



Variations Transitoires Régulières de la Composante Horizontale du Champ Magnétique Terrestre en République démocratique du Congo pour un Cycle Solaire

[Regular Transitory Variations of the Horizontal Component of the Earth Magnetic Field in Democratic Republic of the Congo for one Solar Cycle]

Mukala K.^{1,*}, Nsimba M.¹, Manzuma M.¹, Mabilia M.¹, Kabongo M.¹, Onosaka S.¹, Zana N.², Tondonzi K.²

¹Centre de Recherche en Géophysique (CRG), Département de Géophysique interne, Section de Géomagnétisme, Kinshasa, République démocratique du Congo

²Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département de Physique, Unité de Géophysique, Kinshasa, République démocratique du Congo

Résumé

La République Démocratique du Congo, par rapport à sa position géographique, située au Sud de l'équateur géomagnétique, est une zone de grande variation de la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Nous avons analysé le cycle solaire 1955-1965 pour les données des observatoires: Binza et Karavia pour mieux comprendre la variation de la composante horizontale du champ magnétique terrestre en tenant compte de cinq jours magnétiques calmes de chaque mois. De cette analyse, l'étude montre que la RDC est sous l'influence des courants de Hall et de Pedersen appelés courants ionosphériques horizontaux circulant dans l'ionosphère terrestre par rapport à l'équateur géomagnétique. Ces courants sont responsables de phénomènes magnétiques tels que les orages et les sous orages magnétiques dans l'atmosphère neutre et aussi de l'induction des courants dans la croûte terrestre responsable de forte variation de la composante horizontale du champ magnétique terrestre au sol. Ces effets se manifestent entre l'aube et le crépuscule, avec une intensité variable au cours de la journée. De ce qui précède, il est important de tenir compte de la variation de l'intensité des courants ionosphériques horizontaux d'une manière générale pour mieux protéger les réseaux électromagnétiques face aux inductions des courants dans la croûte terrestre et l'environnement terrestre contre les radiations solaires.

Mots clés: Composante horizontale, courant ionosphérique, taches solaires

Abstract

With respect to its geographical position, the Democratic Republic of the Congo or DRC is located south of magnetic equator, an area of great variation in the horizontal component of the earth magnetic field. Our study attempts to figure out the implication of this phenomenon in DRC. Our analysis is limited to the solar cycle 1955-1965. It is based on 5 quiet magnetic each day as well as on the data from two observatories, Binza and Karavia. After data analysis, this study shows that the DRC is under the influence of Hall and Pedersen current called ionospheric current, which circulates in the earth's ionosphere with regard to the magnetic equator. These currents are responsible of some of the magnetic phenomena including thunderstorm and magnetic storm in neutral atmosphere. But also there are responsible of current induction into the crust, which generates large variations of the horizontal component of the earth magnetic field on ground. These effects occur between dawn and dusk with varying intensities during the day. From the above mentioned, it is important to take into account the variation in the intensity of the ionospheric current in general in order to better protect the magnetic network against the induction of the current in the crust but also to protect the terrestrial environment against solar radiation.

Keywords: Horizontal component, ionospheric current, sunspot

*Auteur correspondant: Mukala kalambaie Alphonse Claude (alphonsemukala37@gmail.com). Tél. : (+243) 81 65 75 298

Reçu le 20/06/2022; Révisé le 25/07/2022 ; Accepté le 15/08/2022

<https://doi.org/10.59228/rcst.022.v1.i1.08>

Copyright: ©2022 Mukala et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Le soleil est une vaste étoile dont le diamètre est de l'ordre de 1,392 106 km soit 109 fois le diamètre terrestre et possédant une masse de l'ordre de 1,99 1030 kg; sa densité moyenne de 1408 kg/m³ fait que la région centrale du soleil atteint de température propice à l'amorçage de réactions de fusion nucléaire (Gamow, 1966).

La quantité d'énergie émise par le Soleil sous forme de rayonnement est remarquablement constante. Cette émission d'énergie provient de son noyau (Figure 1). Dans cette zone, la température atteint environ $1,6 \cdot 10^7$ K, la densité étant alors égale à 150 fois celle de l'eau. Ces conditions favorisent l'interaction des noyaux des différents atomes d'hydrogène, qui subissent ainsi une fusion nucléaire. Ce processus convertit les noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnement (Cara, M, 1989).

Les photons libérés par la réaction nucléaire sont transportés en rayonnant jusqu'à la surface du Soleil. Cependant dans la zone de convection, l'énergie est transmise par l'intermédiaire des fortes turbulences gazeuses. La zone de convection est limitée par la photosphère. La photosphère a une apparence irrégulière et tachetée due à la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection, située juste en dessous de la photosphère.

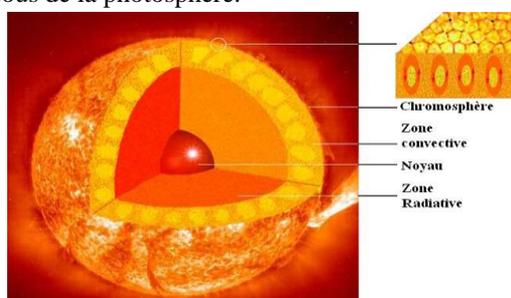


Figure 1. Structure du soleil (O.A. International 2002).

L'activité solaire se manifeste par l'apparition du champ magnétique solaire attesté par des taches solaires (Figure 2) et se projette dans l'atmosphère solaire formée par la chromosphère et la couronne.

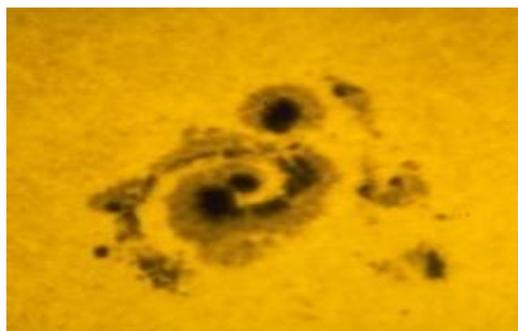


Figure 2. Les taches solaires (les points très sombres) et leurs pénombres (points moins sombres) (Image Sunspot-Spiral_noao190282.jpg).

L'énergie thermique ou l'agitation thermique au sein du soleil confère aux protons très légers et surabondants dans la couronne des vitesses bien supérieures aux électrons et s'échappent de la couronne. Les particules chargées ainsi éjectées se comportent comme un vent transportant un flux de l'ordre des 10^{10} atomes par seconde et par cm^3 . Les flux des particules chargées ou vent solaire provenant du soleil sont en partie déviés par les lignes de champ magnétique terrestre jusqu'aux pôles magnétiques, vers lesquels les particules chargées se précipitent dans l'atmosphère terrestre au niveau des cornets polaires (Yannis, 2007).

Le vent solaire est observé et mesuré depuis une trentaine d'année. Au niveau de l'orbite terrestre, sa vitesse moyenne est de l'ordre de 400 kms^{-1} , mais il existe en fait deux régimes de vent: le vent solaire rapide ($> 700 \text{ kms}^{-1}$) et peu dense. Et le vent solaire lent ($\approx 300 \text{ kms}^{-1}$) et dense. Le vent solaire piège le champ magnétique terrestre dans une zone appelée magnétosphère. La magnétosphère est très fortement déformée à l'approche des vents solaires (Figure 3).

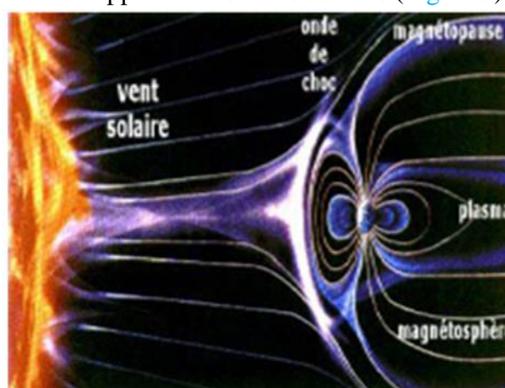


Figure 3. L'évolution de vents solaires dans l'environnement neutre et ionisé (Document NASA.MSFC 2007).

En 1943, l'astronome allemand Heinrich Schwab remarqua que la périodicité des taches solaires est en moyenne de onze ans.

Le nombre de taches solaires influence certains phénomènes géomagnétiques tels que les orages et les aurores polaires (Figure 4).

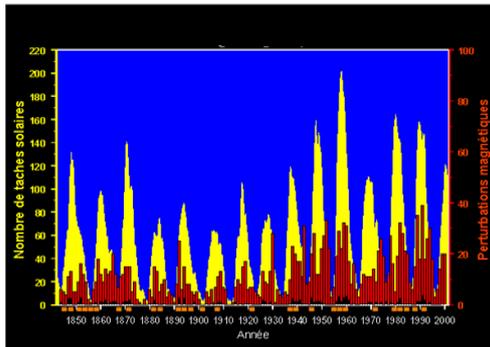


Figure 4. Evolution de nombre des taches solaires (en jaune) entre 1850 et 2000. Le pic des taches solaires est situé entre 1955 et 1965. En rouge, les perturbations magnétiques (Document NASA-MSFC 2007).

Les diamètres des taches solaires sont variables, les plus grandes atteignent des dizaines de milliers de kilomètres et les plus petites des centaines de kilomètres de diamètre. La grande majorité de taches solaires se produit entre les latitudes 5° et 30° au Nord et au Sud de l'équateur solaire, mais jamais ou très rarement au-dessus de 30° . A mesure que les années terrestres passent, la position et l'évolution des taches solaires sur le disque solaire décrivent une figure en forme de papillon (Figure 5).

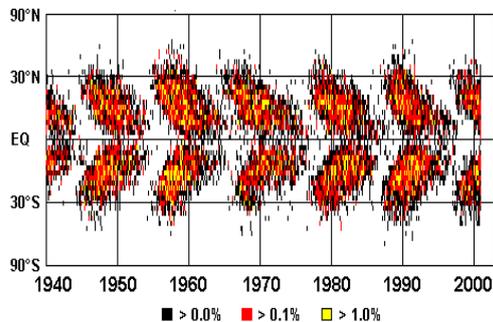


Figure 5. Les taches solaires en forme de papillon se situent entre $30^\circ N$ et $30^\circ S$ de l'équateur magnétique en fonction de quantité d'énergie dégagée par le Soleil (Document NASA-MSF 2007).

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre. Cette enveloppe gazeuse protège la vie biologique sur Terre en absorbant le rayonnement ultraviolet émis par le soleil, et en réchauffant la surface de la Terre par la rétention de la chaleur (effet de serre) ainsi qu'en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit. L'ionosphère est la région ionisée de la haute

atmosphère terrestre qui s'étend de 50 à 1600 km environ au-dessus de la surface de la Terre.

La principale source de cette ionisation est les rayonnements solaires (ultra-violet) qui créent ainsi des ions tout en favorisant la recombinaison des ions et les électrons. Le processus d'ionisation est contrebalancé par celui de perte électronique à travers la recombinaison ou l'attachement des électrons à des molécules neutres, ainsi que par des mouvements horizontaux et verticaux des particules chargées. En fonction de la concentration électronique, différentes couches ionosphériques sont ainsi formées.

Ces couches ionosphériques sont désignées par les lettres D, E et F par ordre croissant avec l'altitude (Figure 6). La composition électronique de l'ionosphère terrestre est souvent modifiée par des nombreuses réactions chimiques provoquées par l'activité solaire (Phan Thi Thu Hong, 2012).

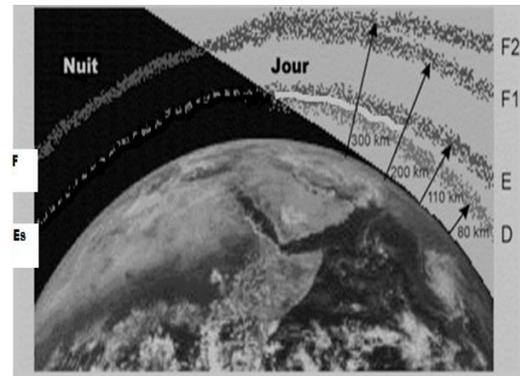


Figure 6. Les couches caractéristiques de l'ionosphère terrestre. Pendant la journée, nous avons les couches D, E, F1 et F2. Et la nuit, seules les couches Es et F apparaissent (Doc archives-ouvertes.pdf 2000).

Dans la haute ionosphère (région F au-dessus de 160 km), les fréquences de collisions électrons-particules neutres et ions-particules neutres sont inférieures à leurs gyrofréquences. La conductivité parallèle devient très grande devant celles de Pedersen et de Hall. La région F est surtout dominée par la diffusion du plasma à travers différents mécanismes. Les champs électriques et magnétiques imposent une dérive verticale aux ions et aux électrons. Ces derniers se meuvent alors ensemble dans la direction perpendiculaire au champ magnétique terrestre.

A basse altitude, les mouvements des ions relatifs aux particules neutres deviennent plus complexe, ayant des composantes parallèles et perpendiculaires au champ électrique. En dessous de 110 km, les

vitesses des ions et électrons sont égales tandis que les vitesses des électrons approchent celles des molécules neutres en dessous de 70 km. La densité de courant total selon la loi d'Ohm dans la haute ionosphère est définie par:

$$\vec{J} = \sigma_P(\vec{E}_\perp + \vec{V}_n \wedge \vec{B}) + \sigma_H \frac{\vec{B}}{B} \wedge (\vec{E}_\perp + \vec{V}_n \wedge \vec{B}) + \sigma_{\parallel} \vec{E}_{\parallel}$$

Où $\sigma_P = \frac{Ne_e}{B} \left(\frac{v_{in} \Omega_i}{v_{in}^2 + \Omega_i^2} + \frac{v_{en\perp} \Omega_e}{v_{en\perp}^2 + \Omega_e^2} \right)$: est la conductivité de Pedersen.

Et $\sigma_H = \frac{Ne_e}{B} \left(\frac{\Omega_e^2}{v_{en\perp}^2 + \Omega_e^2} - \frac{\Omega_i^2}{v_{in}^2 + \Omega_i^2} \right)$, la conductivité de Hall.

Les courants ionosphériques circulant dans l'ionosphère sont de trois types, appelés courants ionosphériques horizontaux. Le courant parallèle au champ magnétique terrestre (courants de champ alignés) et au champ électrique de convection. Puis, le courant de Pedersen qui circule perpendiculairement au champ magnétique terrestre et parallèlement au champ électrique de convection. Ensuite, le courant de Hall circulant perpendiculairement au champ électrique de convection et, est principalement porté par les électrons. Il peut atteindre une altitude moyenne de 110 km. Celui de Pedersen circule parallèlement au champ électrique de convection et, est porté par les ions (Figure 7). Il atteint une altitude maximale de 150 km. Ainsi donc l'ionosphère est considérée comme une plaque horizontale infiniment conductrice du champ magnétique (Deleroisi, 2004).

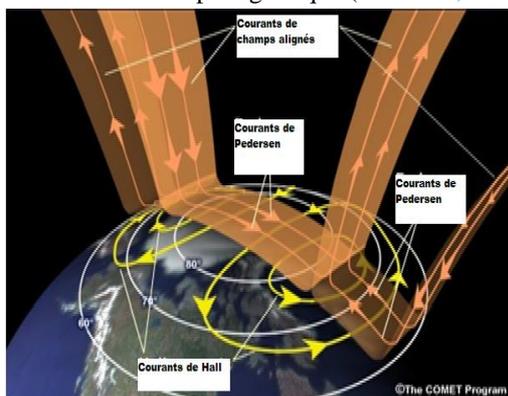


Figure 7. Circulation des courants de Pedersen, de Hall, et celui de courant de champ alignés de l'ionosphère terrestre (Document NASA, 2010).

En période calme d'activité solaire, le champ magnétique solaire réside en général dans le plan horizontal. Mais lorsque des boucles magnétiques se forment dans les éjections coronales, elles présentent de fortes composantes Nord-Sud.

Et donc, la circulation des courants ionosphériques dans l'atmosphère terrestre est responsable de la variation du champ magnétique terrestre (Bouligand, 2012).

2. Matériel et Méthodes

La RDC disposait de quatre observatoires géomagnétiques (Bunia-Ruampara, Lwiro, Karavia et Binza). Ces observatoires ont enregistré, depuis plusieurs décennies, les variations de la déclinaison magnétique **D**, de l'inclinaison magnétique **I**, des composantes: horizontale **H** et verticale **Z** du champ magnétique terrestre. Lesdits observatoires possédaient les équipements suivant: Un jeu de variomètres Lacour ; Des théodolites magnétiques de campagne Ruska ; Des inclinomètres de campagne Askania ; Des B.M.Z (Balance magnétique pour la composante verticale **Z**) ; De magnétomètre à proton ; Et sont en voies d'être réhabilités par le Centre de Recherche en Géophysique (Zana, 2004).

Le tableau 1 donne la localisation des milieux d'étude et leurs coordonnées géomagnétiques

Tableau 1. Les observatoires hérités par la R.D.C de l'époque coloniale

Observatoire	Latitude	Longitude	Altitude
Bunia-Rwampara	0°19'S	99°18'E	1300 m
Lwiro	4°S	98°12E	1680 m
Karavia	12°42'S	94°00'E	1260 m
Binza	4°22'S	15°15'E	450 m

L'étude menée se focalise sur les données enregistrées de la composante horizontale du champ magnétique terrestre au cours du cycle solaire 1955-1965, obtenues aux observatoires de Binza (Kinshasa) et de Karavia (Lubumbashi) (Tableau 1), en vue de dégager les implications de courants ionosphériques sur la composante horizontale du champ magnétique terrestre en RDC. L'influence des courants ionosphériques est un fait bien étudié dans l'hémisphère Nord alors que dans l'hémisphère Sud, en particulier en Afrique, cette influence est peu analysée (Bouligand, 2012).

Le Centre de Recherche en Géophysique possède les tableaux d'observations de plusieurs décennies. L'analyse des données présentées dans les tableaux définitifs; les courbes de variation diurne et saisonnière des deux observatoires nous permettent de dégager les implications de courants ionosphériques sur la composante horizontale du champ magnétique terrestre en RDC (Fambitokoye, 1973).

3. Résultats

Les données de la composante horizontale du champ magnétique terrestre des observatoires de Binza et de Karavia pour le cycle solaire 1955-1965 font l'objet de notre étude. Elles ont été obtenues à partir de l'enregistrement continu sur un variomètre à déroulement lent. L'enregistrement continu du champ magnétique terrestre fait apparaître une variation régulière liée au jour calme solaire. Cette variation fut mise en évidence pour la première fois par Graham en 1722 (Zana, 2004).

La moyenne des variations observées durant les cinq jours magnétiques calmes est appelée courant Sq. Cette composante horizontale a deux orientations: une (X) dirigée vers le Nord géographique et l'autre (Y) vers l'Est géographique. La composante X varie avec le cycle des taches solaires. Le courant SqX est associé au système de courants ionosphériques générés essentiellement par les dynamos atmosphériques. Les données sélectionnées pour les jours magnétiques calmes sont en corrélation avec les indices journaliers géomagnétiques (K_p ou Dst) pour déterminer la variation diurne SqX [9]. La variation diurne moyennée annuelle de SqX sur la période de 1955-1965 constitue la phase ascendante et, est observable sur la figure ci-dessous à l'observatoire de Binza et de Karavia (Figure 8).

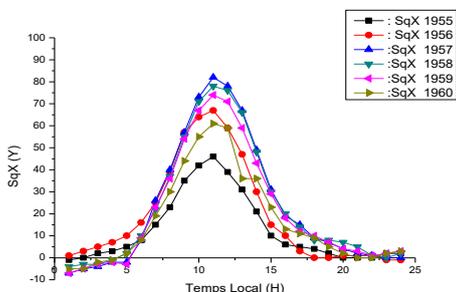


Figure 8. Variation diurne de SqX moyennée sur l'année pendant la période de 1955 à 1960 (phase ascendante) à Binza/Kinshasa.

La phase descendante est représentée par la Figure 9.

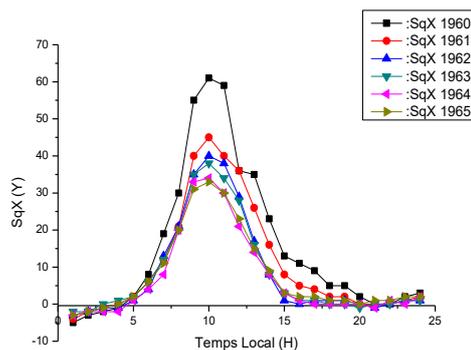


Figure 9. Variation diurne de SqX moyennée sur l'année pendant la période de 1960 à 1965 (phase descendante) à Binza/Kinshasa.

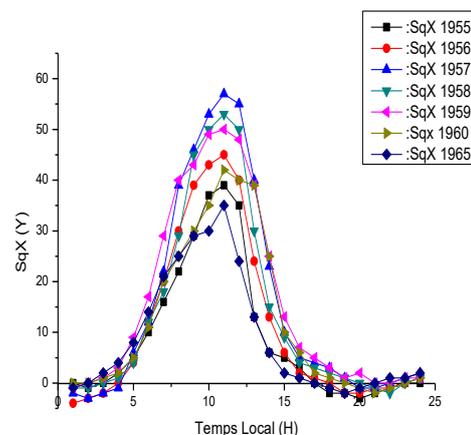


Figure 10. Variation diurne de SqX moyennée sur l'année pendant la période de 1955 à 1965 (phase descendante) à Karavia/Lubumbashi.

Il se dégage de la variation diurne de SqX moyennée sur les années de 1955 à 1965 (Figure 10) que l'amplitude de SqX a été la plus forte en 1957 pour les deux observatoires. Pour Binza, le SqX a atteint 88γ et 57γ pour Karavia.

Le Tableau 2 ci-dessous reprend les variations annuelles des amplitudes de SqX des jours calmes aux observatoires de Binza et Karavia et le nombre moyen de taches solaires au cours du cycle solaire 1955-1965.

Tableau 2. Variations annuelles des amplitudes de SqX à Binza et à Karavia en corrélation avec l'évolution de nombres des taches solaires au cours du cycle 1955-1965.

Année	SqX (en nT) à Binza	SqX (en nT) à Karavia	Nombre de taches solaires
1955	39	29	38
1956	59	45	141
1957	88	57	190

1958	76	55	184
1959	71	50	159
1960	59	42	112
1961	40	26	53
1962	38	22	37
1963	34	20	27
1964	34	36	10
1965	33	35	15

Ce [Tableau 2](#) montre que l'année 1957 est l'année de forte activité solaire pour le cycle considéré. Les amplitudes de SqX sont en corrélations avec les nombres de taches solaires.

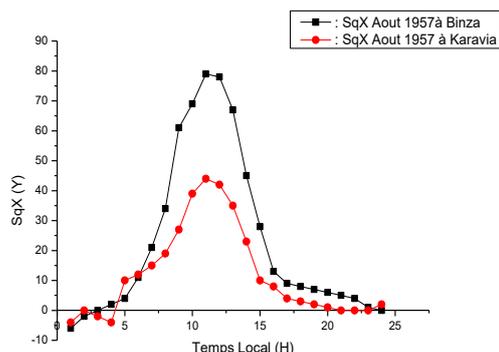


Figure 11. Variation diurne de SqX moyennée sur l'année 1957 au mois d'Août à Binza et à Karavia pour les cinq jours magnétiques calmes.

L'on constate que le SqX à Binza est $79\gamma(79nT)$ plus grand que celui de Karavia, qui est de $44\gamma(44nT)$. Ceci s'explique par le fait que Binza est plus proche de l'équateur magnétique que Karavia ([Figure 11](#)).

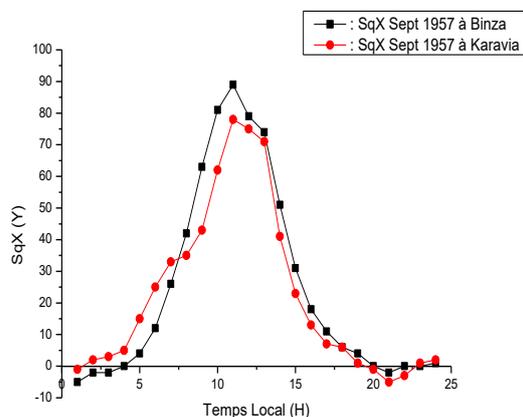


Figure 12. Variation diurne de SqX moyennée sur l'année 1957 au mois de Septembre à Binza et à Karavia pour les cinq jours magnétiques calmes.

De même au mois de Septembre ([Figure 12](#)), l'on constate que le SqX à Binza est $92\gamma(92nT)$ plus grand que celui de Karavia, qui est de $78\gamma(78nT)$.

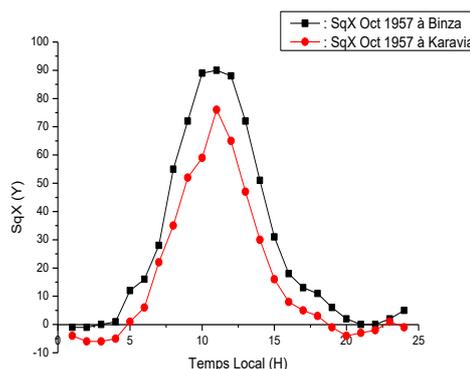


Figure 13. Variation diurne de SqX moyennée sur l'année 1957 au mois d'Octobre à Binza et à Karavia.

La [Figure 13](#) montre au mois d'Octobre que l'on observe la même situation. On a 90γ à Binza et 76γ à Karavia.

4. Discussion

Les indices géomagnétiques et solaires comme K_p , A_p et Dst décrivent à l'échelle planétaire l'activité du champ magnétique. Ces indices permettent de définir l'intensité de l'activité solaire, géomagnétique ou à l'occurrence des aurores magnétiques. Ils traduisent ainsi l'effet des courants quasi symétriques circulant à haute altitude. Nous nous servons des données de l'indice de Dst obtenues de SPIDR pour élucider les périodes de grande perturbation pendant les situations calmes ([Phan Thi Thu Hong, 2012](#)).

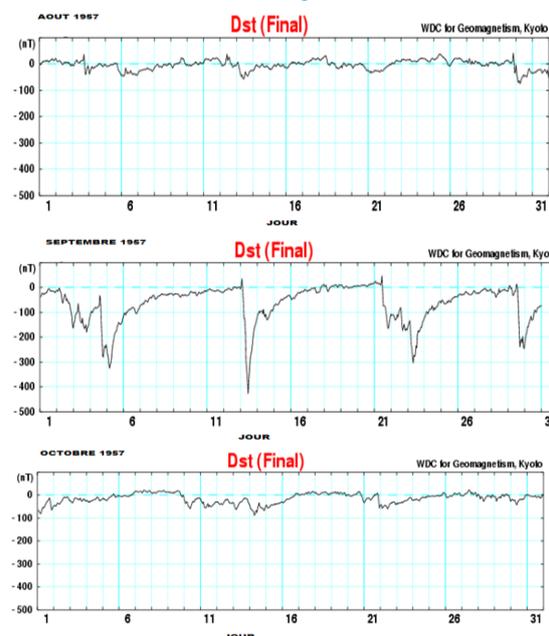


Figure. Variation de l'indice Dst au cours de notre cycle solaire 1955-1965 pour les mois d'Aout, de Septembre et d'octobre 1957 (SPIDR, 2014).

L'indice Dst prouve que la saison d'équinoxe de printemps reste la période de forte activité solaire sur l'échelle planétaire et confirme que le mois de Septembre 1957 fut le mois de forte intensité d'orage magnétique à l'échelle mondiale (Bouligand, 2012).

La composante horizontale H au cours de l'année 1957 présente des variations journalières cycliques ayant les caractéristiques spécifiques. Dans l'ensemble, la courbe des variations diurnes de SqX présente une allure en forme de cloche appelée courbe de Gauss ayant les particularités suivantes :

- de 00h00' à 05h00', la courbe présente une croissance lente. Ceci montre le début de dissociation des molécules neutres subissant l'influence des rayonnements solaires
- de 05h00 à 11h00, l'allure de la courbe est quasi exponentielle et atteint le maximum aux environs de 11h00' temps local quand le soleil est au zénith. A cet instant les particules chargées contenues dans le vent solaire précipitent dans l'ionosphère et la dissociation des molécules de l'atmosphère terrestre est totale.
- de 11h00' à 17h00', la courbe décroît progressivement d'une manière quasi exponentielle et atteint le minimum aux environs de 17h00'. En ce moment, les particules chargées se combinent pour former de molécules neutres.
- de 17h00' à 23h00', la courbe décroît de plus en plus jusqu'à s'annuler à cause de la recombinaison totale des particules chargées.
- l'amplitude de SqX est minimum pendant le Solstice d'hiver et d'été pour les deux observatoires.
- l'amplitude de SqX est beaucoup plus intense à l'observatoire de Binza (92nT) qu'à l'observatoire de Karavia (78nT) et plus précisément au mois de Septembre 1957 qui correspond à la saison d'équinoxe de printemps. Il faut noter que l'amplitude de SqX de l'équinoxe de printemps est plus prononcée par rapport à l'équinoxe d'automne. En moyenne annuelle, elle atteint 88nT à Binza et 57nT à Karavia

La composante horizontale du champ magnétique terrestre subit de variation diurne sur toute l'étendue de la RDC tout en maintenant son allure particulière.

Cette variation diurne de SqX est directement liée à la variation de saisons magnétiques et à l'évolution de nombre de tache solaire (Zana, 2004).

Dans la région équatoriale géomagnétique, on observe que, pendant de période de forte activité solaire, une augmentation de la densité électronique dans l'atmosphère terrestre proviennent de la dissociation des molécules atmosphériques suite aux radiations solaires. Et, cette densité électronique dans l'atmosphère s'accompagne des courants électriques très intenses. Ces courants électriques produits dans l'ionosphère induisent des courants électriques dans la croûte terrestre. Ces contre courants sont responsable de la variation diurne du champ magnétique terrestre au sol (Besse et Degond, 2001).

5. Conclusions

L'étude réalisée, à partir des données de la composante horizontale du champ magnétique terrestre fournies par les deux observatoires géomagnétiques: Binza et Karavia au cours du cycle solaire 1955-1965, a permis à la mise en évidence de l'influence de l'activité solaire sur la composante horizontale du champ magnétique terrestre en RDC pour les cinq jours calmes, et aussi la corrélation de la variation diurne de la composante horizontale du champ magnétique avec l'évolution de nombre de taches solaires. Cette étude a permis aussi de dégager les caractéristiques suivantes pour la RDC:

- le système de courants circulant dans l'ionosphère constitue un phénomène dont les effets sont plus manifestes entre l'aube et le crépuscule du soleil et, ils le sont moins la nuit; c'est un phénomène qui existe sur la face éclairée de la terre.
- l'intensité des courants ionosphériques est variable. Elle croît lentement de 0 heures jusqu'à 6 heures du matin. Après 6 heures, sa croissance est rapide jusqu'à atteindre le maximum à 11 heures (Temps local), rarement à 12 heures. L'intensité de ces courants décroît ensuite rapidement jusque vers 17 heures. Au-delà de 17 heures, la décroissance est lente jusqu'au crépuscule.
- L'influence de ces courants ionosphériques est directement proportionnelle à l'activité solaire, laquelle est fonction de l'évolution de nombre des taches solaires.

- L'intensité de SqX diminue lorsqu'on s'éloigne de l'équateur géomagnétique. Cela a été prouvé en observant les amplitudes moyennes mensuelles ou annuelles horaires de la composante horizontale du champ magnétique en rapport avec la localisation de ses deux observatoires géomagnétiques de la RDC. La station de Binza est plus proche de l'équateur géomagnétique que la station de Karavia.

L'intérêt de cette étude est de prévenir les scientifiques de la forte influence des courants ionosphériques sur le champ magnétique terrestre dans la zone équatoriale et, d'analyser suffisamment les variations transitoires du champ magnétique terrestre dans l'hémisphère Sud et, aussi de lutter contre l'impact du soleil sur l'environnement électromagnétique terrestre.

Remerciements

Les auteurs remercient tous ceux qui ont contribué à l'amélioration de la qualité de ce manuscrit.

Références bibliographiques

- Agnad, L. (1979). Introduction à la physique du globe, Paris, France.
- Ali, M, Nikinejad (2004). Electromagnetics for high-speed analogy and digital communication circuit, Cambridge.
- Angot, A., (1972). Compléments de math, Masson, Paris, France.
- Berlin, M. (1984). Electromagnétisme: Electrostatique: Milieux continus, Dunod, Paris, France.
- Besse et Degond (2001). Cours de modélisation mathématique des plasmas au service des technologies spatiales, Université Paul Sabatier, France.
- Cara, M. (1989). Géophysique, Dunod, Paris, France.
- Chapman, S. (1961). The earth's magnetism, John Wiley & Sons, New-York.
- Bouligand, C. (2012). Etude sur le comportement du champ magnétique terrestre durant les périodes de polarité stable, Institut de Physique du Globe de Paris, France.
- Coulomb, J., Jobert, (1976). Traité de Géophysique interne, tome II : Magnétisme et Géodynamisme, Masson, Paris, France.
- Donald, H. (1959). Our sun, Havard University Press.
- Edward, J. (1980). Electromagnetics, CRC Press.
- Gamow, G. (1966). Une étoile nommée Soleil, Dunod, Paris, France.
- George, K., Parks, (2004). Physics of space plasmas, Seconde Edition Westview Press California.
- Goguel, J. (1971). Encyclopédie de la pléiade, Géophysique, Ed. Gallimard.
- Herrinck, P. (1958). Principe d'un magnétomètre à résonance nucléaire, N.S.IV, 3.
- Howell, B.F. (1969). Introduction à la Géophysique, Masson, Paris, France.
- <https://international.geomagnetism.index>
- <https://www.spird>
- Deleroisi, J.L. (1994). Physique des plasmas, CNRS, Paris, France.
- Milton, D. (1981). Introduction to Geological prospecting, 3ème Edition Gallimard.
- Pham Thi Thu, H. (2012). Analyse et interprétation de la variation régulière du champ magnétique terrestre au Viet Nam et modélisation de l'ionosphère, Université Pierre et Marie Curie, France.
- Hurtoud, Y. (2007). Modélisation de la dynamique couplée des plasmas magnétique et ionosphère, Université de Toulouse III, France..
- Zana, N. (2004). Cours de Géophysique, Unikin
- Zana, N. (2004). Etude des variations des composantes horizontales H et verticale Z du champ magnétique terrestre à Binza de 1960 à 1970. Centre de Recherche en Géophysique (CRG), Rapport de Recherche: pp.11-24.