

LE GÉOMAGNÉTISME ET LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Aude Chambodut, École et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg
Aurélien Marchaudon, Institut de recherche en astrophysique et planétologie, Toulouse

Dans l'actualité récente (du 10 au 12 mai 2024) de magnifiques aurores ont été visibles dans toute la France hexagonale. Dès le 5 mai, les systèmes d'alertes internationaux observant le Soleil en continu avaient diligemment prévenu les autorités, opérateurs de satellites et de réseaux de distributions de fluides à la surface de la Terre, de la possible prochaine occurrence d'orages magnétiques et des probables répercussions sur les infrastructures humaines.

« Possible » occurrence seulement car un phénomène observé par les astrophysiciens à la surface du Soleil ne donne pas forcément lieu à un événement magnétique observé par les géomagnéticiens à la surface de la Terre. Le chemin est long et les processus magnétiques engendrés sur notre environnement planétaire proche demeurent complexes. Pour les appréhender, il faut déjà avoir une vue d'ensemble du champ magnétique de la Terre.

Le champ géomagnétique dans l'espace et dans le temps

En première approximation le champ géomagnétique (géo pour Terre) observé à la surface de la Terre apparaît très semblable au champ produit par un dipôle magnétique situé au centre de la Terre d'où émergent des lignes de champ magnétique sortant de l'hémisphère Sud de notre planète et rentrant dans l'hémisphère Nord. On remarque au passage que, selon la convention physique, le pôle magnétique dans l'hémisphère Nord est en fait un pôle magnétique sud, et inversement le pôle magnétique dans l'hémisphère sud est un pôle magnétique nord. Mais par habitude et convention historique, les pôles géographiques et magnétiques sont qualifiés de manière identique, Nord ou Sud, selon leur hémisphère. Mais au-delà de cette grossière simplification, le champ géomagnétique est la superposition de plusieurs contributions aux multiples échelles spatiales et temporelles.

Les différentes contributions du champ magnétique mesuré peuvent être séparées en deux ensembles selon leur origine interne ou externe.

Les **sources d'origine interne** proviennent de l'intérieur de la planète. On distingue le champ magnétique principal et le champ magnétique crustal.

Le champ magnétique principal contribue pour 90 % du champ observé, il trouve son origine dans le noyau terrestre. Le noyau externe, liquide et métallique, est en mouvement. Les particules qui se déplacent (environ quelques dizaines de km/an en surface du noyau) créent des courants électriques qui eux-mêmes induisent un champ magnétique puissant principalement dipolaire. C'est la géodynamo. Ce champ principal contribue peu aux variations spatiales (entre un lieu et un autre) observées à la surface du globe, en tout cas pas en deçà de distances de l'ordre de 2 500 km. Sa variation temporelle, connue sous le nom de « variation séculaire »¹, contient des constantes de temps allant de la centaine de millions d'années (fréquence des inversions au cours des temps géologiques) jusqu'au mois (occurrence de phénomènes du noyau connus comme les secousses géomagnétiques).

Le champ magnétique crustal, issu des roches aimantées de la croûte terrestre, est beaucoup plus faible en intensité. Ses échelles spatiales sont régies par la géologie et couvrent donc les échelles continentales à celles très locales. Le champ crustal est considéré comme constant dans le temps, l'induction² est négligée.

Les **sources d'origine externe** apparaissent beaucoup plus complexes. Elles sont issues de la circulation de courants électriques dans la sphère d'influence du champ magnétique de la Terre dans l'espace, qu'on appelle magnétosphère. Ces courants varient dans le temps et l'espace en réponse aux marées thermiques dans la haute atmosphère appelée ionosphère, aux interactions entre le vent solaire et la magnétosphère, mais également aux variations de l'activité solaire, qui suit en particulier un cycle de 11 ans.

L'ionosphère est une région de l'atmosphère qui s'étend au-delà d'environ 75 km d'altitude et qui est créée essentiellement par le rayonnement ionisant

1 C'est un abus de langage historique des géomagnéticiens puisque les échelles temporelles mises en jeu vont bien au-delà de la centaine d'années, nous le savons maintenant.

2 L'induction est le processus par lequel un champ magnétique est généré par un courant électrique (ou inversement). Ici, il s'agit de courants électriques pouvant circuler dans la roche.

(UV et X) solaire. Autour de 100 km d'altitude, elle est particulièrement conductrice d'électricité. À cette altitude, l'ionosphère subit donc des effets diurnes, saisonniers et géographiques. Plusieurs systèmes de courants horizontaux coexistent : aux basses latitudes, une bande de courant suit l'équateur magnétique du côté « jour » c'est l'électrojet équatorial ; aux moyennes latitudes des boucles de courants héliosynchrones sont les seuls courants d'importance significative pendant les jours calmes, exempts d'une activité solaire marquée ; aux hautes latitudes, des électrojets auroraux rejoignent les courants alignés quasi-verticaux qui couplent directement l'ionosphère à la magnétosphère en suivant les lignes de force du champ magnétique principal (figure 1).

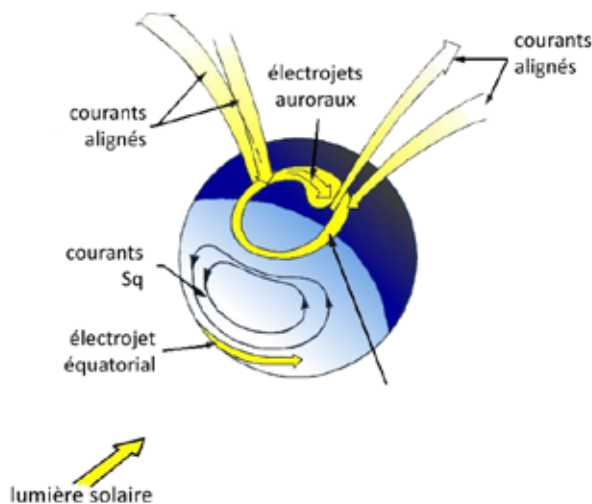


Fig.1. Schéma simplifié des courants ionosphériques, d'après Lanzerotti et al. (1993).

La **magnétosphère** correspond à la cavité entourant notre planète dont la limite inférieure est l'ionosphère et qui s'étend jusqu'au plus profond des zones contrôlées par le champ magnétique principal. La magnétosphère est comprimée du côté jour par le vent solaire et demeure en période calme d'une épaisseur d'une dizaine de rayons terrestres tandis qu'elle est étirée du côté nuit sur plusieurs milliers de rayons terrestres. Comme pour l'ionosphère plusieurs systèmes de courants ont leurs sièges au sein de la magnétosphère : les courants de magnétopause, des courants de surface qui résultent directement de l'interaction avec le vent solaire ; les courants de feuillets neutres qui s'étendent dans la queue de la magnétosphère ; l'anneau de courant équatorial à 20 000 km d'altitude environ (figure 2).

Si les champs internes ne sont pas affectés par les événements solaires (comme les éjections coronales de masse, ces grandes expulsions de plasma et de champ magnétique solaires), les champs externes connaissent eux de profonds bouleversements et réagissent violemment aux humeurs du Soleil. Leurs effets sont commensurables jusque dans les mesures magnétiques des observatoires à la surface de la Terre.

Les indices d'activité magnétique : produits de données pour la météorologie de l'espace

Dès le début de l'observation en continu des variations du champ magnétique au XIX^e siècle, les opérateurs des premiers observatoires magnétiques constatent directement des variations diurnes régulières de quelques dizaines de nanoteslas (nT), et, pendant d'autres périodes, des variations intenses de plusieurs milliers de nT (figure 3). Le phénomène des orages magnétiques est alors connu mais demeure encore limité à des observations en des points ponctuels à la surface de la Terre, dans les observatoires.

Il faut attendre le milieu de XX^e siècle et des échanges scientifiques plus soutenus de données au niveau internationale, sous l'égide de l'organisation qui allait devenir l'Association internationale de géomagnétisme et d'aéronomie (IAGA), pour que les variations du champ magnétique à la surface de la Terre soit quantifiées de manière globale avec des indices d'activité magnétique. Calculés à partir des données d'observatoires répartis inégalement à la surface du globe, les indices d'activité magnétique donnent une information résumée, mais homogène dans le temps, de la quantification de processus

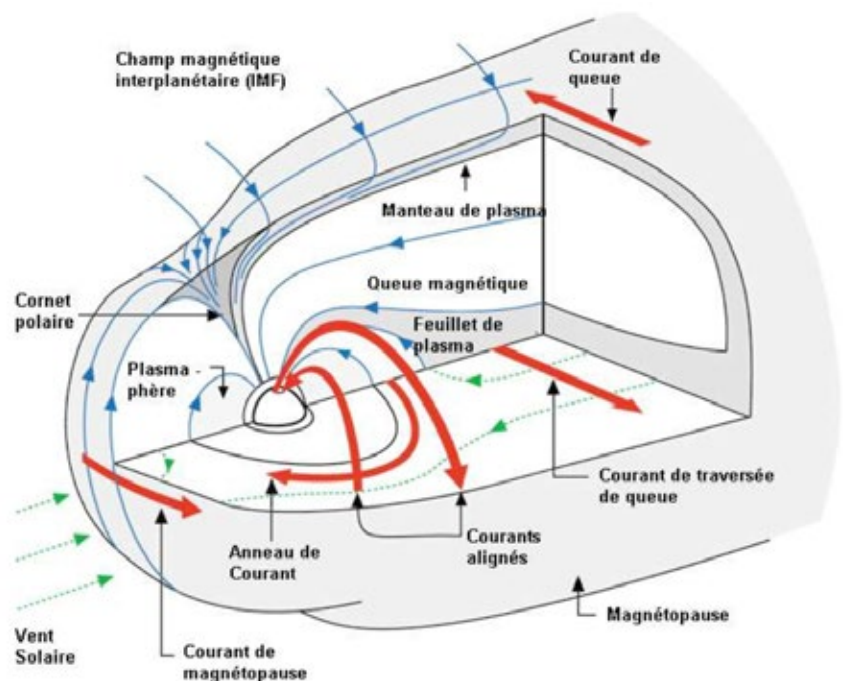


Fig.2. Schéma structurel de la magnétosphère, d'après Kivelson et Russell(1995).



Fig.3. Variations du champ magnétique terrestre mesuré à l'Observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt du 4 au 15 mai 2024. (Les données sont issues du service national français d'observation en magnétisme Bureau Central de Magnétisme Terrestre-BCMT.) Les 7, 8 et 9 mai sont des journées calmes où la variation diurne est clairement visible tandis que le 10 mai au soir voit se développer un orage magnétique intense.

physiques idéalisés prenant naissance dans l'ionosphère et/ou la magnétosphère.

Dès les années 50, IAGA reconnaît et donne son *imprimatur* à certains indices qui montrent des caractéristiques spécifiques :

- la description ou la quantification d'un processus physique nouveau, de façon nouvelle ou de manière plus efficace ;
- un algorithme de calcul clair et une reproductibilité/réplicabilité des calculs ;
- des processus documentés en cas de changement du réseau des observatoires dont les données servent à calculer l'indice considéré ; et
- une mise à disposition de l'indice sous une licence ouverte en respectant les principes de la Science ouverte. Les indices sont alors chacun placés sous la responsabilité d'un institut international, collaborant au sein du service international des indices d'activité magnétique (ISGI), pour garantir l'homogénéité de la série de données.

Des pôles à l'équateur (figure 4) :

- les indices *PC* (Nord et Sud) permettent depuis 1975 de surveiller l'activité géomagnétique sur les calottes polaires causée par les changements du champ magnétique interplanétaire et du vent solaire en couplage direct avec ses régions, indépendamment de l'heure, de la saison et du cycle solaire.
- les indices auroraux *AE/AU/AL/AO* quantifient à partir de 1957 les perturbations du champ magnétique tangent à la surface de la Terre aux latitudes aurorales Nord et permettent de surveiller les électrojets auroraux, courants horizontaux circulant autour des calottes polaires qui

peuvent devenir intenses durant les orages géomagnétiques.

- l'indice *aa* dont la série est disponible depuis 1868, mesure l'amplitude de l'activité géomagnétique globale sur la plus longue période possible ;
- l'indice *am* commence en 1959 et fournit une caractérisation de l'activité géomagnétique aux moyennes latitudes en utilisant un large ensemble de stations représentant toutes les longitudes et par hémisphère.
- l'indice *Kp* vise à caractériser l'intensité de l'activité géomagnétique à l'échelle planétaire depuis 1932, toutefois, en raison du contexte de guerre froide au moment de sa création, *Kp* demeure pertinent uniquement pour les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord.
- l'indice *Dst* débute en 1957 et vise à décrire

la signature magnétique axisymétrique des courants de la magnétosphère, notamment l'anneau de courant, les courants de queue et de la magnétopause. Un indice semblable au *Dst* a été introduit plus récemment, il s'agit de l'indice *SYM-H*. Le *SYM-H* est défini chaque minute contre une valeur par heure pour le *Dst*.

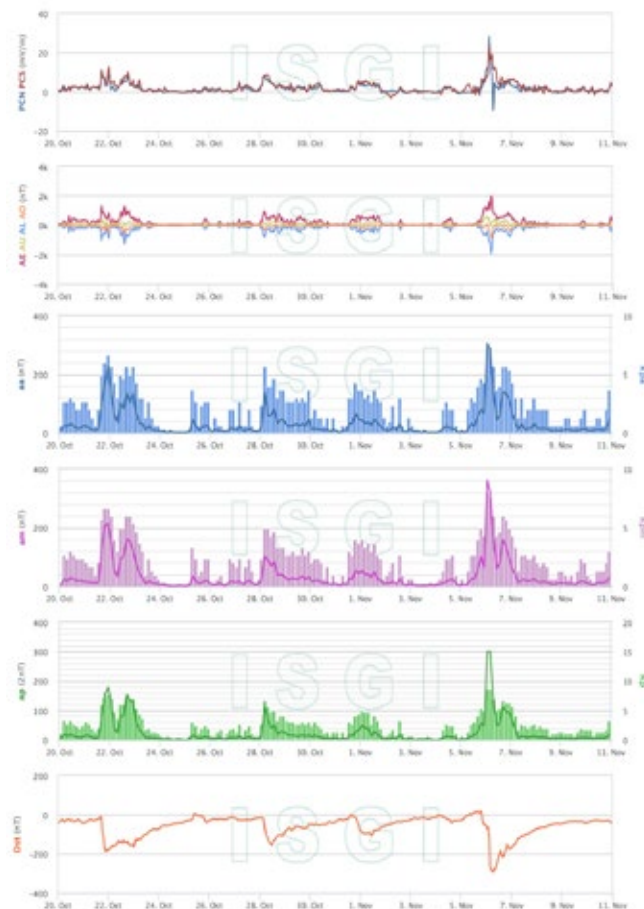


Fig.4. Exemples de variations des indices d'activités magnétiques sur une vingtaine de jours lors de 4 orages magnétiques successifs fin 2001. De haut en bas : les indices *PC*, *AE/AU/AL/AO*, *aa*, *am*, *Kp* et *Dst*. (ISGI, CC BY-NC).

Ces indices historiques constituent des séries de données inestimables dans le développement de la météorologie de l'espace, mais aussi pour la climatologie spatiale du fait des longueurs de séries de données sur parfois plus de 150 ans.

Mais ces indices furent développés en d'autres temps, avec des contraintes technologiques et scientifiques qui ne sont plus les mêmes à l'heure actuelle. Les magnétogrammes analogiques (sur papier photographique) des premiers observatoires ont laissé la place à des transmissions en temps réel de données numériques échantillonnées à la seconde. Les indices historiques des moyennes latitudes (*aa*, *am* et *Kp*) ne prennent pas en compte la lente variation des coordonnées géomagnétiques des observatoires de leurs réseaux due à la variation séculaire du champ magnétique principal. Les pionniers scientifiques à l'origine des indices (Julius Bartels pour l'indice *Kp*, Pierre-Noël Mayaud pour les indices *aa* et *am*) n'imaginaient sans doute pas que, plus de 60 ans plus tard, les mêmes séries d'indices seraient toujours calculées à l'identique. Étudiés avec les techniques actuelles, comparés aux données des infrastructures satellitaires, certains indices présentent d'évidentes limitations ou artefacts.

Dans ce contexte, depuis une dizaine d'années, de nouveaux indices sont développés par plusieurs équipes internationales. Parfois calculés avec basés sur les mêmes algorithmes que les indices historiques, ces nouveaux

indices utilisent des réseaux étendus d'observatoires, ou disposent de meilleures résolutions spatiales et/ou temporelles.

Il devient rapidement évident que les efforts doivent d'abord être portés sur la bonne caractérisation du niveau de base (de référence) en conditions calmes pour les observatoires magnétiques à toutes les latitudes magnétiques. Il peut paraître antinomique de développer des indices d'activité magnétique en ne regardant, dans un premier temps, que les périodes « sans » activité. Dans les faits, il n'en est rien puisque les futurs indices doivent refléter l'activité magnétique des événements uniquement, c'est-à-dire, en s'affranchissant autant que possible des contributions en situation magnétique calme telle que la variation diurne due à l'ionosphère, le cycle solaire ou la variation séculaire du champ principal.

Ainsi, des travaux d'un groupe de recherche français (regroupant des astronomes/astrophysiciens de l'IRAP à Toulouse et de l'IPAG à Grenoble et des géomagnéticiens des observatoires de l'EOST à Strasbourg et du LATMOS à Guyancourt) conduisent au concept d'un nouvel indice d'activité magnétique hémisphérique et planétaire nommé α , valable aux moyennes latitudes avec un pas d'échantillonnage de 15 minutes (figure 5).

Ce premier développement montre l'intérêt de poursuivre le développement de nouveaux indices aux moyennes latitudes avec de meilleures résolutions spatiale et temporelle.

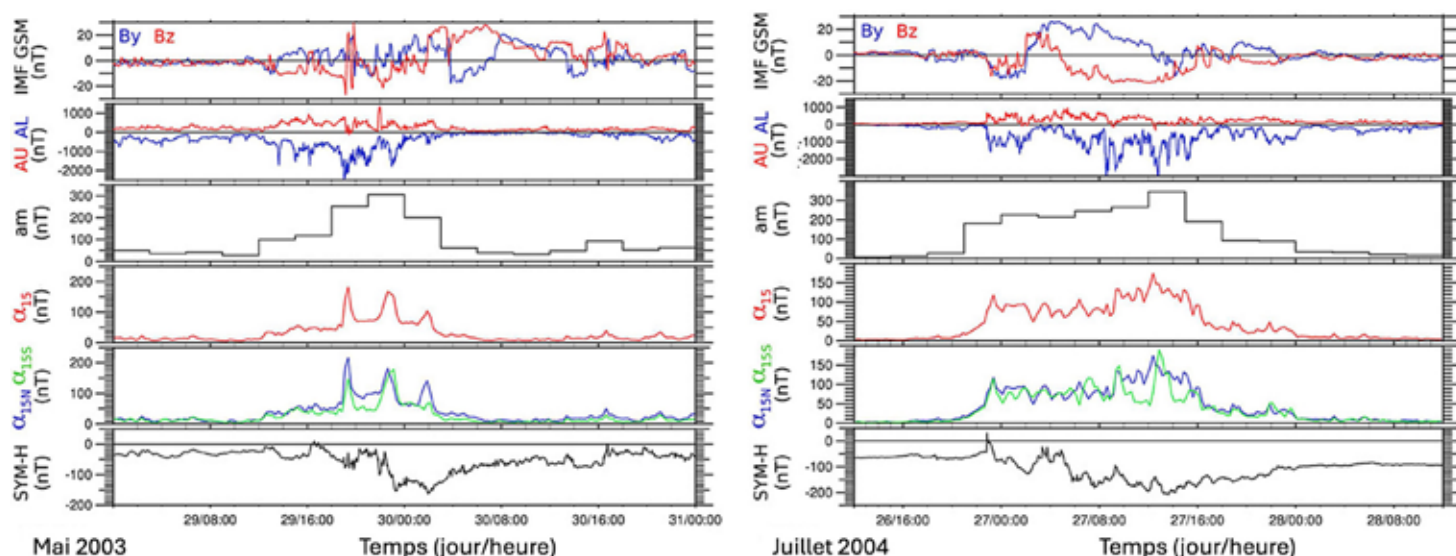


Fig.5. Paramètres du vent solaire et indices géomagnétiques pendant les orages magnétiques du 29 mai 2003 (colonne de gauche) et du 27 juillet 2004 (colonne de droite). (de haut en bas) Les composantes Y et Z du champ magnétique interplanétaire en coordonnées géocentriques magnétosphère-Soleil (GSM), les indices d'activité magnétique AU et AL, l'indice am, l'indice α_{15} planétaire, les indices hémisphériques Nord et Sud α_{15N} et α_{15S} , et l'indice SYM-H (proche de l'indice historique Dst). D'après Chambodut et al (2015).

Vers une meilleure définition des lignes de bases pour, bientôt, de nouveaux indices

Le choix est alors fait de revenir aux séries temporelles des mesures des observatoires et d'utiliser une approche, permise par les capacités actuelles de calcul, de filtrage du signal sur les composantes horizontales des données d'observatoires à moyenne latitude sur presque une trentaine d'années.

Pour les périodes calmes, les variations des différents filtres permettent d'observer finement, pour chaque observatoire, les tendances à long terme comme la variation séculaire du champ magnétique principal, les variations saisonnières et diurnes (Figure 6). Des statistiques robustes sont opérées sur un grand nombre d'observatoires magnétiques. Les comparaisons avec d'autres méthodes traditionnelles de calcul de lignes de base (utilisées notamment pour les indices historiques) montrent de bons accords, tout en présentant l'avantage d'une détermination objective issue du filtrage sans aucune nécessité d'information *a priori*.

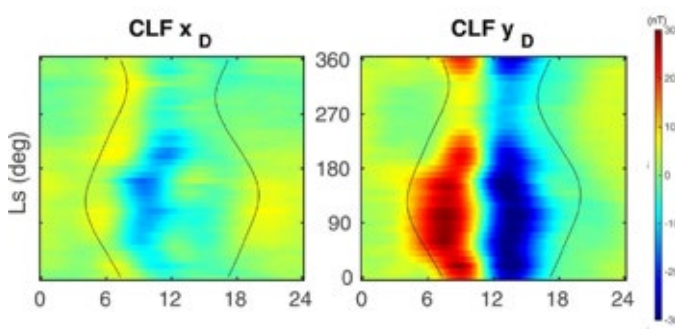


Fig.6. Composantes horizontales filtrées (xD et yD) moyennées pour les jours calmes sur un cycle solaire, à l'observatoire de Chambon-la-Forêt, en fonction de l'heure locale (en abscisse) et de la saison (Longitude solaire en ordonnée). Les lignes noires indiquent le lever et le coucher du Soleil. D'après Haberle et al.(2022).

Pour les périodes perturbées, la méthode du filtrage fait nécessairement apparaître des limitations puisque les orages magnétiques contiennent eux-mêmes de nombreuses fréquences. Il est donc nécessaire de discriminer les périodes calmes des périodes perturbées et de définir une procédure de calcul de la ligne de base lors des périodes perturbées.

Ces derniers développements sont toujours en cours. Plusieurs possibilités émergent en tirant parti des nombreuses et complètes statistiques obtenues précédemment : propager tout simplement les variations calmes des jours précédents ? Modéliser la ligne de base des périodes perturbées grâce à l'intelligence artificielle avec, en entrée, les paramètres du vent solaire obtenus à partir des d'observations spatiales en amont de la Terre ? Choisir une approche hybride ?

Quels que soient les choix opérés, les produits de données finaux devront :

- être recalculés sur aussi loin que possible dans le passé de permettre des inter comparaisons sur plusieurs cycles solaires ;
- présenter des caractéristiques spécifiques à une utilisation en opérationnel, et, sans doute, en prévision à court terme, pour l'estimation de l'activité magnétique dans l'environnement proche de la Terre.

L'objectif principal de ces développements est bien de répondre aux besoins actuels des communautés utilisatrices des indices d'activité magnétique et des services en météorologie de l'espace, tant dans la recherche académique qu'au sein des mondes industriel (aviation civile, gestionnaires de réseaux de fluides – énergie, aérospatiale) ou militaire. ■

Références

- Chambodut, A., Marchaudon, A., Lathuillère, C., Menvielle, M., & Foucault, E. (2015). New hemispheric geomagnetic indices α with 15 min time resolution. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(11), 9943-9958. Doi : 10.1002/2015JA021479
- Haberle, V., Marchaudon, A., Chambodut, A., & Blelly, P. L. (2022). Direct Determination of Geomagnetic Baselines During Quiet Periods for Low-and Mid-Latitude Observatories. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(8), Doi : 10.1029/2022JA030407.
- Kivelson, M. G., et C. T. Russell (1995). Introduction to Space Physics, chap. A brief history of Solar-Terrestrial physics, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Lanzerotti, L. J., Langel, R. A., & Chave, A. D. (1993). Geoelectromagnetism. Encyclopedia of Applied Physics, Vol.7.
- PCN: World Data Center For Geomagnetism, Copenhagen. (2019). The Polar Cap North (PCN) index (definitive) [Data set]. DTU Space, Geomagnetism doi:10.11581/DTU:00000057
- AE/AU/AL/A0 : World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Nose M., Iyemori T., Sugiura M. and Kamei T. (2015) - Geomagnetic AE index, doi:10.17593/15031-54800.
- aa: Mayaud, P.-N., Menvielle, M., & Chambodut, A. (2023). aa geomagnetic index. EOST. (Dataset). doi:10.25577/9z05-v751
- am : Mayaud, P.-N., Berthelier, A., Menvielle, M., & Chambodut, A. (2023). am geomagnetic index. EOST. (Dataset). doi:10.25577/et43-6h78
- Kp : Matzka, J., O. Bronkalla, K. Tornow, K. Elger and C. Stolle (2021) - Geomagnetic Kp index. V. 1.0, GFZ Data Services, doi:10.5880/Kp.0001
- Dst : World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Nose M., Iyemori T., Sugiura M. and Kamei T. (2015) - Geomagnetic Dst index, doi:10.17593/14515-74000.