77-L80.

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 Clilverd, M.: 1999, long-term change in the upper atmosphere greenhouses gases-Modelling of the termospheric and ionospheric effects. *Planet. Space, Sci*, 40, 1011-1026.

Rishbeth H. and Garriott O. K.: 1969, *Introduction to ionospheric physics*, Academic Press, New York.

Simon, P.A. and J.-P. Legrand. : 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,*Annales geophysicae*, , 7, (6).

SAMBOU, E.:1993, Contribution à l'étude de l'ionosphère équatoriale, Variation du maximum d'ionisation de la région F2 en fonction des processus électrodynamiques agissant à grandes échelles, Thèse de Docteur de 3ème cycle, UCAD, Dakar.

Sambou, E., P. M. Vila, A. T. Koba: 1998, Non-trough enhancement at near-equatorial dip latitudes, *Ann. Geophysicae*, 16, 711-720.

Simon, P. A. and J.P Legrand: 1991, A two component solar cycle, *Solar Phys.* 131, 187-209.

Svalgaard, L.: 1977, Geomagnetic activity: dependence on solar wind parameters, in: *Coronal holes and high speed wind streams*, edited by: Zirker, J. B., Colorado Ass. Univ. Press, Boulder, 371-432.

Svalgaard, L., E. W. Cliver, and P. Le Sager, IHV: 2004, A new long-term geomagnetic index, *Adv. Space. Res.*, 34, 43.

Svalgaard, L., and E. W. Cliver: 2007, A floor in the solar wind magnetic field, the *Astrophysical Journal*, 661: L203-L206.

Triplet J.P et G. Roche: 1977, *Météorologie Générale*

Webb D.F: 1995, Solar and geomagnetic disturbances during the declining phase of recent solar cycles. *Adv. Space Res*, 16(9), 57-69.

Zerbo J-L., Ouattara F., Zoundi C., Gyebéré A.:2011, Solar cycle 23 and geomagnetic activity since 1868, *Rev.CAMES-Série A* 12(2), pp255-262.

Zerbo J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara, J. Richardson: 2012, Solar wind and geomagnetism, toward a standard classification 1868-2009, *Ann. Geophys.* 30, 421-426.

Zerbo J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara: 2012, Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, *Journal of Advanced Research*, doi 10.1016/j.jare.2012.08.010.