

Etude de l'Ionosphère équatoriale
dans le cadre du réseau de recherche GIRGEA (www.girgea.org)

Study of Equatorial Ionosphere
In the framework of the IRGGEA research network (www.girgea.org)

Amory-Mazaudier C.¹, Fleury R.², F. Ouattara³, J-L. Zerbo⁴, H. Pham⁵, A. Shimeis⁶, C. Zoundi⁷, I. Fathy⁸, M. Le Huy⁹, A. Mahrous¹⁰

1. LPP/CNRS/UPMC/France, christine.amory@lpp.polytechnique.fr
2. Télécom- Bretagne Brest /France, rolland.fleury@telecom-bretagne.eu
3. Université de Koudougou/Koudougou-Burkina Faso, fojals@yahoo.fr
4. Université de Bobo Dioulasso, Burkina Faso, jeanlouis.zerbo@gmail.com
5. Institut de Géophysique de Hanoï, Vietnam, hongnd76@yahoo.com
6. Université d'Helwan/Helwan-Egypte, Egypte, amirashimeis@yahoo.com
7. Université de Ougadougou, Burkina Faso, zounchr@yahoo.fr
8. Université d'Helwan/Helwan-Egypte, ibrahimfathy131@yahoo.com
9. Institut de Géophysique de Hanoï, Vietnam, lhminhigp@gmail.com
10. Université d'Helwan/ Helwan-Egypte ayman.mahrous@gmail.com

Résumé:

Durant la dernière décennie dans le cadre des projets CAWSES (Climate and Weather in the Sun Earth System), AHI (Année Héliophysique Internationale) 2006-2009 et ISWI (International Space Weather Initiative) 2010-2012, la connaissance du soleil et de son impact sur les couches ionisées a considérablement avancé suivant différents canaux :

- synthèse connectant la physique du soleil à celle de l'ionosphère
- analyse de longues séries de données ionosphériques sur plusieurs cycles solaires
- déploiement d'instruments (*GPS et magnétomètres*) sur le continent africain dans des régions où les mesures étaient inexistantes, ce fait entraînant la révision de certains modèles.

Le réseau de recherche GIRGEA a profité de ces projets et développé des études des zones équatoriales en Afrique et en Asie. Cet article présente les résultats obtenus concernant principalement les variations long terme de l'Ionosphère équatoriale, l'impact des éjections de masse coronale et des jets de vents rapides issus des trous coronaux sur les couches ionisés, et l'inadéquation de certains modèles à représenter les récentes observations en Afrique.

Abstract:

During the last decade in the framework of CAWSES (Climate and Weather in the Sun Earth System), IHY (International Heliophysical Year) 2006-2009 and ISWI (International Space Weather Initiative) 2010-2012, the knowledge of the sun and its impact on the ionized layers has advanced considerably following different ways:

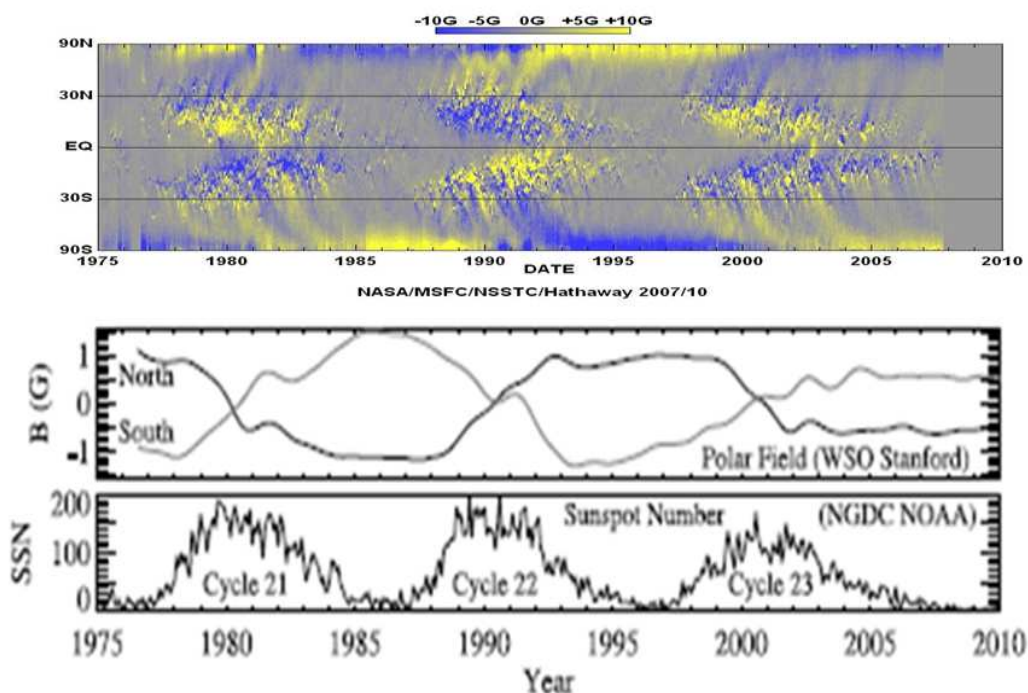
- Synthesis on the physical connections from the sun to the ionosphere
- Analysis of long series of ionospheric data over several solar cycles
- Deployment of instruments (magnetometers, GPS etc...) on the African continent in regions where measurements were nonexistent, thus leading to the revision of certain models.

The research network IRGGEA participated to these projects and developed studies of equatorial Africa and Asia. This article presents the results concerning mainly the long-term variations of the equatorial ionosphere, the impact of coronal mass ejections and jets of fast solar winds from coronal holes on ionized layers, and the inadequacy of some models to represent recent observations in Africa.

1. Une approche nouvelle pour les études de l'ionosphère

C'est au moyen âge que l'observation des taches solaires a commencé (Gallilée 1610,) et c'est en 1844 que Schwabe a mis en évidence la variation cyclique d'apparition taches solaires connu comme le cycle de taches. Aujourd'hui l'indice solaire Rz donnant le nombre de taches solaires et le flux solaire radio F10.7cm, très fortement corrélé au Rz, sont souvent les seuls indices solaires utilisés par les chercheurs étudiant l'ionosphère. Au début du 20^{ème} siècle Hale a mis en l'existence d'un champ magnétique solaire poloidal se retournant avec une périodicité d'environ 11 ans. On sait aujourd'hui que le soleil tourne sur lui-même avec une vitesse différente à l'équateur et au pôle et que les taches solaires sont des aimants créés principalement par les torsions des lignes du champ poloidal sous l'effet de cette rotation différentielle.

Figure 1 : Les deux composantes magnétiques du cycle solaire



La figure 1 présente les deux composantes magnétiques du soleil (toroidale $\sim 5\text{kG}$ et poloidale $\sim 10\text{G}$). Le cycle solaire complet est d'environ 22 ans. Sur le panneau du haut en couleur, on reconnaît au centre le diagramme papillon image du cycle de taches et sur les bords le cycle poloidal est visible par une alternance de la polarité indiquée par les couleurs jaune et bleue. Les deux panneaux du bas donnent les variations du cycle poloidal et toroidal. Ceci permet d'observer que le maximum du cycle de taches correspond au minimum du cycle poloidal et à son changement de polarité.

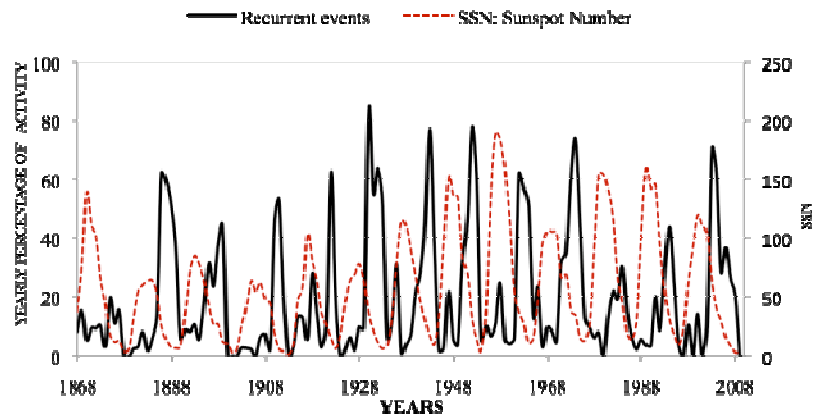
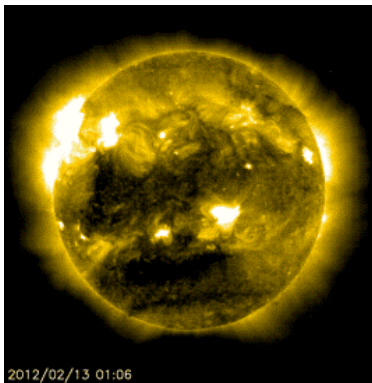
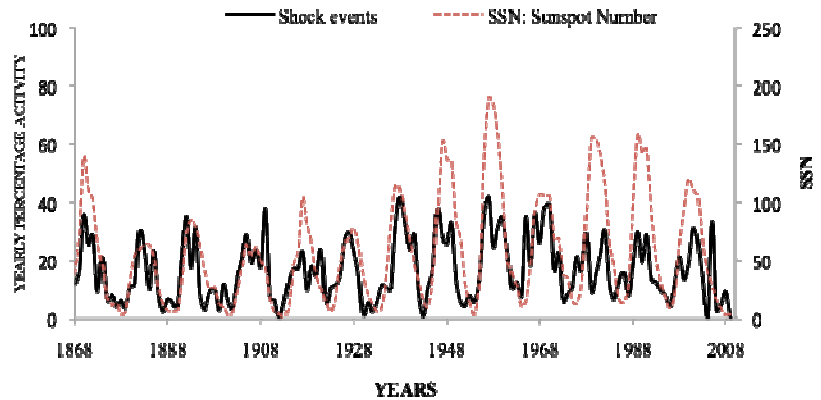
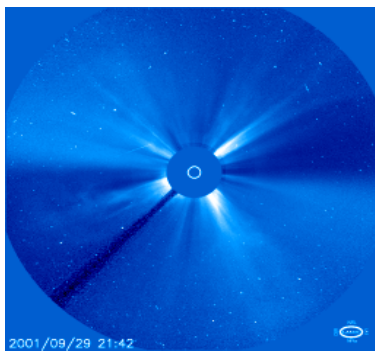
Les études menées par Legrand et Simon [1] et Simon et Legrand [2] ont permis d'évaluer l'influence de ces champs magnétiques toroidal et poloidal sur l'activité géomagnétique terrestre. Ils ont classifié les types d'événements solaires en quatre classes : 1) la classe des vents solaires lents, 2) la classe des vents solaires rapides, issus des trous coronaux solaires, 3) la classe des chocs associées aux éjections de masse coronale et 4) la classe des vents solaires fluctuants. Ouattara et Mazaudier [3] ont validé cette classification en utilisant les données récentes sur le soleil et Zerbo et al. [4] ont amélioré cette classification en augmentant le pourcentage des jours classifiés de 60 à 80%.

Les études de l'ionosphère ne peuvent plus être poursuivies en considérant uniquement comme variabilité du soleil l'indice solaire Rz ou le flux radio F10.7cm. Ces deux indices expriment uniquement la variation du flux solaire et il y a bien d'autres facteurs de variabilité du soleil.

2. Les résultats scientifiques

La figure 2 de Zerbo et al., [4] représente deux facteurs de variabilité du soleil très importants qu'il faut désormais introduire dans toutes les études de l'ionosphère : 1) la variabilité liée aux vents rapides associés aux trous coronaux (panneau du bas) et 2) celle associée aux éjections de masse coronale (panneau du haut). Sur cette figure nous avons porté aussi deux images du soleil correspondant à ce type de variabilité. Le panneau du haut présente la superposition de l'indice solaire Rz et de l'activité géomagnétique reliée aux éjections de masse coronale et le panneau inférieur la superposition de Rz et de l'activité géomagnétique générées par les vents solaires rapides issus des trous coronaux. L'activité géomagnétique est estimée à partir de l'indice Aa Mayaud [5] suivant la méthode donnée par Legrand et Simon [1]. Cette figure illustre deux faits importants : le maximum d'activité géomagnétique due aux éjections de masse coronale est associé au maximum du cycle de taches et le maximum des vents rapides issus des trous coronaux est observé durant la phase descendante et la phase minimum du cycle de taches.

Figure 2 : Activités magnétiques de chocs et d'évènements récurrents



La figure 3 de Zerbo et al., [6] présente sur le panneau du haut (a) les vitesses moyennes du vent solaire mesurée par le satellite ACE durant le dernier cycle solaire et sur le panneau du bas (b) l'indice géomagnétique Aa. On constate des vitesses très élevées du vent solaire durant toute l'année 2003 et des vitesses du vent solaire très basses durant toute l'année 2009. On peut constater sur le panneau du bas que l'année 2003 est l'année la plus perturbée magnétiquement depuis 1868 et l'année 2009, l'année la moins perturbée magnétiquement après l'année 1901. Durant l'année 2003, lors de son retournement, le dipôle solaire est resté un certain temps bloqué et des trous coronaux équatoriaux ont envoyé vers la terre des vents solaires rapides durant toute l'année.

Figure 3 a: vent solaire durant le cycle 23

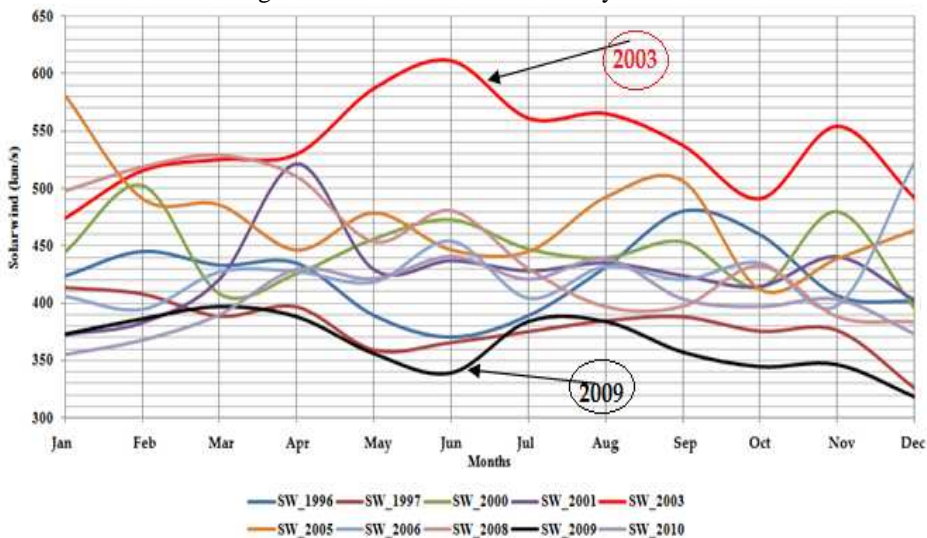
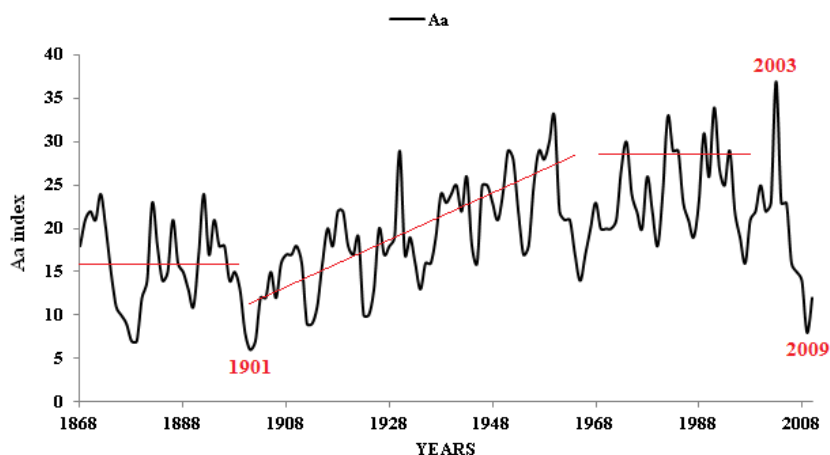


Figure 3b : indice géomagnétique Aa de 1868 à 2010



Le panneau 3b montre aussi que l'activité géomagnétique a augmenté durant plus d'un siècle et est revenue soudainement à un niveau très bas, cette augmentation correspond à une augmentation du champ magnétique dipolaire du soleil. Au cours de la période 2006-2009 il y a eu une phase minimum du cycle de taches très longue, et le cycle solaire de taches actuel est très faible. C'est le premier cycle solaire si faible depuis plus d'un siècle.

Legrand et Simon [1] ont montré que 91,5% de l'activité géomagnétique était liée au champ magnétique poloidal et seulement 8,5% (les chocs) étaient liée au cycle de taches.

L'activité géomagnétique est liée à la variabilité du soleil associée à des types d'évènements solaires. Il est donc indispensable lorsque l'on étudie l'ionosphère de commencer par caractériser les évènements solaires de la période étudiée.

Les figures 4a et 4b illustrent les variations observées au niveau des paramètres du vent solaire et dans la variation du contenu total en électron de l'ionosphère et le champ magnétique terrestre, variations associées à un évènement comportant une éjection de masse coronale et un trou coronal. On peut trouver sur le site <http://www.spaceweather.com>

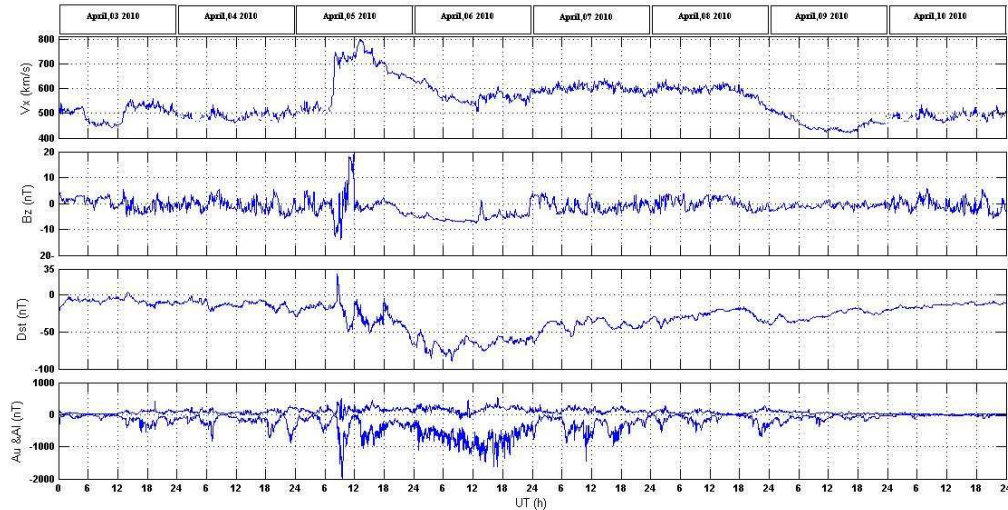
Toutes les caractéristiques concernant les paramètres solaires (tache, CMe, trou coronal etc...).

Le figure 4a de Shimeis et al., [7] permet d'illustrer l'impact sur l'ionosphère de certains évènements solaire. Sur la figure 4a sont tracs successivement la composante Vx de la vitesse du vent solaire la composante Bz du champ magnétique interplanétaire, l'indice magnétique Dst et les indices auroraux AU et AL pour la période du 3 au 10 avril 2010.

Une éjection de masse coronale (choc) est observée au niveau du soleil le 3 avril et le choc atteint la terre le 5 avril vers 8h25. Ce choc est associé à une composante Vx du vent solaire forte (Vx ~ 800km/s), une variation de la composante du champ magnétique interplanétaire Bz vers le sud (Bz~10 nT), une croissance de l'indice magnétique Dst au moment du choc (courant Chapman Ferraro à l'avant de la magnétosphère) suivi d'une

décroissance de cette indice illustrant les variations du courant annulaire circulant dans le plan équatorial de la magnétosphère à quelques rayons terrestres. On observe aussi une augmentation des indices auroraux qui sont la signature des courants électriques ionosphériques circulant en zone aurorale.

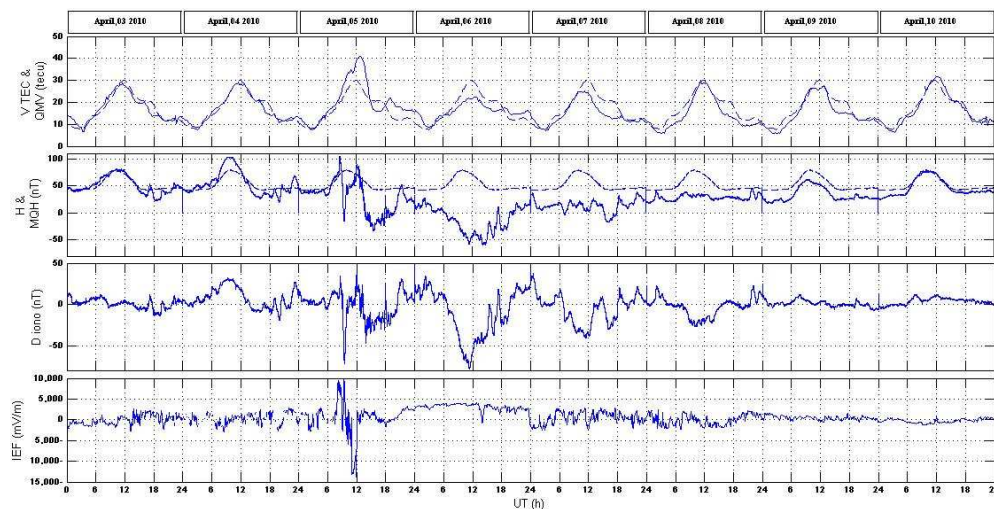
Figure 4a : Vent solaire, Dst, AU et AL pour l'évènement d'Avril 2010



Au cours des journées qui suivent le 6, 7 et 8 avril la terre est sous l'influence de vents solaires issus d'un trou coronal, on constate que la composante V_x est assez stable autour de 600 km/s et que la composante B_z du champ magnétique interplanétaire oscille. Les signatures des éjections de masse coronale et des vents rapides issus des trous coronaux ont des signatures différentes sur les paramètres du vent solaire.

La figure 4b présente successivement de haut en bas le contenu total en électron et les variations de composante H champ magnétique terrestre (ΔH) enregistré à Helwan en Egypte. Helwan est située près de la crête d'ionisation de l'hémisphère nord. Sur ces courbes la variation régulière estimée en utilisant les jours magnétiques les plus calmes du mois est superposée en trait pointillé. Les deux courbes en partant du bas de la figure présente le champ électrique transmis par le vent solaire à la magnétosphère ($E_y = -V_x \times B_z$) et la perturbation magnétique des courants ionosphériques estimée ($D_{iono} = \Delta H - S_R - Dst \cdot \cos \lambda$), S_R est la variation régulière et λ la co latitude). La courbe du haut de la figure 4b montre que le contenu total en électron augmente de 25% au moment du choc puis diminue, et les jours suivants nous observons une décroissance du contenu total en électron de l'ordre de 25% associée au trou coronal. Nous constatons sur les deux courbes du haut que le retour à la normal est observé le 10 avril. Cette figure illustre parfaitement ce que l'on nomme aujourd'hui 'space weather event'.

Figure 4b : Variations de TEC et du champ magnétique terrestre à Helwan (Egypte)



Une autre étude a été menée par Pham et al., [8], en utilisant les données de fréquence critique de la région F₂ observée entre 1962 et 2002 au Vietnam. La figure 5 présente els observations, les panneaux de gauche présentent les fréquences critiques des couches avec de haut en bas les couches F₂, F₁, E et Es. Les panneaux de droite correspondent aux hauteurs virtuelles. Nous nous intéresserons uniquement aux fréquences critiques des couches E et F. Sur les variations des fréquences critiques, nous avons superposé les variations de l'indice Rz. Nous observons une très bonne corrélation. Nous rappelons ici que cette corrélation est faite entre des moyennes annuelles incluant toutes les observations. Nous constatons qu'au cours des 40 ans la fréquence critique a augmenté. Pour estimer cette augmentation nous avons soustrait les variations dues au cycle solaire et obtenus les variations long terme de l'ionosphère qui sont représentées sur la figure 6 (Les variations à long terme sont calculées en utilisant la régression linéaire: $X_{th} = a.R + b$ ou R est le nombre de taches solaires et ensuite: $DX_i = X_i - X_{th}$ ou X_i sont les fréquences critiques observées). Nous constatons que les fréquences critiques des couches F₁ et F₂ augmentent durant toute la période et que la fréquence critique de la couche E augmente puis diminue. Ces résultats sont en cours d'interprétation, il y a plusieurs causes possibles : les variations du champ magnétique, l'augmentation de l'activité magnétique liée au champ dipolaire solaire, les variations de température liée à l'effet de serre.

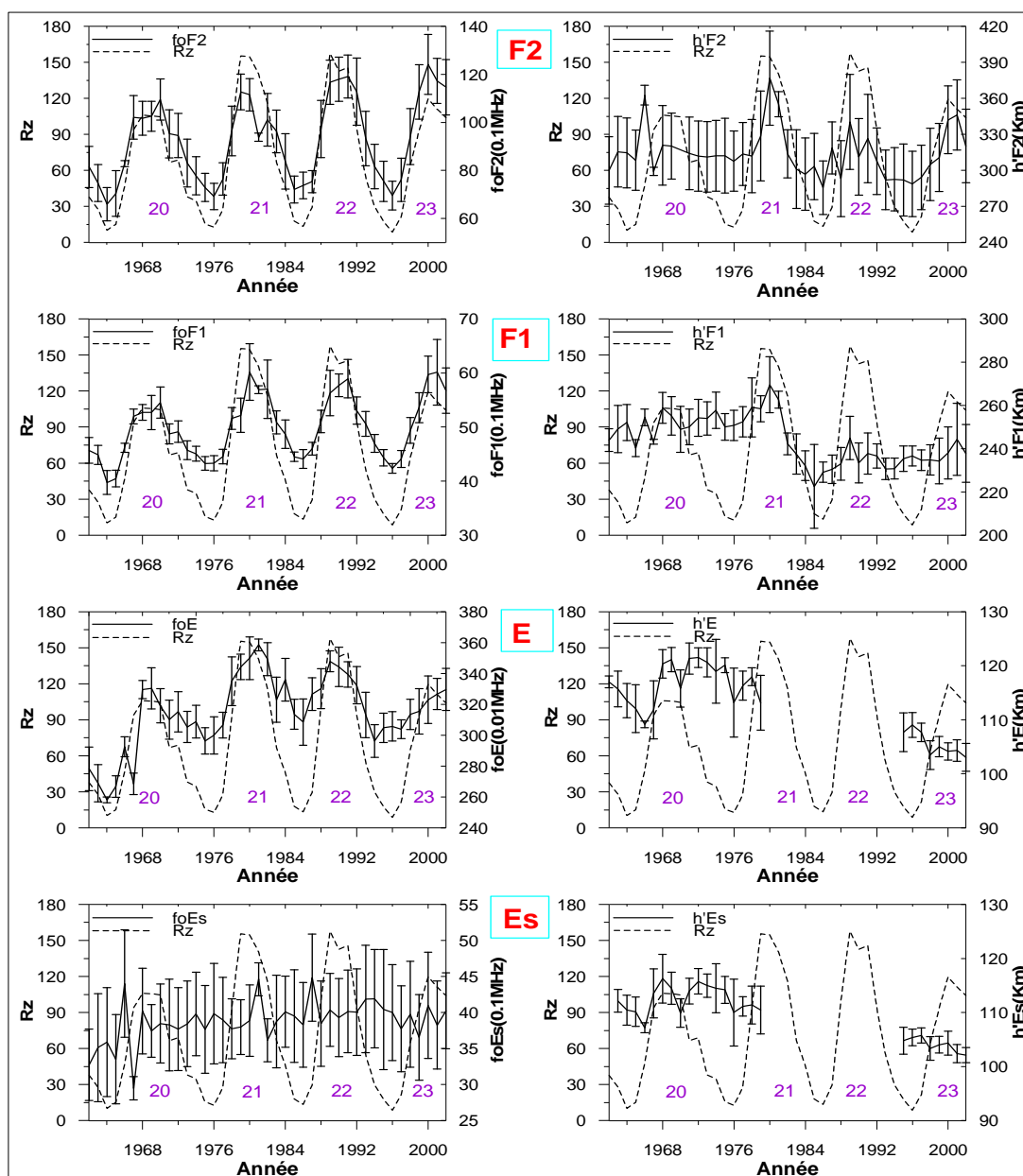
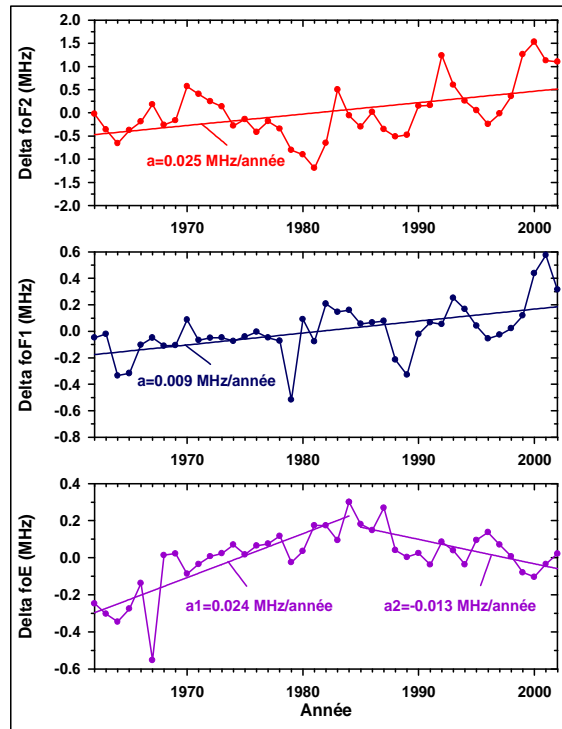


Figure 5 : variations des fréquences critiques et hauteurs virtuelles à Phu Thuy (Vietnam)

Figure 6 : Variations long terme de l'ionosphère observées à Phu Thuy (Vietnam)



Une autre étude a été menée par Ouattara et Amory-Mazaudier [9] afin d'évaluer l'impact des événements solaires sur la variation diurne de la fréquence critique de la région F₂ à Ouagadougou (station équatoriale). Les auteurs ont utilisé la classification donnée par Legrand et Simon (1989). Les données de Ouagadougou obtenue de 1960 à 1998 ont été classées suivant 3 critères de variabilité : le cycle de taches, la saison, l'activité géomagnétique. Chaque critère comportent 4 états qui sont les suivants:

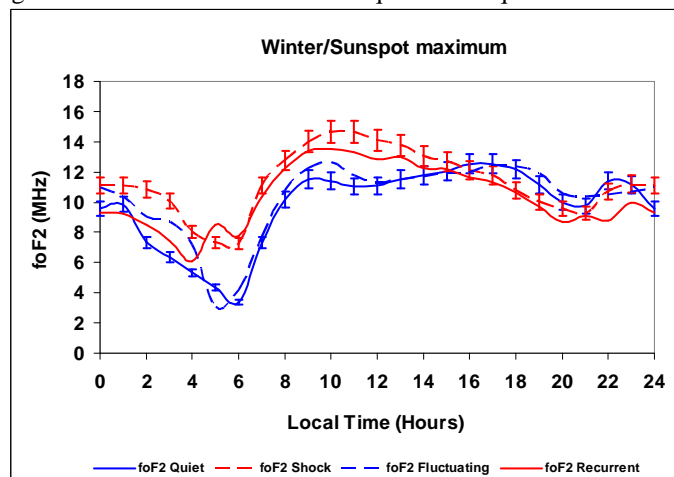
Cycle de tache : montant, maximum, descendant et minimum

Saison : printemps, été, automne hiver

Activité géomagnétique : vents solaires lents, chocs, vents rapides associés à des trous coronaux, vents fluctuants.

Il y a donc $4 \times 4 \times 4 = 64$ classes possible. La figure 7 présente les résultats obtenus pour l'hiver et une période de cycle solaire maximum pour les 4 classes d'activité géomagnétique. Sur cette figure, les traits verticaux représente l'écart type ($\sigma = \sqrt{V}$, V est la variance). Nous constatons que la variation diurne de la fréquence critique F₂ illustre des variations différentes en fonction des classes considérées. Pour les vents solaires calmes et fluctuants on observe une structure formées par deux maximums un le matin et un l'après-midi, avec un plat vers midi. Pour la classe des chocs et de l'activité récurrent (vents solaires rapides liés aux trous coronaux), nous observons un maximum le matin et un minimum l'après-midi.

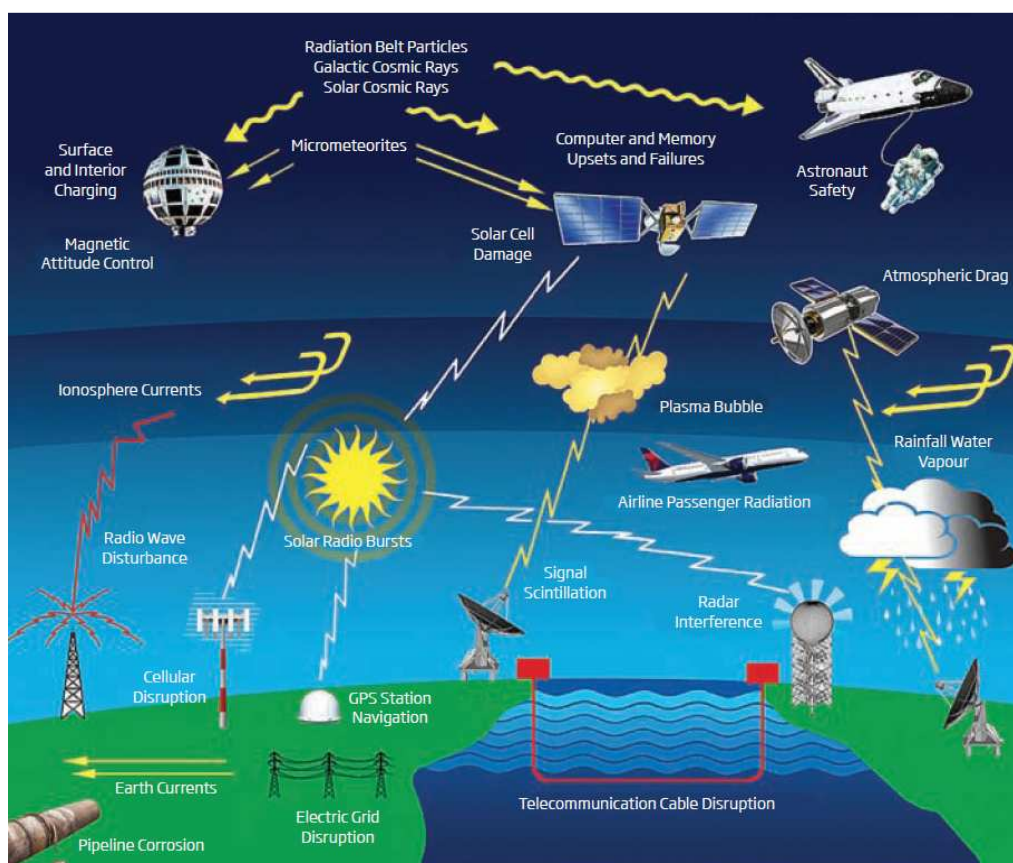
Figure 7 : Variation diurne de la fréquence critique de la couche F2



3. La météorologie de l'Espace et les réseaux GPS

C'est à la suite de la panne d'électricité de New York provoqué par l'orage magnétique du 13 mars 1989, que les autorités ont pris conscience de l'impact des événements solaires extrêmes sur le devenir de notre société hautement technologique. La figure 8 de J-L Lanzerotti extraite du rapport 'Extreme Space Weather, 2013'[10] synthétise les phénomènes physiques et les technologies fragilisées par les événements solaires. Il est demandé aux scientifiques d'essayer de prévoir ces événements extrêmes et d'établir les impacts des perturbations solaires sur notre environnement comme cela est fait au niveau de la météorologie, et ainsi développer un système d'alerte qui pourrait permettre de protéger les installations pouvant être affectées par ces événements. En Afrique la communauté internationale installe des instruments de mesure utiles pour la météorologie de l'Espace, afin que le réseau de détection de la météorologie de l'Espace soit un réseau mondial.

Figure 8 : La météorologie de l'Espace d'après de J-L. Lanzerotti



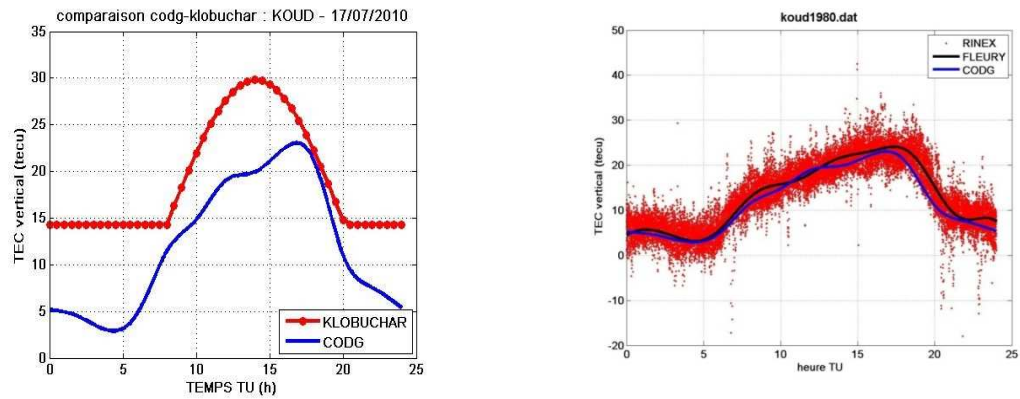
Des stations GPS sont déployées. Rappelons que le système GPS a d'abord été développé par les militaires pour le positionnement et pour la navigation aérienne et que désormais ce système est très utilisé par les chercheurs. En effet le signal émis par un satellite est déformé lors de sa traversée des couches entourant la terre. L'ionosphère (50km à plus de 1000km) et la troposphère (1 à 12 km) affectent fortement le signal et ce fait permet d'accéder à des paramètres concernant ces couches traversées notamment le contenu total en électrons pour l'ionosphère et la vapeur d'eau intégrée sur la troposphère.

Dans le GIRGEA des études sont menées sur le contenu total en électron de l'ionosphère et notamment sur la méthode pour calculer ce contenu total en électron. La figure 9 de Ouattara et al. 2012[11] présente sur le panneau de gauche 2 modèles de ce contenu total en électron du VTEC (tec vertical) :

- celle de Klobuchar : Le VTEC est calculé à partir de 8 coefficients fournis dans le message de navigation du système GPS. C'est un modèle rudimentaire, mondial qui permet de corriger une partie de l'allongement ionosphérique pour les utilisateurs civils utilisant la fréquence L1 (1575 MHz) et donc de gagner en précision sur le positionnement si on ne faisait rien.

- celle de CODG. C'est la variation du VTEC issu des cartes GIM ('Global Ionospheric Mode') établies par l'Université de Berne (d'où de nom de codg) à partir des mesures sur le réseau mondial IGS (environ 300 stations sur le globe).

Figure 9 : Modélisation du contenu total en électron déduit des mesures GPS



La figure 9 sur le panneau de droite représente des variations du contenu total en électron VTEC en fonction de l'heure TU le 17 juillet 2010 (koud1980.dat pour Koudougou, 198 est le quantième de l'année). La courbe nommée Fleury est obtenue de la manière suivante :

- Les points (. rinex) représentent les VTEC pour chaque satellite en visibilité de la station et sont cadencés toutes les 30s. A un instant donné, il y a une variabilité du VTEC du fait que les satellites ne sont pas dans la même direction donc ne voient pas le TEC oblique et en plus la loi de la sécante pour passer au vertical est approchée (surtout en zone équatoriale). Le VTEC est lissé pour avoir une estimation unique rapportée à la position géographique de koudougou. Le lissage est fait dans une fenêtre glissante et chaque point est pondéré par l'angle d'élévation.

La Courbe CODG est obtenue de la manière suivante :

C'est la variation obtenue par l'Université de Berne à partir du réseau IGS des stations en jouant leurs résultats sur la position de Koudougou.

Les 2 courbes sont assez proches et c'est normal : A partir du GPS bi-fréquence, on a calculé directement le TEC oblique non calibré. On détermine la constante (réelle) de calibration journalière en ajustant tous les TEC obliques avec ceux du modèle CODG. On repasse ensuite au TEC vertical, et on retrouve quelque chose de proche comme c'est le cas sur la figure 9 de droite.

Ce n'est cependant pas toujours vrai : les points CODG sont obtenus toutes les 2 heures et la valeur calculée est une intégration sur cette durée. Au contraire les points Rinex sont obtenus avec les stations GPS toutes les 30s. Sur les graphes on peut donc voir des détails plus fins que CODG (des pics décalés d'une heure par exemple ou moins fort qu'attendu ou les 2 crêtes ou une seule crête équatoriale, ...) d'où l'utilité de faire des mesures en Afrique et de les traiter

CODG fourni un VTEC au dessus de Koudougou alors que la station IGS (IGS : réseau de station GPS pour la géodésie) la plus proche est soit à Cotonou ou au Bénin ou encore une station au Nigéria à quelques milliers de km. Il peut donc y avoir de fortes différences. Il est donc important de continuer à installer des stations en Afrique et de rendre disponibles les mesures afin d'intégrer certaines stations au réseau IGS pour quelles soient traitées par CODG. Il y a cependant une contrainte : il faut des mesures régulières disponibles dans les 2 heures, et pour de nombreux pays d'Afrique ce n'est pas possible actuellement.

Le développement des stations GPS sur l'Afrique apportent de nouvelles informations sur la variabilité de l'ionisation en zone équatoriale qu'il faut interpréter dans un cadre nouveau en intégrant toutes les connaissances acquises sur le soleil durant la dernière décennie.

4. Conclusion

De nouvelles disciplines telles que l'Héliophysique et la météorologie de l'Espace nécessitent désormais une complète communication entre les différentes disciplines depuis la physique du soleil, jusqu'à la géophysique interne en incluant la magnétosphère, l'ionosphère et l'atmosphère. Les recherches menées par le GIRGEA en Afrique dans le cadre des projets Année Internationale de l'Electrojet ((Amory-Mazaudier et al. [12] , [13]), Année Héliophysique internationale (Tompson et al. [14] ; Amory-Mazaudier et al., [15] et International Space Weather Initiative (Davila [16]) ont fait progresser nos connaissances sur l'ionosphère.

Il devient urgent que ces progrès soient pris en compte dans les modèles tant soit les modèles physiques de l'ionosphère que les modèles de l'ionosphère pour réduire les données GPS

Remerciements :

les auteurs remercient tous les scientifiques qui déploient des instruments en Afrique ainsi que les coordinateurs de grands projets internationaux tels que AHI et ISWI.

Références

- [1] Legrand J. P et 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), 565-578.
- [2] Simon P. A. et 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), 579-594.
- [3] Ouattara F. Et Amory-Mazaudier, 2009, Solar Geomagnetic activity and Aa indices : toward a standard classification, *Journal of Atmosph. And Solar Terr. Phys*, 71, Vol 17-18, 1736-1748.
- [4] Zerbo, J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara, 2012, Solar wind and geomagnetism: Toward a standard classification of geomagnetic activity from 1868 to 2009, *Ann. Geophysicae*, 30, 421-426.
- [5] Mayaud P.N., 1973. A hundred year series of geomagnetic data, 1868-1967: indices aa, storm sudden commencements, *IAGA Bulletin 33*, 256 pp., IUGG Publ. Office, Paris.
- [6] Zerbo, J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara, Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics, 2012, *J. Adv Res* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2012.08.010>
- [7] Shimeis, A., I. Fathy, C. Amory-Mazaudier, R.Fleury ,A.M. Mahrous, K. Yumoto, K.Groves' 2012, Signature of the Coronal Hole on near the North Crest Equatorial Anomaly over Egypt during the strong Geomagnetic Storm 5th April 2010, Vol 117, A07309, doi:10.1029/2012JA0117753, 2012.
- [8] Pham Thi Thu, H., C. Amory-Mazaudier, M. Le Huy, 2011, Time variations of the Ionosphere at the northern tropical crest of ionization at Phu Thuy-Vietnam, *Ann. Geophys.*, 29, pp 197-297.
- [9] Ouattara F. and Amory-Mazaudier, 2012, Statistical study of the Equatorial F2 layer at Ouagadougou during solar cycles 20, 21, 22 using Legrand's and Simon's classification of geomagnetic activity, *Space Weather Space Clim.* 2, A19, DOI:101051/swsc/2012019.
- [10] Report / Extreme Space Weather :Impacts on engineered systems and infrastructures, Royal Academy of Engineering ISBN 1-903496-95-0, February 2013, on line www.raeng.org.uk/space weather.
- [11] Ouattara, F., Christian Zoundi, Christine Amory Mazaudier, Rolland Fleury, Patrick Lassudrie Duchesne, 2012, Determination of TEC by using pseudo range at Koudougou station in Burkina Faso, *J. Sci.* Vol. 11, N°1, 12-19, *J. Sci.* (in French)
- [12] Mazaudier, C., (CRPE/France), J. Achache (IPGP/France), A. Achy-Séka (Univ. Abidjan/Ivory Coast), Y. Albouy (ORSTOM/France), E. Blanc (CEA/France), K. Boka (Univ. Abidjan/ Ivory Coast), J. Bouvet (CRPE/France), Y. Cohen (IPGP/France), C-S. Diatta (ITNA/Senegal), V. Doumouya (Univ. d'Abidjan/ Côte d'Ivoire), O. Fambitakoye (ORSTOM/France), R. Gendrin (CRPE/France), C. Goutelard (LETTI/France), M. Hamoudi (CRAAG/Algeria), R. Hanbaba (CNET/France), E. Hougoinou (Univ. d'Abidjan/ Ivory Coast), C. Huc (CRPE/France), K. Kakou (Univ. Abidjan/ Ivory Coast), A. Koba Toka (Univ. Abidjan/ Ivory Coast), P. Lassudrie-Duchêne (CNET/France), E. Mbipom (Université de Calabar / Nigeria), M. Menvielle (Lab. Géophysique/ France), S.O. Ogunade (Univ. Obafemi/ Nigeria), J. O. Oyinloye (Univ. d'Ilorin/Nigeria), D. Rees (UCL/UK), A. Richmond (NCAR/U.S.A.), E. Sambou (ITNA/Senegal), E. Schmucker (Univ. Göttingen/ Germany), J. L. Tireford (Observatory Lamto/Ivory Coast), J. Vassal (ORSTOM/Senegal), P. Vila (CRPE/France), 1993, International Equatorial Electrojet Year, *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 11(3), pp 303-317, special issue, invited paper.
- [13] Amory-Mazaudier, C., A. Koba, P. Vila, A. Achy-Séka, E. Blanc ,K. Boka, J. Bouvet, J-F. Cécile, Y. Cohen, J-J Curto, M. Dukhan, V. Doumouya, O. Fambitakoye ,T. Farges, C. Goutelard, E. Guisso , R. Hanbaba, E. Hougoinou, E. Kone, P. Lassudrie-Duchesne, C. Lathuillere, Y. Leroux, M. Menvielle, E. Obrou, M. Petitdidier, S.O. Ogunade, C. A. Onwumechili, D. Rees, E. Sambou, M. Sow, J. Vassal, 2005, On Equatorial geophysics studies : The IGRGEA results during the last decade, *Journal of Atmosph and Solar Terrestrial Phys.*, Volume 67, 301-313, invited paper ICDC.

[14] Amory-Mazaudier, C. , M. Le Huy , Y. Cohen, V. Doumouya, A. Bourdillons, R. Fleuryb, B. Fontaine, C. Ha Duyen, A. Koba, P. Laroche, P. Lassudrie-Duchesne, H. Le Viet, T. Le Truong, H. Luu Viet, M. Menvielle', T. Nguyen Chien, A. Nguyen Xuan, M. Petitdidier, H. Pham Thi Thu, T. Pham Xuan, N. Philippon, L. Tran Thi, H. Vu Thien, P. Vila, 2006, Sun Earth System Interactions over Vietnam : an international cooperative project, *Annales Geophysicae*, 24,3313-3327,2006.

[15] Thompson, B.J., N. Gopalswamy, J.M. Davila, H.J. Haubold, Putting the “T” in IHY, The United Nations Report for the International Heliophysical Year 2007, *Studies in Space Policy*, Sring Wien New York, 2009.

[16] Davila , J., T. Bogdan and M. Hapgood, *International Space Weather Initiative*, 2009.