

LES SECOUSSES MAGNÉTIQUES VUES PAR LES DONNÉES SCALAIRES SATELLITAIRES.

Yasmine YAHIAT*, Mohamed HAMOUDI* et Mioara MANDEA**

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur la détection des secousses magnétiques dans les variations temporelles du champ magnétique terrestre à partir de mesures collectées par le satellite allemand CHAMP. Les données scalaires et vectorielles, utilisées dans cette étude, couvrent la période 2001-2006. La nouveauté de cette étude réside dans l'intérêt que nous portons aux données scalaires. De récentes publications faites par Manda et Olsen (2006) et Olsen et Manda (2007) montrent que les variations temporelles de ce champ magnétique, à l'échelle mensuelle, déterminées à partir des données magnétiques vectorielles d'observatoires, sont comparables à celles obtenues à partir de satellites.

Nous présentons ici une étude similaire mais à partir, cette fois-ci, des données scalaires de quatre observatoires, Hermanus (HER) en Afrique du Sud, Kakioka (KAK) au Japon, Chambon-La-Forêt (CLF) en France et Niemegk (NGK) en Allemagne. La comparaison de la variation séculaire de l'intensité du champ magnétique terrestre, déduite des données d'observatoires au sol avec celle de leurs correspondants "virtuels", déduite des données satellitaires, nous a permis de: 1/ montrer que l'évolution temporelle de la variation séculaire est similaire dans les deux cas et 2/ mettre en évidence, pour les deux types de données scalaires, un changement de pente entre mi-décembre 2002 et mi-mars 2003, changement annonciateur d'une secousse magnétique à cette époque.

La généralisation de cette étude sur plus de 62 mois de données à l'échelle du globe, pour une grille de 5°x 5°, soient 2592 observatoires virtuels, permettrait de confirmer que cette secousse est un phénomène à l'échelle régionale comme déduit de l'étude basée sur les données vectorielles de Olsen et Manda (2007). Ces premiers résultats, très probants, ouvrent le chemin vers une possible étude des secousses magnétiques dans les mesures satellitaires collectées par les autres satellites magnétiques.

Mots clés - Géomagnétisme - Secousse magnétique - Variation séculaire - Régression linéaire.

*Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, FSTGAT, Département de Géophysique, Bab-Ezzouar, Alger. E-Mail: yasminayahiat@yahoo.fr; hamoudi@usthb.dz

** GeoForschungsZentrum, GFZ, Potsdam, Allemagne. E-Mail: mioara@gfz-potsdam.de

- Manuscrit déposé le 11 Mai 2008, accepté après révision le 27 Mai 2008.

THE GEOMAGNETIC JERKS VIEWED BY SCALAR SATELLITE DATA.

ABSTRACT

This work focuses on the detection of geomagnetic jerk in temporal variations of the Earth's magnetic field from measurements collected by the German CHAMP satellite. The novelty of the study aims for our interest in magnetic field intensity data. The scalar and vector data, used in this study, cover the period 2001 - 2006. Recent publications by Mandeia and Olsen (2006) and Olsen and Mandeia (2007) show that the temporal variations over months, determined from the vector magnetic observatories data, are slightly different from those derived from satellite data. In this paper, we present a similar study based solely on scalar data from four observatories, Hermanus (HER) in South Africa, Kakioka (KAK) in Japan, Chambon-La-Forêt (CLF) in France and Niemegek (NGK) in Germany. The comparison of the secular variation of the Earth's magnetic field from ground observatories and their "virtual" corresponding observatories at satellite altitude has enabled us to: 1 / show that the temporal evolution of the secular variation is similar in both cases and 2 / clearly show, for both types of scalar magnetic data, a change of slope between mid-December 2002 and mid-March 2003, annunciator of a magnetic jerk at that time.

The generalization of this study on a global scale, on a grid of $5^\circ \times 5^\circ$ (2592 virtual observatories for more than 62 months of data), would confirm that this jerk is a phenomenon at the regional scale as inferred from the study based on vector data by Olsen and Mandeia (2007). These very initial successful results encouragingly push towards a possible investigation of magnetic jerk in the satellite measurements collected by other magnetic satellites.

Key words - Geomagnetism - Geomagnetic jerk - Secular variation - Linear regression.

1. INTRODUCTION

Le champ magnétique terrestre provient de la contribution de différentes sources internes et externes à la terre. Le noyau terrestre externe fluide et la lithosphère, sources internes génèrent respectivement le champ nucléaire, dit aussi principal et le champ d'anomalies. Le champ principal est caractérisé par sa variation temporelle, appelée variation séculaire. L'intensité de ce champ mesurée à la surface de la terre varie entre, environ, 30000 nanoTeslas (nT) à l'équateur (avec des valeurs minimales autour de 20000 nT dans la région de l'Atlantique Sud) et 70000 nT aux pôles. Quant au champ lithosphérique, il provient de la croûte terrestre et de la partie supérieure du manteau. Son amplitude est en général, de quelques nT à quelques centaines de nT. On note que les plus fortes anomalies magnétiques peuvent atteindre

22000 nT. Sa contribution au champ interne est nettement plus faible que celle du champ nucléaire. Les champs ionosphériques et magnétosphériques proviennent, respectivement, de la circulation des courants dans l'ionosphère et la magnétosphère. Ces deux régions, entourant l'atmosphère neutre et la terre, sont perturbées par l'activité solaire. Les variations du champ externe sont de quelques nT en période calme et peuvent atteindre plusieurs milliers de nT en période d'orage magnétique. Ces variations sont caractérisées par les indices d'activité magnétique Dst^1 et Kp^2 .

Différents travaux portant sur la compréhension des variations spatio-temporelles du champ géomagnétique ont le plus souvent utilisé les données collectées par les observatoires au sol (Courtillot et Le Mouél, 1976, 1984, 1985; Alexandrescu et al., 1995, 1996).

¹ - <http://isgi.cetp.ipsl.fr>
<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

² - http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegek/kp_index/

A la surface de la terre, la distribution géographique très éparse de ces observatoires demeure nettement insuffisante pour une étude globale du phénomène, d'où la nécessité d'une couverture planétaire. L'avènement de l'ère spatiale et les lancements des satellites géomagnétiques en orbites basses altitudes ont permis de réaliser cette couverture globale. Ainsi, les plate-formes OGO2, OG4 et OGO6 de la série POGO (Polar Orbiting Geophysical Observatory) (Cain *et al.*, 1966, 1967) constituent la plus ancienne série de satellites américains mis sur orbite à partir de 1965. En 1979, MAGSAT (MAGnetic field SATellite) (Langel *et al.*, 1980) a été le premier satellite américain de mesures scalaires et vectorielles de haute résolution, couplées avec un système de positionnement très précis dont la couverture à basses altitudes a permis d'établir des modèles magnétiques globaux de très bonne précision jusque-là inégalée (quelques nT). La courte durée de vie, de l'ordre de sept mois, de MAGSAT n'a cependant pas permis d'études précises de la variation séculaire du champ géomagnétique. OERSTED, satellite danois mis en orbite en 1999 (Neubert *et al.*, 2001; Stauning, 2007) puis CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), satellite allemand mis en orbite en 2000 (exemple Lühr *et al.*, 2001) ont, par contre, fourni des quantités importantes de données de plus en plus précises, constituant ainsi des bases de données géomagnétiques couvrant toute la surface de la terre sur plusieurs années. Ces missions satellitaires, dont les durées de vie initiales étaient de quatorze mois pour OERSTED et de cinq années pour CHAMP, continuent de collecter des données, ce qui permet des descriptions spatiale et temporelle du champ interne de plus en plus précises et donc une meilleure compréhension du champ magnétique terrestre.

La variation séculaire représente la variation temporelle du champ principal. Sa période caractéristique est de l'ordre de la décennie, voire du siècle. Cette variation, souvent non linéaire, présente parfois un changement brusque de

tendance, appelé secousse géomagnétique ou jerk, mis en évidence pour la première fois par Courtillot *et al.*, en 1978 (voir également Mandaia *et al.*, 2000; Chambodut *et al.*, 2007 et leurs références). De nombreuses études du comportement du champ ont été réalisées à partir des données d'observatoires (Alexandrescu *et al.*, 1995, 1996), utilisant entre autres, l'analyse par transformée en ondelettes des données mensuelles d'observatoires pour caractériser les secousses magnétiques, sans avoir des informations a priori sur leurs distributions temporelle et spatiale, et plus récemment à partir des données satellitaires (Chambodut, 2004; Chambodut et Mandaia, 2005; Eymin *et al.*, 2007). Dans une étude portant sur les caractéristiques temporelles des secousses géomagnétiques, Sabaka *et al.* (2002, 2004) ont utilisé des données satellitaires couplées à des données d'observatoires dans des modèles de champ continu dits «Comprehensive Models». D'autres auteurs ont ensuite approfondi cette idée (Chambodut et Mandaia, 2005) pour mettre en évidence la distribution des dates d'occurrence de plusieurs secousses géomagnétiques. Cependant, certaines questions restent posées sur, par exemple, l'origine, l'échelle et le caractère brusque de ces événements magnétiques (Le Huy *et al.*, 2000; Bloxham *et al.*, 2002).

Une nouvelle approche (Mandaia et Olsen, 2006) montre que les variations temporelles à l'échelle mensuelle, extraites à partir de données d'observatoires pendant la période 2001-2006, sont comparables à celles obtenues par satellites. Dans une deuxième étude (Olsen et Mandaia, 2007), les auteurs ont établi une grille d'observatoires virtuels couvrant toute la sphère. Les variations temporelles des trois composantes du champ ont été étudiées pour toutes ces positions pendant la même période.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la variation temporelle de l'intensité du champ magnétique terrestre. Cela a été réalisé à partir de mesures collectées par le satellite

CHAMP, pendant la période 2001-2006, dans le but d'une part, de comparer les variations séculaires de l'intensité du champ magnétique mesuré par les observatoires au sol avec leurs correspondants virtuels et, d'autre part, de retrouver dans les données scalaires satellitaires d'éventuels secousses géomagnétiques préalablement détectées au sol. Pour cela, quatre observatoires ont été sélectionnés: Hermanus (HER) en Afrique du Sud, Kakioka (KAK) au Japon, Chambon-La-Forêt (CLF) en France et Niemegk (NGK) en Allemagne.

2. LES DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées pour cette étude sont de deux types: 1/ des données provenant des quatre observatoires au sol cités précédemment, pendant la période 2001-2006. Le jeu de données d'observatoires au sol utilisé est basé sur des séries temporelles de moyennes mensuelles déterminées à partir des moyennes horaires (Mandea et Olsen, 2006), 2/ des données magnétiques satellitaires distribuées suivant une grille virtuelle établie par Olsen et Mandea (2007), à partir des mesures en orbite du satellite allemand CHAMP pendant la même période. Les auteurs ont opté pour les données collectées par CHAMP, car celui-ci a été placé en orbite basses altitudes (entre 350 et 450 km) afin d'obtenir une résolution optimale du champ magnétique principal de la terre. De plus, ces données satellitaires couvrent toute la période d'intérêt, rendant l'approche développée par les auteurs possible. Cette approche consiste à construire des observatoires virtuels, à une altitude fixe, dans un espace global couvrant même les océans dans le but d'obtenir une première estimation de la variation séculaire, uniquement à partir des données satellitaires. Ainsi, pour chaque observatoire virtuel, toutes les données satellitaires collectées par CHAMP dans un cylindre de rayon de 100 km, centré à la position de l'observatoire au sol sont retenues. Ces données subissent dans un premier temps,

un traitement pour réduire les effets de la variation d'altitude (entre 350 et 450 km) et des deux manœuvres d'orbites du satellite (10-11 juin 2002 et 9-10 décembre 2002). Les données obtenues constituent ainsi, des séries temporelles continues. Les valeurs moyennes mensuelles sont ensuite, calculées à l'intérieur du cylindre pour chaque position, constituant une grille virtuelle de $5^\circ \times 5^\circ$. Ainsi, des séries temporelles pour 2592 positions, chacune sur une période de 62 mois, sont disponibles. De plus, chaque observatoire au sol a, ainsi, son correspondant virtuel (Mandea et Olsen, 2006).

3. MÉTHODE ET RÉSULTATS

Pour notre étude, nous avons sélectionné à partir des données mensuelles de la grille virtuelle, les composantes du vecteur champ géomagnétique pour les quatre observatoires considérés pendant l'intervalle de temps 2001-2006. Les trois composantes X, Y et Z permettent de déduire la valeur scalaire B de ce champ. La variation séculaire est obtenue, par la suite, en calculant la dérivée première de B pour les deux types de données. La superposition de la courbe de la variation séculaire de B (fig. 1a, b, c et d) pour les quatre observatoires virtuels et celle de leurs correspondants au sol, pendant la mission satellitaire 2001-2006, montre, pour les quatre sites, une assez bonne cohérence et une même tendance de la variation séculaire entre les données scalaires satellitaires virtuelles et les données d'observatoires au sol. Ces résultats confirment ceux obtenus par Mandea et Olsen (2006) et Olsen et Mandea (2007), suite à leur étude comparative sur plusieurs sites, des données vectorielles satellitaires à celles d'observatoires au sol.

Dans le but de détecter d'éventuelles secousses magnétiques sur les deux types de données scalaires considérées, toujours pendant la période 2001-2006, nous avons appliqué la méthodologie développée par Courtillot et Le Mouél

LES SECOUSSES MAGNÉTIQUES VUES PAR LES DONNÉES SCALAIRES SATELLITAIRES

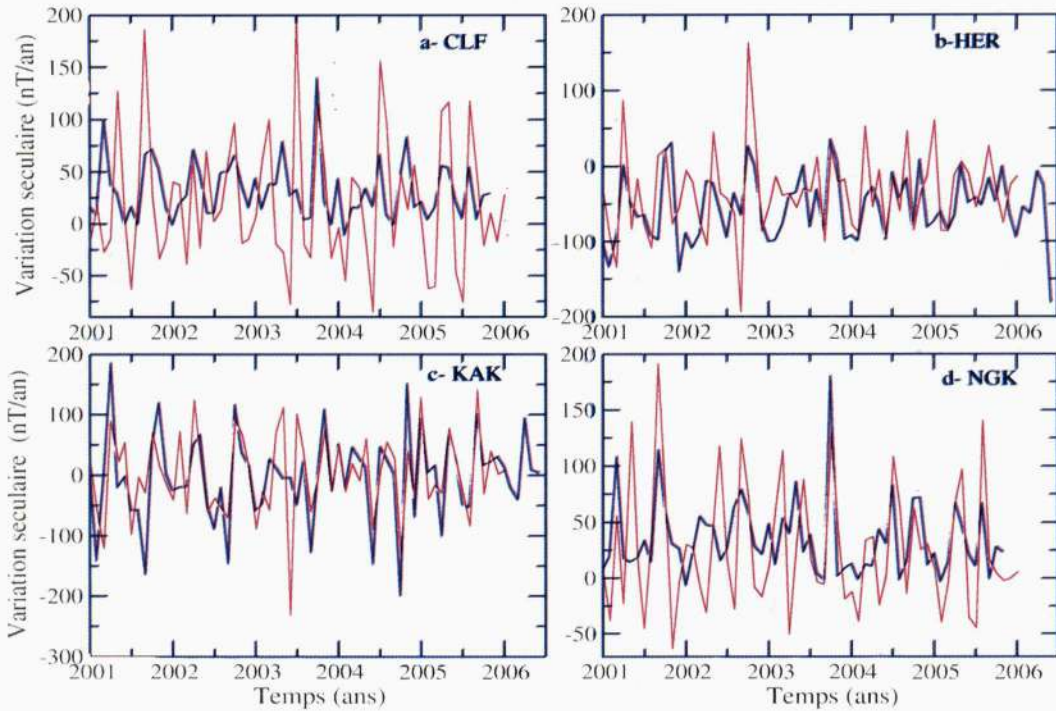


Fig. 1 - Variation séculaire de l'intensité du champ magnétique pour des observatoires au sol (bleu) et leurs correspondants virtuels (rouge), a- Chambon-La-Forêt (CLF), b- Hermanus (HER), c- Kakioka (KAK), d- Niemegek (NGK).

Secular variation for the magnetic field intensity at ground observatories (blue) and their corresponding «virtual observatories» (red), a- Chambon-La-Forêt (CLF), b- Hermanus (HER), c- Kakioka (KAK), d- Niemegek (NGK).

(1976) et Mandea et Olsen (2006) qui consiste à repérer les changements de tendance de la variation séculaire par régression linéaire, changements permettant de détecter les jerks (Le Mouél et al., 1982). Des régressions linéaires par partie, utilisant les moindres carrés, sont calculées sur les courbes de variations séculaires pour les observatoires au sol et leurs correspondants virtuels. La figure 2 représente les droites de régression relatives aux variations séculaires issues des données au sol pour les quatre positions considérées; une rupture de pente au voisinage de 2003 est observée sur les quatre courbes. Ce changement de pente se produit plus précisément, vers 2003.01 pour la position au sol CLF (fig.2a), 2003.20 pour HER (fig.2b), 2003.03 pour KAK (fig.2c) et 2003.20 pour

NGK (fig.2d). Les droites de régression sur les données virtuelles (fig.3) confirment ce changement de pente au début de l'année 2003 dans les quatre cas; il se produit vers 2003.10 pour CLF virtuel (fig.3a), 2003.20 pour HER (fig.3b), 2003.06 pour KAK (fig.3c) et 2002.95 pour NGK (fig.3d). La comparaison entre les droites de régression des données au sol et virtuelles montre une même tendance pour un même observatoire. Si l'on admet comme Le Mouél et al. (1982) que ces changements de pente sont le signe d'une secousse magnétique, alors nous pouvons affirmer qu'une secousse a bien eu lieu en 2003 (globalement entre 2002.95 et 2003.2). Ces résultats sur la recherche des jerks géomagnétiques dans les données scalaires satellitaires, pendant la période 2001-2006, sont en concordance avec

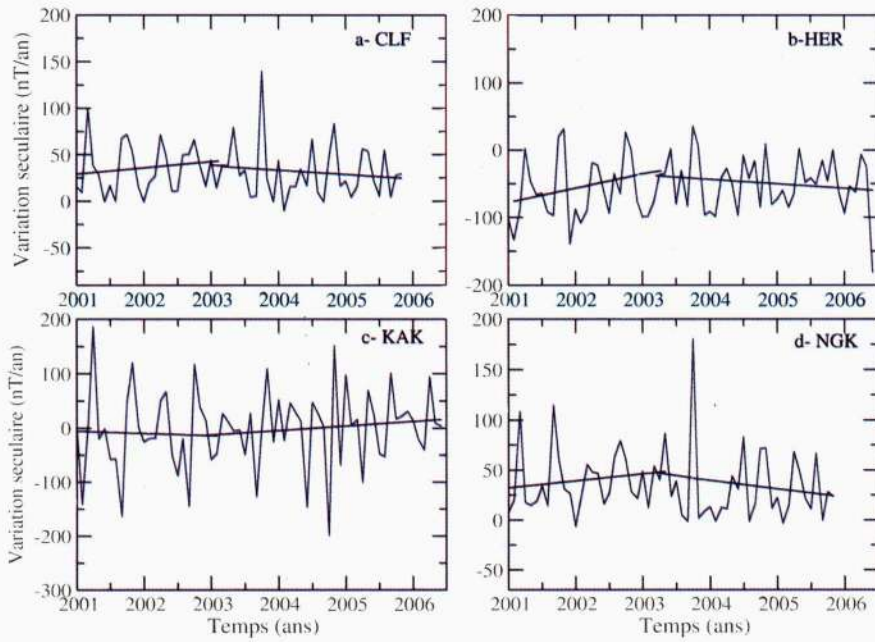


Fig. 2 - Droites de régression pour les observatoires virtuels, a- CLF, b- HER, c- KAK, d- NGK.

Linear regressions for the «virtual observatories», a - CLF, b - HER, c - KAK, d - NGK.

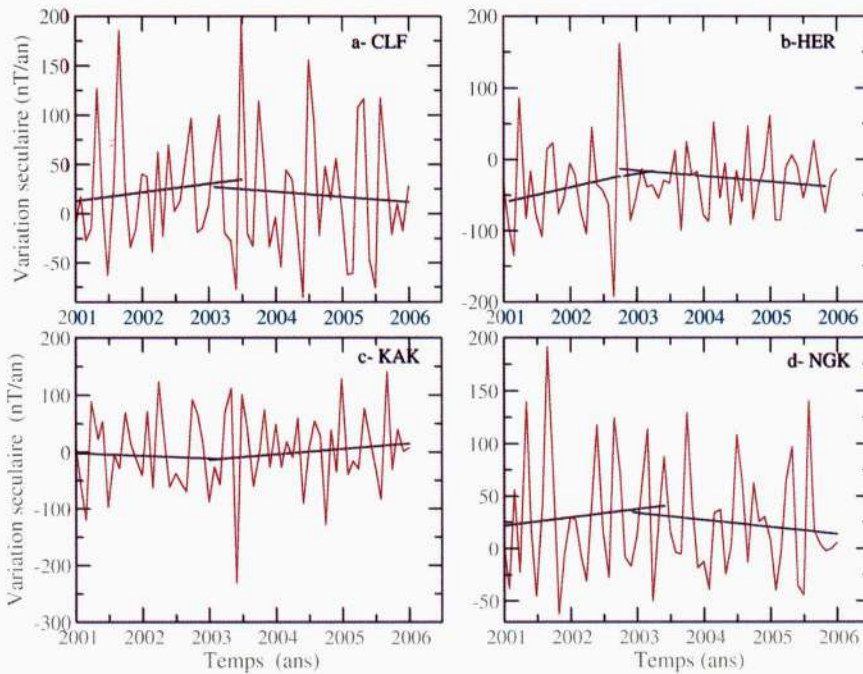


Fig. 3 - Droites de régression pour les observatoires au sol, a- CLF, b- HER, c- KAK, d- NGK.

Linear regressions for the ground observatories, a - CLF, b - HER, c - KAK, d - NGK.

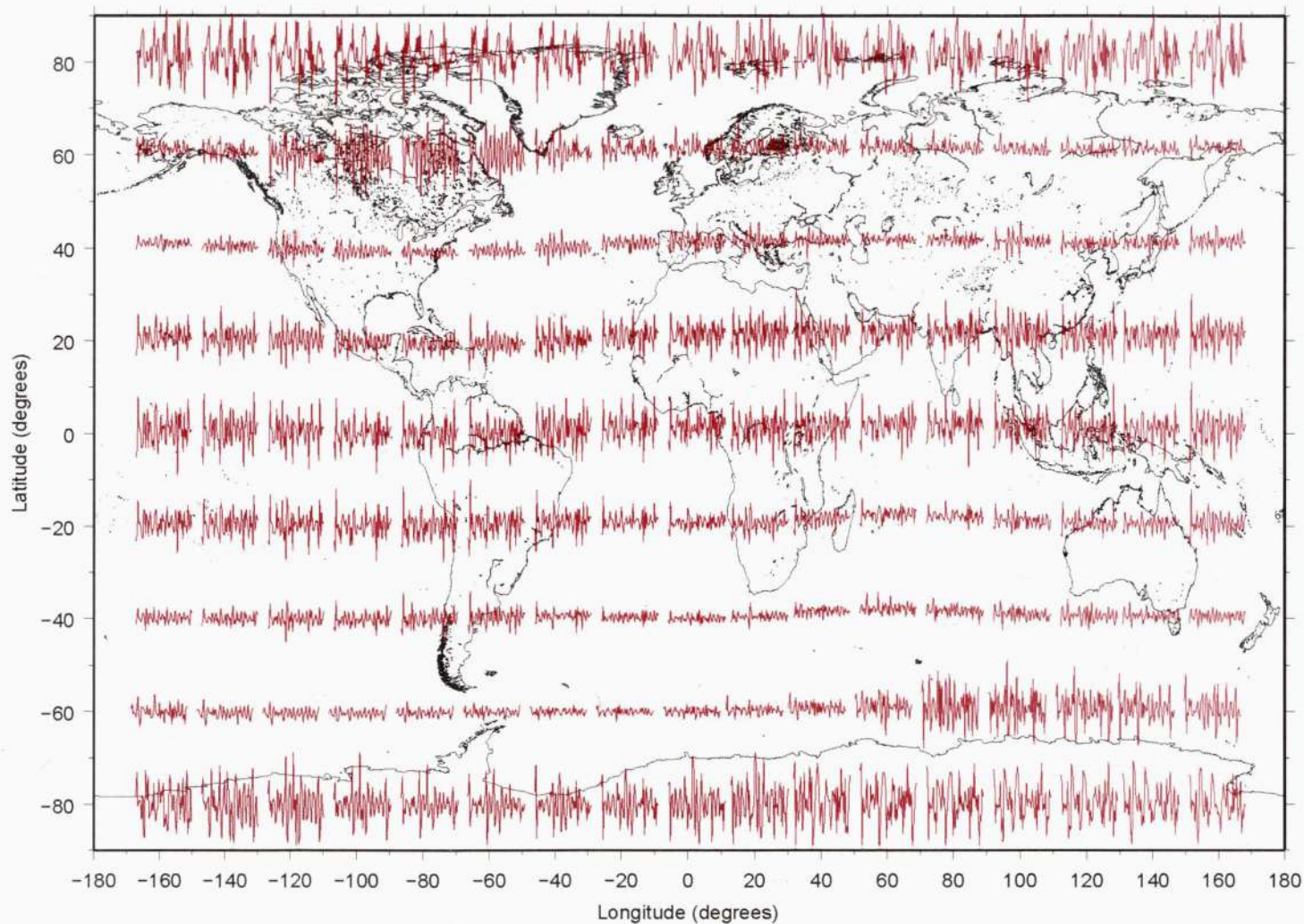


Fig. 4 - Carte globale de la variation séculaire de l'intensité du champ magnétique pour les différentes positions virtuelles d'observatoires (à l'altitude du satellite), sur une grille de 20°x 20°, pendant l'intervalle de temps 2001-2006.

Secular variation of the magnetic field intensity (at satellite altitude), for the different virtual observatory positions, each 20°x 20°, during the time-interval 2001-2006.

les travaux sur les données vectorielles d'Olsen et Manda (2007). Ceci montre donc, une fois de plus, que les secousses géomagnétiques peuvent être détectées sur les données satellitaires.

Une carte globale des courbes de la variation séculaire satellitaire, sur une grille de $5^\circ \times 5^\circ$, à une altitude de 400 km, soit 2592 observatoires virtuels, sur la même période 2001-2006, a été réalisée. Cette carte est représentée en figure 4 sur une grille $20^\circ \times 20^\circ$ pour une meilleure visualisation. Les droites de régression sur ces courbes, au niveau de chaque point de la grille, permettraient de voir l'occurrence de ce jerk à l'échelle du globe et de confirmer sa nature régionale (Olsen et Manda, 2007).

4. CONCLUSION

Les résultats de cette étude menée sur les données scalaires montrent d'une façon claire la possibilité de détecter d'éventuelles secousses du champ magnétique à partir de données collectées par satellites.

Les variations des courbes de la variation séculaire satellitaire et d'observatoires sont quasi-similaires. Les variations de tendance de ces courbes, évaluées par régressions linéaires, ont confirmé l'occurrence du jerk de 2003, répertorié auparavant et mis en évidence sur des données satellitaires vectorielles par Olsen et Manda (2007).

La nouveauté de cette étude réside dans notre réussite à détecter des secousses magnétiques dans la série de données de la variation séculaire de l'intensité du champ magnétique. Cela ouvre ainsi, le chemin vers une possible investigation des secousses magnétiques dans les mesures satellitaires collectées par les autres satellites magnétiques. En effet, nous nous proposons de revenir aux données scalaires fournies par la série POGO et de les analyser pour une nouvelle étude des secousses de 1969.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRESCU, M., GIBERT, D., HULOT, G., LE MOUËL J.-L. AND SARACCO, G. 1995. Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis. *J. Geophys. Res.*, 100, 12557-12572.
- ALEXANDRESCU, M., GIBERT, D., HULOT, G., LE MOUËL J.-L. AND SARACCO, G. 1996. Worldwide analysis of geomagnetic jerk. *J. Geophys. Res.*, 101, 21975-21994.
- BLOXHAM, J., ZATMAN, S. AND DUMBERRY, M. 2002. The origin of geomagnetic jerks. *Nature*. 420, 65-68.
- CAIN, J. C., LANGEL, R. A. AND HENDRICKS, S. J., 1966. First magnetic field results from the OGO-2 satellite. *Goddard Space Flight Center NASA*, Report X-612-66-305.
- CAIN, J. C., HENDRICKS, S. -J. AND LANGEL, R. A. 1967. A proposed model for the international geomagnetic reference field-1965. *Goddard Space Flight Center NASA*, Report X-67-173.
- CHAMBODUT, A. 2004. Le champ magnétique terrestre: structures spatiales et variations temporelles vues par les ondelettes. *Thèse PhD., Institut de Physique du Globe de Paris*.
- CHAMBODUT, A. AND MANDEA, M. 2005. Evidence for geomagnetic jerks in comprehensive models. *Earth Planets and Space*, 57, 2, 139-149.
- CHAMBODUT, A., EYMIN, C. AND MANDEA, M. 2007. Geomagnetic jerks from the Earth's surface to the top of the core. *Earth Planets and Space*, 59, 7. 675-684 p.
- COURTILLOT, V. AND LE MOUËL, J. L. 1976. On the long period variations of the Earth's magnetic field from 2 months to 20 years. *J. geophys. Res.*, 81, 2941-2950.
- COURTILLOT, V., DUCRUIX, J. ET LE MOUËL, J.-L. 1978. Sur une variation récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre. *C.R. Acad. Sci. D*, 287, 1095-1098.
- COURTILLOT, V. AND LE MOUËL, J.-L. 1984. Geomagnetic secular variation impulses. *Nature*, 311, 709-716.

- COURTILLOT, V. AND LE MOUËL, J.-L. 1985.** Comment on discussion of impulses and jerks in the geomagnetic field's by L.R. Alldredge. *J. Geophys. Res.*, 90, 6897-6898.
- EYMIN, C., CHAMBODUT, A. AND MANDEA, M. 2007.** Geomagnetic jerks at the top of the core. EGU05-A-08403, *EUG*, Vienna (A).
- LANGEL, R. A., ESTES, R.H., MEAD, G.D., FABIANO, E.B. AND LANCASTER, E.R. 1980.** Initial geomagnetic field model from MAGSAT vector data. *Geophys. Res. Lett.*, 7, No. 10, 793-796.
- LE HUY, M., MANDEA, M., LE MOUËL, J.-L. AND PAIS, A. 2000.** Time evolution of the fluid flow at the top of the core. *Earth Planets and Space*, 52, 163-173.
- LE MOUËL, J. L., DUCRUIX, J. AND DUYEN, C. 1982.** The worldwide character of the 1969-1970 impulse of the secular acceleration rate. *Phys. Earth planet. Inter.* 28, 337-350.
- LÜHR, H., GRUNWALDT, L., FÖRSTE, C., SCHWINTZER, P. AND REIGBER, C. 2001.** CHAMP Reference Systems, Transformations and Standards. *Report GeoForschungsZentrum Potsdam*.
- MANDEA, M., BELLANGER, E. AND LE MOUËL, J.-L. 2000.** A geomagnetic jerk for the end of the 20th century? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 183, 369-373.
- MANDEA, M. AND OLSEN, N., 2006.** A new approach to directly determine the secular variation from magnetic satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15306, doi:10.1029/2006GL026616.
- NEUBERT, T., M., MANDEA, G., HULOT, R., VON FRESE, F., PRIMDAHL, J. L., JORGENSEN, E., FRIIS-CHRISTENSEN, P., STAUNING, N., OLSEN AND RISBO, T. 2001.** High-Precision geomagnetic field data from the Orsted satellite, *EOS*, 82, 81-87.
- OLSEN, N. AND MANDEA, M. 2007.** Investigation of secular variation impulse using satellite data: the 2003 geomagnetic jerk. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 255, 94-105, doi: 10.1016/j.espl.2006.12.008.
- SABAKA, T. -J., OLSEN, N. AND LANGEL, R. A. 2002.** A comprehensive model of the quiet-time, near-earth magnetic field: phase 3. *Geophys. J. Int.* 151, 32-68.
- SABAKA, T. J., OLSEN, N. AND PURUCKER, M. E. 2004.** Extending comprehensive models of the earth's magnetic field with oersted and champ data. *Geophys. J. Int.*, 159, (2), 521-547.
- STAUNING, P. 2007.** Oersted, the danish miracle in space. *Nordic Space*, 15(2).