

MESURE DES ONDES SIFFLEMENTS POUR L'ÉTUDE DE LA PLASMASPHERE DE LA TERRE

Fabien Darrouzet, Sylvain Ranvier et Johan De Keyser
Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (BIRA-IASB)
3 Avenue Circulaire, 1180 Bruxelles, Belgique

Résumé

Les ondes sifflements sont des ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'environnement magnétique de la Terre, et plus précisément dans l'ionosphère et la magnétosphère. Ces ondes ont la particularité d'être émises à partir d'éclairs lors d'orages se produisant aux alentours du point magnétique conjugué du lieu d'observation. Elles se propagent le long des lignes de champ magnétique de la Terre. Les caractéristiques de ces ondes permettent ainsi de déterminer des informations sur les régions qu'elles traversent. L'étude de ces ondes sifflements peut s'effectuer à partir de satellites en orbite autour de la Terre, ou au

moyen d'antennes de mesures au sol. C'est cette dernière méthode qui a été privilégiée par l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (BIRA-IASB) qui a construit une antenne très basse fréquence (TBF, 3-30 kHz) afin de détecter ces ondes depuis l'observatoire d'Humain en Belgique. L'antenne fonctionne en continu depuis mi-novembre 2011. Nous présentons dans cet article des premiers résultats statistiques intéressants.

1. La magnétosphère de la Terre.

La Terre est une planète qui possède un champ magnétique interne puissant. En l'absence de per-

turbations extérieures, le champ magnétique terrestre d'origine interne peut être vu en première approximation comme un dipôle ayant un axe incliné d'environ 12° par rapport à l'axe de rotation. Le milieu interplanétaire est balayé en permanence par un vent de particules électriquement chargées en provenance du Soleil. Ce vent, baptisé vent solaire par Dr. E. Parker en 1958, est très peu dense (~ 5 particules/cm³), mais très rapide (de 400 à 800 km/s) [1]. Il est composé principalement d'électrons et de protons H⁺, d'une petite quantité d'hélium He⁺⁺ et de traces d'ions plus lourds. Le vent solaire modifie le champ magnétique de la Terre, créant une cavité appelée magnétosphère, baptisée ainsi par Dr. T. Gold en 1959 [2]. Sous l'influence du vent solaire et du champ magnétique qu'il transporte (le champ magnétique interplanétaire), la magnétosphère est comprimée du côté du Soleil (sur une dizaine de rayons terrestres¹), appelé côté jour, mais très étendue dans la direction antisolaire (plusieurs centaines de rayons terrestres), appelée côté nuit.

La magnétosphère ainsi que l'ensemble des différentes régions la composant, est schématisée sur la Figure 1. A l'extérieur de la magnétosphère se trouve la magnétogaine, séparée de celle-ci par la magnétopause. Entre le vent solaire et la magnétogaine, une onde de choc se crée et cela forme une frontière appelée le choc d'étrave.

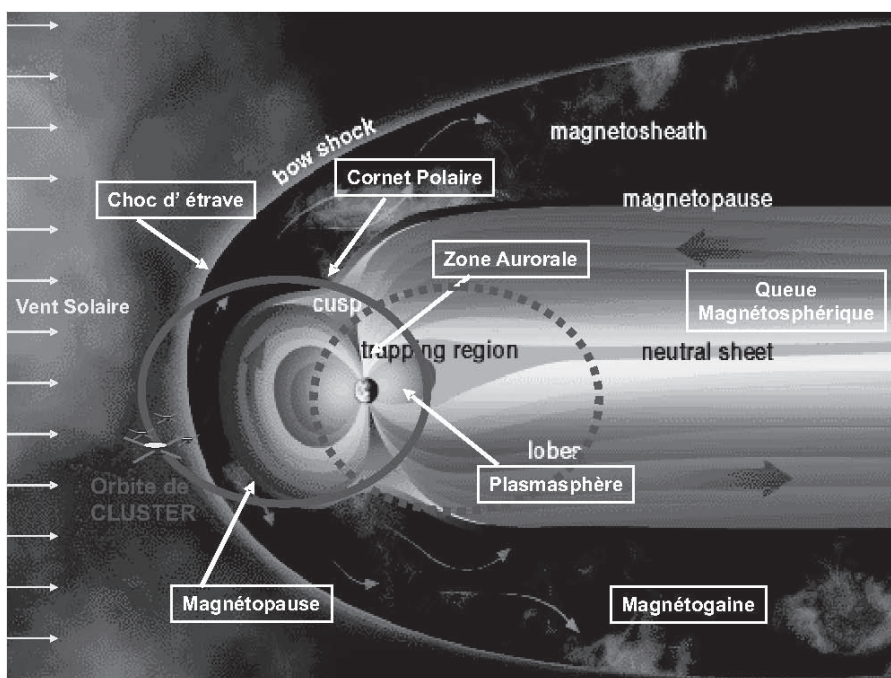


Fig. 1 : Magnétosphère de la Terre avec les principales régions qui la composent (D'après ESA).

¹ Rayon terrestre = $R_E = 6371$ km

A la limite inférieure de la magnétosphère se trouve l'ionosphère. De nombreuses sous-régions composent la magnétosphère, comme les cornets polaires, les zones aurorales, la plasmasphère, le feuillet de plasma, ou les lobes. Ainsi, la magnétosphère est constituée de plasma provenant à la fois de l'ionosphère et du vent solaire, et sa dynamique est contrôlée par le champ magnétique de la Terre.

2. Les ondes sifflements.

Dans la magnétosphère et l'ionosphère, de nombreuses ondes électromagnétiques sont créées et se propagent. Ainsi, il existe notamment les ondes dites sifflements (« whistlers » en Anglais). L'existence de ces ondes a été montrée pour la première fois par Dr. Barkhausen en 1918. Son origine a été expliquée pour la première fois en 1953 par Dr. L. Storey, montrant que les sifflements avaient comme origine des éclairs [3]. Ainsi, lors d'un orage, un éclair crée une impulsion électromagnétique, qui est ensuite guidée le long des lignes de champ magnétique de la Terre dans l'ionosphère puis la magnétosphère jusqu'à l'hémisphère opposé (Figure 2). Le nom sifflement provient du fait que la transposition du signal dans la gamme audio donne l'impression

d'un sifflement descendant, très caractéristique. Les sifflements ont des caractéristiques particulières de fréquence (quelques kHz) et de temps qu'elles acquièrent au cours de leur propagation le long des lignes de champ magnétique. Notamment, le délai de propagation dépend de la densité de plasma le long de leur trajet; cela permet d'en déduire la densité du plasma dans les régions que les ondes traversent, notamment dans la plasmasphère [4].

Ainsi, il est très important d'obtenir des informations régulières sur ces ondes, afin de comprendre et analyser notre environnement. Les ondes sifflements peuvent être observées dans l'espace mais également au sol, à l'aide d'antennes de mesure. La première étude statistique des ondes sifflements observées à latitude moyenne a été effectuée dans les années 1970 à Tihany en Hongrie [5]. Elle a montré un pic d'observation en mars et avril et entre 15h et 03h de temps local. Une autre étude effectuée au même endroit entre 2002 et 2008 présente quelques différences : le pic a lieu entre février et avril et entre 16h et 02h de temps local [6]. Cette première étude d'une antenne faisant partie du réseau AWDAnet montre la pertinence de telles mesures, et en même temps la nécessité d'étendre ces mesures à d'autres régions du globe. Une autre étude

de faite à partir de mesures prises à Rothera en Antarctique a analysé le lien entre les ondes sifflements et les éclairs: la région source des sifflements se trouve assez proche du point magnétique conjugué [7].

3. Projet à l'IASB.

Suite à un premier contact avec Dr. J. Lichtenberger (Space Research Group, Eötvös University, Hongrie) au cours d'une conférence en novembre 2009, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (BIRA-IASB) a entamé une étude de faisabilité d'installation en Belgique d'une antenne de réception des ondes sifflements dans le domaine des TBF (très basse fréquence, 3-30 kHz), ou en Anglais VLF (« very low frequency »).

Le site de Humain (latitude ~ 50.11°N, longitude ~ 5.15°E), qui appartient à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB-KSB), a été présélectionné assez rapidement pour des raisons de logistique. Des tests de mesure ont été effectués en mai 2010, afin de s'assurer du faible niveau de pollution électromagnétique en ce lieu. Les tests étant très positifs, le site d'Humain a été définitivement choisi, grâce également à l'accord de l'ORB-KSB.

L'antenne de mesure consiste en deux boucles magnétiques perpendiculaires, orientées Nord-Sud et Est-Ouest. Ces boucles sont installées sur un mât de 12 m et possèdent une superficie d'environ 50 m² chacune (Figure 3). L'ensemble a été installé en novembre 2010, et le matériel électrique et électronique au cours du printemps 2011. Les premières mesures ont été effectuées en avril 2011 et seront décrites dans la section suivante.

Ce projet fait partie du réseau AWDAnet (Automatic Whistler

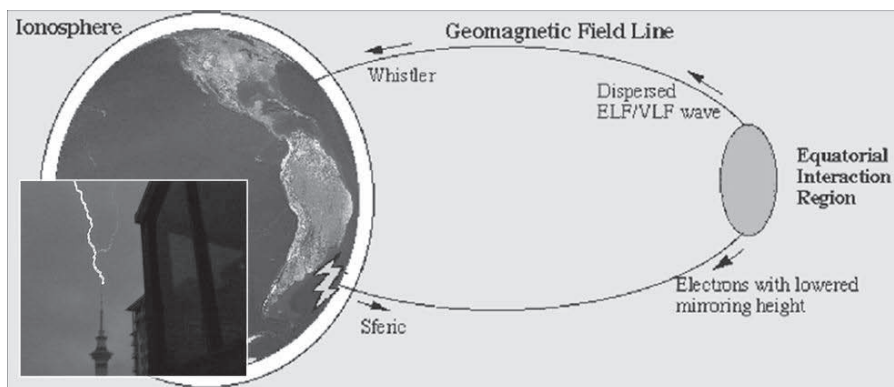


Fig. 2: Schéma descriptif de la génération et propagation des ondes sifflements.

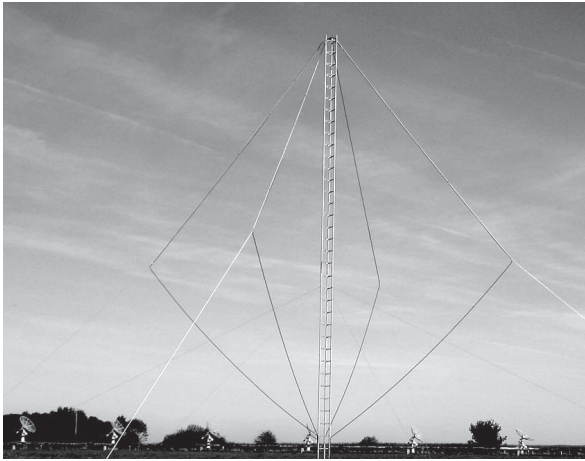


Fig. 3: Photos de l'antenne TBF installée à Humain, Belgique.

Detector and Analyzer system's network), qui a été initié par Dr. J. Lichtenberger [6]. Il comprend 7 antennes en Europe (plus 4 autres en développement) et 9 dans le reste du monde (plus 9 autres en développement). Ce réseau recherche notamment à placer des antennes aux points magnétiques conjugués d'antennes déjà existantes. La localisation de ces antennes est indiquée sur la Figure 4.

Ces mesures de sifflements peuvent ainsi nous permettre d'en déduire la densité du plasma dans la plasmasphère, et ainsi effectuer des comparaisons avec des

données obtenues par d'autres antennes du réseau AWDAnet, mais également avec des données enregistrées à bord de satellites (Cluster par exemple), ou obtenues à l'aide de modèles numériques.

4. Premiers résultats.

Les premières mesures valides ont été effectuées en avril 2011. Un programme informatique dans l'ordinateur d'acquisition de données permet de faire une première sélection automatique des données afin de sélectionner des ondes sifflements (ou parfois des

signaux ressemblants à des sifflements) [8,9]. Une deuxième analyse manuelle est ensuite effectuée à partir de ces données sélectionnées pour détecter les vraies ondes sifflements. Nous obtenons ainsi des spectrogrammes temps-fréquence (0-20 kHz ; 10 secondes) du champ magnétique, comme présenté sur la Figure 5, avec la composante Nord-Sud en haut

de la figure et la composante Est-Ouest en bas. De nombreuses perturbations sont visibles sur les spectrogrammes, notamment des émissions à fréquence constante (par exemple vers 16, 18 et 20 kHz), qui sont dues à des émetteurs probablement militaires ou des sources parasites. D'autres ont une durée fixe inférieure à 1 seconde mais sont observées très régulièrement, dans la partie haute de la bande de fréquence observée (vers 12 et 15 kHz par exemple). D'autres émissions sont très brèves mais parcourent toute ou presque toute la bande de fréquence observée (par exemple après 0.5 seconde). Cependant,

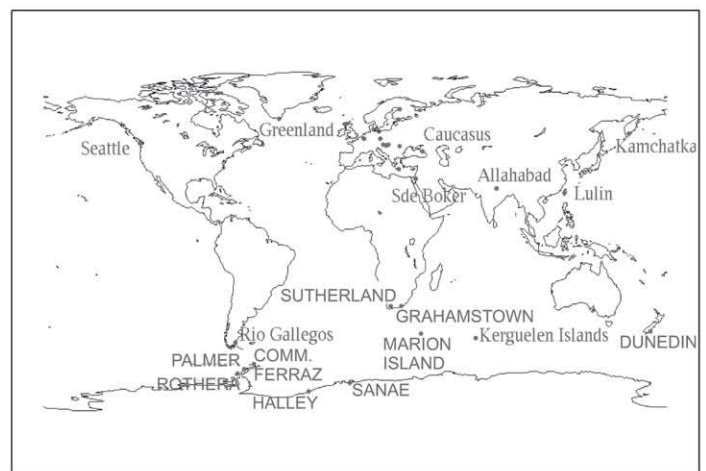


Fig. 4: Localisation en Europe (gauche) et dans le reste du monde (droite) des antennes du réseau AWDAnet, en majuscules les antennes en fonctionnement, en minuscules les antennes en projet (Adapté de Lichtenberger et al., 2008).

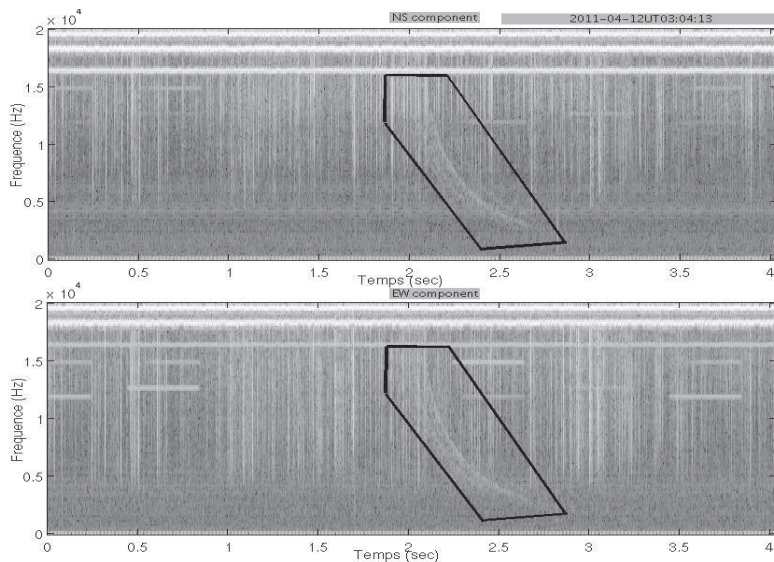


Figure 5: Spectrogrammes temps-fréquence mesurés à Humain le 12 avril 2011 à 03:04:13 UT (haut : composante Nord-Sud ; bas : composante Est-Ouest). Un whistler, ou sifflement, est clairement visible sur les 2 spectrogrammes à l'intérieur de la forme noire. (Voir également version en couleurs en page 2 de couverture)

un sifflement est très clairement visible dans les deux composantes magnétiques entre 2 et 3 secondes après le début du spectrogramme. Une analyse détaillée de cet événement, ainsi que de 2 autres a permis d'obtenir des propriétés sur ces sifflements et sur la région qu'ils ont traversée (Tableau 1).

Une analyse statistique durant un peu moins d'une année de mesures (8 avril 2011 au 17 mars 2012) a permis d'obtenir de premières conclusions, représentées sur la Figure 6. Il faut noter cependant que l'instrument n'a pas fonctionné durant l'entièreté de cette période en raison de divers problèmes techniques. Ainsi, nous n'avons pas de mesures du 15 avril au 5 mai 2011, du 16 juin au 31 juillet 2011, durant 1 semaine fin septembre, du 8 au

23 novembre et durant 1 semaine début décembre. Globalement le taux global de sifflements est plus faible que dans des stations d'observation relativement proches de celle-ci (par exemple Tihany en Hongrie [6]). Cela est tout d'abord dû au manque de données sur cette année complète, mais également à la surface de réception de l'antenne inférieure de moitié à celle des autres instruments similaires. L'activité orageuse du point conjugué devra être étudiée afin de voir si cette région est moins active que d'autres. Les sifflements sont observés majoritairement durant la nuit, surtout entre 22:00 et 01:00 UT, ce qui est conforme à de précédentes études [5,6]. Cependant un minimum est observé entre 01:00 et 03:00 UT, ce qui peut être lié à l'absence de données durant certaines périodes. Un pic d'activité est observé au printemps

(principalement mars-avril), ce qui est logique au vue de l'activité orageuse dans l'hémisphère sud. Cependant, il est étonnant d'observer un maximum d'activité en août, qui est normalement une période de faible activité au niveau des sifflements. Une analyse plus détaillée de ces événements devra être effectuée afin de comprendre ce résultat.

5. Conclusions.

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique a ainsi construit la première station belge d'observations d'ondes électromagnétiques dans le domaine des TBF pour l'étude des ondes sifflements. L'antenne installée sur le lieu de l'observatoire d'Humain est en fonctionnement depuis maintenant un an et fournit des données de manière régulière et continue depuis mi-novembre 2011. Les observations sont de bonne qualité, et les dernières données mesurées durant la période favorable d'observations des sifflements (mars-avril) devraient nous permettre de compléter très prochainement nos premiers résultats statistiques. Un site web présente l'ensemble du projet : <http://awda.aeronomie.be>.

L'appartenance à un réseau global de mesures identiques (AWDAnet) nous permet de bénéficier d'une expertise importante de la part d'autres scientifiques et de développer une expertise belge dans ce domaine [6].

Tableau 1 : Propriétés des sifflements et région traversée

L (distance radiale à l'équateur de la ligne de force magnétique) [R_E]	2.32	2.18	2.41
N_{eq} (densité équatoriale) [cm^{-3}]	2470.7	2702.7	2455.8
Fh_{eq} (gyrofréquence équatoriale) [kHz]	69.85	83.90	62.08

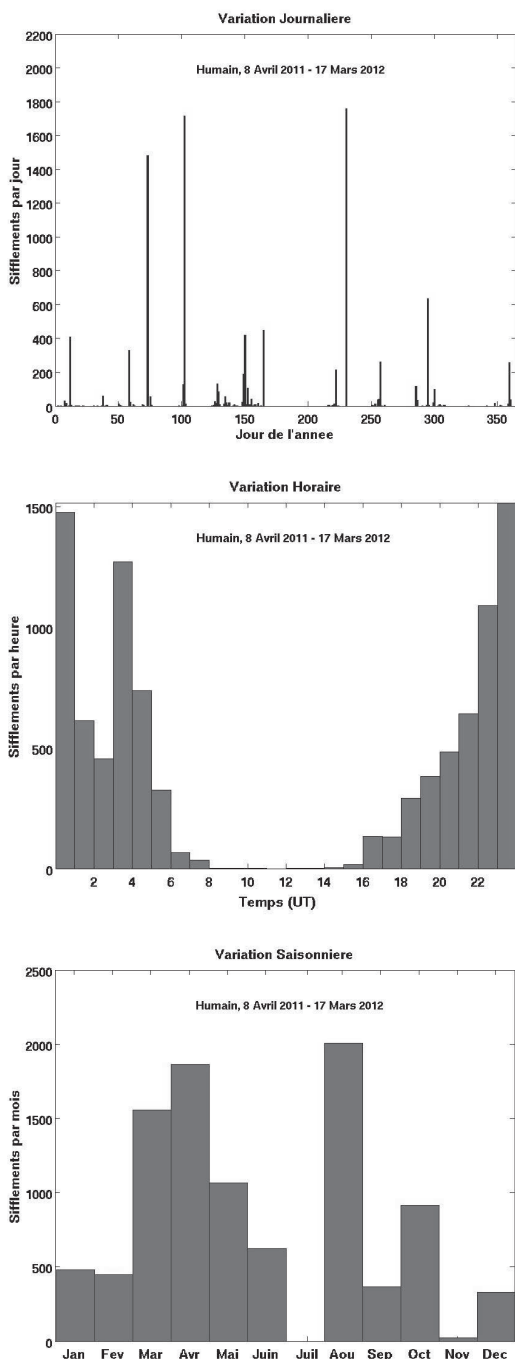
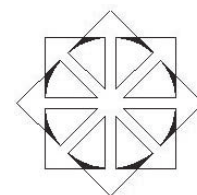


Figure 6: Analyse statistique des ondes sifflements observées à Humain du 8 avril 2011 au 17 mars 2012: (a) variation journalière des sifflements; (b) variation horaire des sifflements; (c) variation mensuelle des sifflements.

Notre connaissance et nos études de la plasmasphère nous seront très utiles pour comparer les résultats obtenus de ces ondes sifflements avec d'autres mesures et modèles effectués dans la plasmasphère [10].

Remerciements

Nous remercions Dr. J. Lichtenberger et Dr. C. Ferencz pour leur aide précieuse dans l'élaboration, la fabrication et le développement de ce projet. Nous remercions la Politique scientifique fédérale (Belspo, projet PRODEX Cluster) et le STCE (Solar-Terrestrial Centre of Excellence) pour leur soutien financier.



Références

- [1] Parker, E. N., Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields, *Astrophys. J.*, 128, 664, 1958.
- [2] Gold, T., Plasma and Magnetic Fields in the Solar System, *J. Geophys. Res.*, 64(11), 1665–1674, 1959.
- [3] Storey, L. R. O., An Investigation of Whistling Atmospherics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 246(908), 113-141, 1953.
- [4] Park, C. G., Methods to determine electron concentrations in the magnetosphere from nose whistlers, Tech. Rep. 3454-1, Radiosci. Lab., Stanford Electron. Lab., Stanford Univ., Stanford, Calif., 1972.
- [5] Tarcsai, G., P. Szemerédy, and L. Hegyegi, Average electron density profiles in the plasmasphere between $L = 1.4$ and 3.2 deduced from whistlers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 50(7), 607-611, doi:10.1016/0021-9169(88)90058-X, 1988.
- [6] Lichtenberger, J., C. Ferencz, L. Bodnar, D. Hamar, and P. Steinbach, Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector, *J. Geophys. Res.*, 113, A12201, doi:10.1029/2008JA013467, 2008.
- [7] Collier, A. B., J. Lichtenberger, M. A. Clilverd, C. J. Rodger, and P. Steinbach, Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 116, A03219, doi:10.1029/2010JA016197, 2011.
- [8] Lichtenberger, J., A new whistler inversion method, *J. Geophys. Res.*, 114, A07222, doi:10.1029/2008JA013799, 2009.
- [9] Lichtenberger, J., C. Ferencz, D. Hamar, P. Steinbach, C. J. Rodger, M. A. Clilverd, and A. B. Collier, Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Implementation of the analyzer algorithm, *J. Geophys. Res.*, 115, A12214, doi:10.1029/2010JA015931, 2010.
- [10] Darrouzet, F., De Keyser, J., and Pierrard, V. (Eds.), *The Earth's Plasmasphere: A CLUSTER and IMAGE Perspective*, Springer, 296 p., ISBN: 978-1-4419-1322-7, 2009.