

# Les ondes radio naturelles dans l'univers

1<sup>re</sup> partie :

## Whistlers et tweeks

par Christian Béghin

Des milliards d'années avant Maxwell et ses équations, avant Hertz, Marconi, Popov, Ducretet et bien d'autres inventeurs de la TSF, Dame Nature s'était chargée d'inonder tout l'univers d'ondes électromagnétiques. Cette série d'articles passera en revue la vaste étendue des longueurs d'ondes émises, depuis des milliers de kilomètres jusqu'au domaine submillimétrique, et l'extraordinaire variété de sources et milieux concernés. En marge de brefs tours d'horizon des différents thèmes, une attention particulière sera portée aux contributions des amateurs. Nous commençons avec les émissions radio déclenchées par les orages qui sont connues de longue date.

*Billions years prior to Maxwell's equations, Hertz, Marconi, Ducretet, Popov, and many other discoverers of the Wireless Telegraphy, the Universe experienced lot of electromagnetic waves issued from the Nature Godness. In this series of articles we will explore the wide range of transmitted wavelengths, from thousands*

*of kilometers down to the sub millimeter domain, and the huge diversity of involved sources and environments. In addition to a brief scientific review of each topic, special attention will be given to amateur's contributions. We are starting with the radio emissions triggered by lightning-storm activity which were known long ago.*



Figure 1. — Installation d'une ligne de campagne pendant les années 1900 [2].



Nous avons tous déjà entendu ces bruits caractéristiques de friture dans nos postes de radio, spécialement en PO et GO, lors d'activité orageuse locale. Mais il suffit de s'éloigner de quelques dizaines de kilomètres du réseau 50 Hz et de ses harmoniques qui polluent la gamme Très Basse Fréquence (TBF ou VLF), et de connecter une antenne de quelques mètres de hauteur à l'entrée d'un bon amplificateur BF alimenté sur batterie, pour être plongé dans un monde radiophonique étrange de grésillements, champs d'oiseaux et autres sifflements. Ce premier article est consacré aux ondes TBF naturelles émises de façon quasi permanente par les foyers orageux répartis de par le monde, selon leur situation géographique et l'heure locale. Dans le langage scientifique, ces bruits étranges sont nommés respectivement *whistlers* (sifflements) et *tweaks* (phonétiquement tiouk).

Une légende attribue la découverte de ces phénomènes aux soldats transmetteurs de la guerre 1914-1918 (figures 1 et 2), qui les entendaient parfois dans leurs écouteurs reliés aux lignes téléphoniques de campagne, lesquelles sont d'ailleurs d'excellentes antennes TBF. Puisque les *whistlers* ressemblent étrangement aux sifflements des obus avant leur explosion, ces braves en déduisaient naturelle-



Figure 2. — PC de transmission [8] et téléphone de campagne TM 1916 [2].

ment de très mauvais présages lorsqu'ils les entendaient... Il fallut attendre le début des années trente pour que des physiciens tels que les britanniques Edward Appleton et Douglas Hartree appliquent les équations de Maxwell à un nouveau milieu nommé plasma (gaz d'électrons et ions), en présence du champ magnétique terrestre, pour disposer d'outils théoriques permettant d'interpréter les *whistlers*. Ce qui fut fait finalement en 1953 par le Britannique L. R. Owen Storey [1].

Dans sa thèse de doctorat, Storey démontra que les *whistlers* s'expliquaient grâce aux propriétés disper-

sives de la propagation à travers le plasma ionosphérique d'une impulsion électromagnétique : un éclair d'orage. L'énergie de l'onde est guidée le long des lignes de force du champ magnétique terrestre, et ressort dans l'hémisphère opposé sous la forme d'un sifflement (figure 3). Le Dr Storey devint ensuite le responsable scientifique du premier satellite scientifique français FR1, lancé en 1965 pour l'étude in situ de la propagation des ondes TBF artificielles, et il reçut en 1997 la prestigieuse médaille Heinrich Hertz de l'IEEE. Note personnelle, Owen Storey fut mon maître es plasma waves de 1959 à 1970 et j'ai plaisir à lui en rendre hommage.

### Explication des whistlers

Nous savons grâce au Français Jean-Baptiste Fourier (début XIX<sup>e</sup>) qu'une impulsion de courte durée peut se décomposer en une infinité de fréquences. Or les premières émissions de TSF avaient mis en évidence une couche ionisée réfléchissante, dite d'Heaviside, située à une altitude  $H_c$  entre 60 et 90 km selon l'heure locale et la fréquence de l'émetteur. La réfraction des ondes radio sur cette couche se traduit par l'effet bien connu de fading, particulièrement en PO. Qui dit réfraction suppose implicitement une opacité totale de l'ionosphère pour les ondes de radiodiffusion classique des gammes GO, PO et OC,

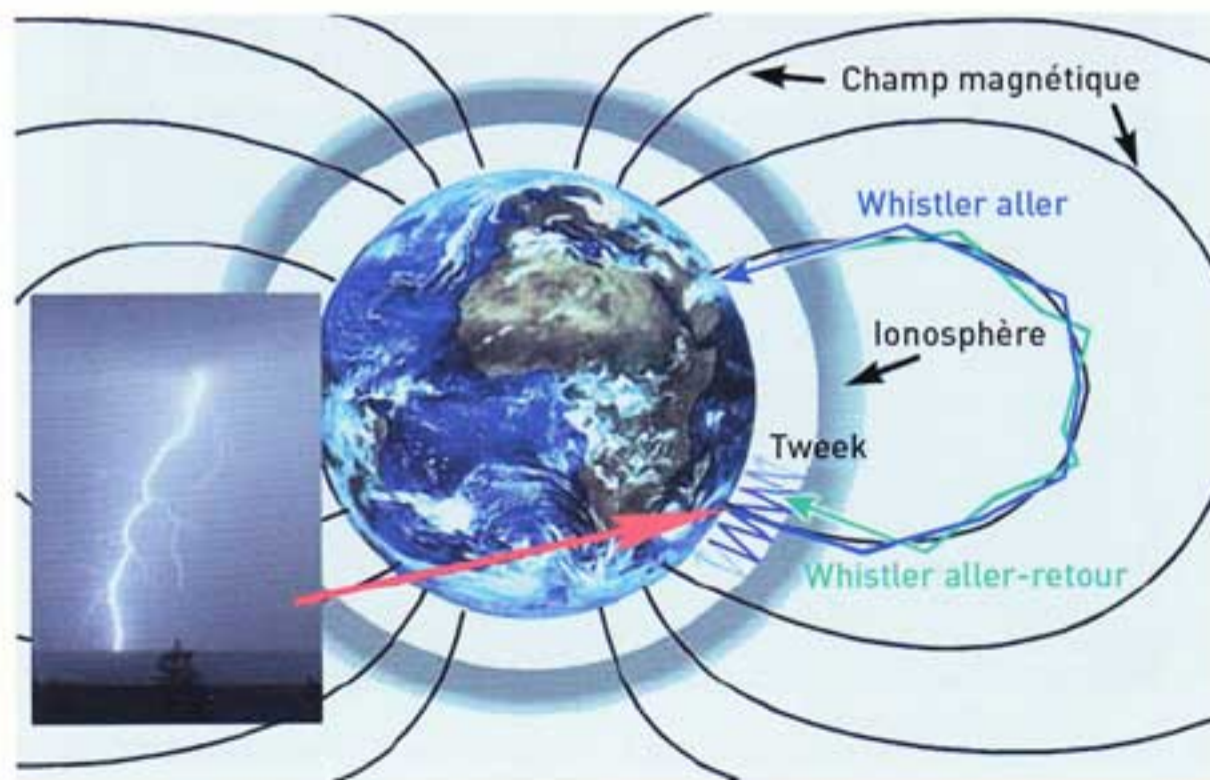


Figure 3. — Schéma simplifié de la propagation des *tweaks* et des *whistlers*.



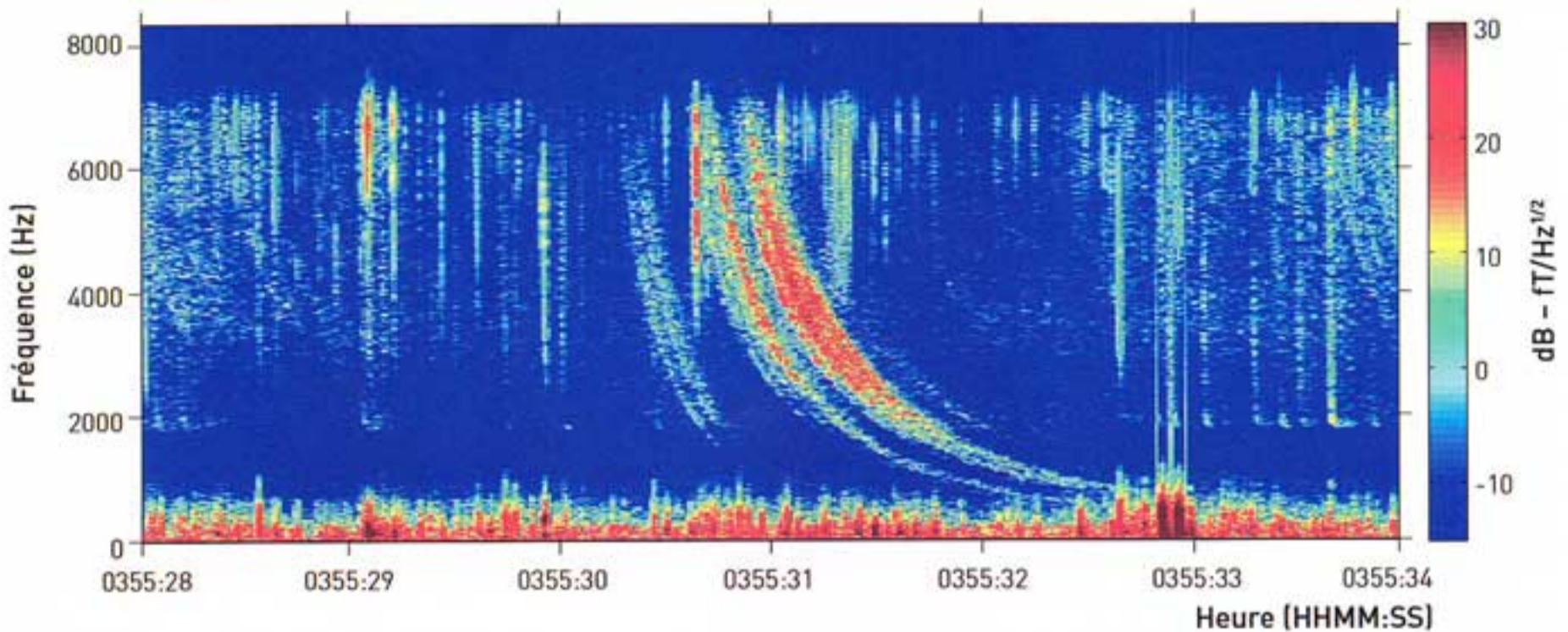


Figure 4. — Sonagramme de whistlers reçus à la station Palmer TBF en Antarctique [10] le 23 juillet 2004. Les fortes amplitudes sont indiquées en rouge.

dont la fréquence est inférieure à une valeur critique. Cette dernière se situe entre 5 et 10 MHz et dépend de plusieurs paramètres (heure locale, cycle solaire, etc.). Par contre, les ondes TBF ne sont limitées que par la fréquence gyromagnétique, nommée aussi gyrofréquence : la rotation autour du champ magnétique des électrons, dont la valeur minimum est de quelques dizaines de kilohertz dans l'ionosphère. Storey avait montré qu'une fraction de l'énergie des ondes TBF pouvait traverser toutes les couches et se propager dans l'ionosphère, à condition que leur trajectoire reste quasi-parallèle au champ magnétique terrestre (figure 3). Cependant, freinées par les électrons, leur vitesse ralentit d'autant plus que la fréquence est basse. En conséquence, à l'extrémité du parcours dans l'hémisphère conjugué, on observe un phénomène de dispersion du temps d'arrivée du signal en fonction de la fréquence. Ce phénomène se traduit par un sifflement caractéristique, dont la représentation visuelle 2D, en luminance noir et blanc ou en couleur, est un spectrogramme, nommé sonagramme pour les signaux audio (figure 4).

Un sonagramme est la visualisation d'une analyse spectrale obtenue par traitement analogique ou numérique montrant les variations

d'amplitude d'un signal audio en fonction de la fréquence et du temps. Avant l'apparition des ordinateurs, les sonagrammes étaient faits à l'aide d'un sonographe conçu aux USA avant 1940 [15]. De nombreux logiciels permettent actuellement de faire des sonagrammes à partir de la carte son d'un PC. Certains sites d'amateurs sur Inter-

net décrivent la technique utilisée permettant d'écouter un whistler en même temps qu'on visualise son sonagramme [11]. Des sites professionnels, comme par exemple la station Palmer en Antarctique gérée par l'université de Stanford USA [10], mettent en ligne en temps réel des sonagrammes d'ondes TBF rafraîchis périodiquement.

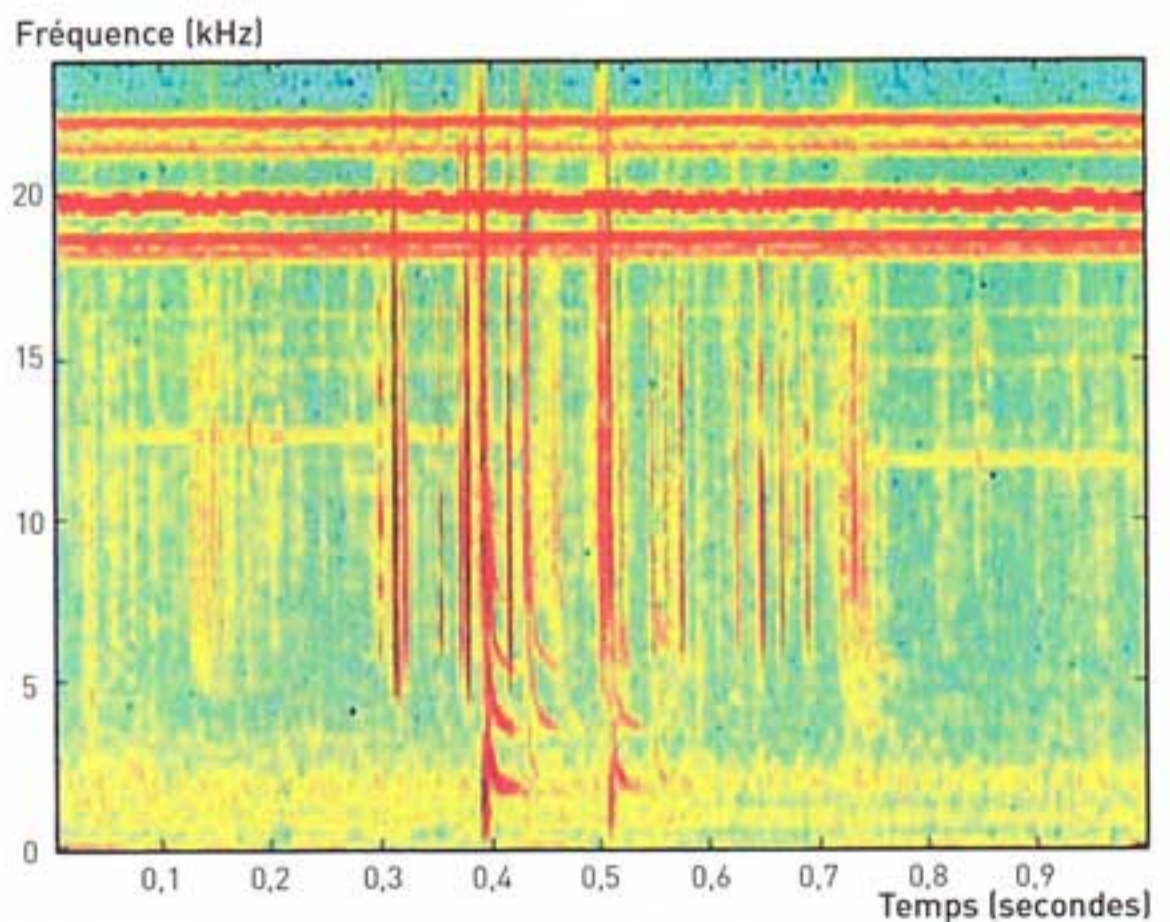


Figure 5. — Sonagramme de tweeks jusqu'à l'harmonique 5 [3].



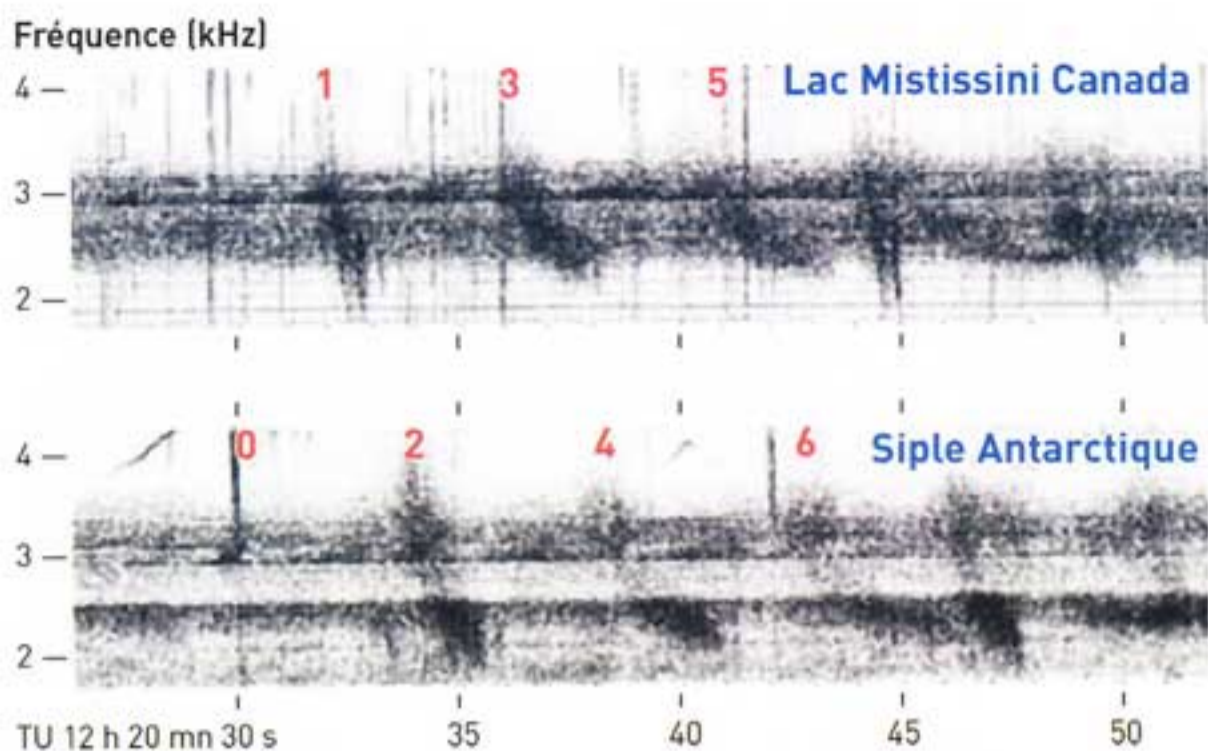


Figure 6. — Whistlers allers-retours multiples reçus simultanément le 7 juillet 1986 aux deux points conjugués magnétiques [4].

## Explication des tweeks

Pour des fréquences très basses ( $< 2$  kHz) constituant la majeure partie de l'énergie des décharges qui s'écoulent entre le sol et les nuages, nommées *return strokes* (éclairs de retour), une partie de l'énergie rayonnée peut aussi rester piégée par réflexions multiples à proximité de la source (figure 3). Ceci se produit essentiellement la nuit, dans le guide d'onde de hauteur  $H_c$  dont on a parlé plus haut, formé entre les surfaces conductrices du sol et de la basse ionosphère. D'après la théorie classique des guides d'ondes, on

sait qu'il existe deux types de modes piégés dans ces conditions, qui sont respectivement transversal électrique (TE) et transversal magnétique (TM).

Dans cette première partie, nous allons nous intéresser seulement au premier mode (TE) qui a une longueur d'onde de coupure (maximale) définie par la distance aller-retour entre le sol et l'ionosphère, soit 2 fois  $H_c$ . Donc, il existe une fréquence de coupure (minimale)  $F_c = c / 2 H_c$  ( $c$  = vitesse de la lumière, 300 000 km/s) pour une onde piégée dans le guide de part et d'autre d'une source orageuse. Si par exem-

ple  $H_c = 80$  km, on trouve  $F_c = 1875$  Hz. Cette valeur est la fréquence critique des tweeks dont nous parlions au début. Une antenne située à quelques centaines de kilomètres d'un éclair reçoit donc une impulsion brève rassemblant toutes les fréquences supérieures à  $F_c$ . Mais pour des fréquences qui s'approchent de la coupure  $F_c$ , la vitesse de l'onde diminue progressivement et s'annule, ce qui conduit à un signal audio qui sonne « tiouk », d'où le nom *tweek* donné par les anglo-saxons (un mot que l'on ne trouve pas dans le dictionnaire). Dans certaines conditions, on peut même observer les harmoniques successifs de  $F_c$  (figure 5) qui sont les différents modes propres TE de la cavité sol-ionosphère.

## Phénomènes associés

Revenons maintenant aux whistlers qui ont pu traverser l'ionosphère grâce au champ magnétique, et atteindre l'hémisphère conjugué. Si les conditions ionosphériques du point conjugué sont favorables, une partie de l'énergie peut se réfléchir sur les couches supérieures ou sur le sol, et repartir dans l'autre sens (figure 3). On obtient alors un *whistler double hop* (aller-retour) visible dans la région source d'origine, comme l'a montré l'expérience de Carpenter et Orville [4] réalisée entre deux stations TBF situées respectivement au Canada et en

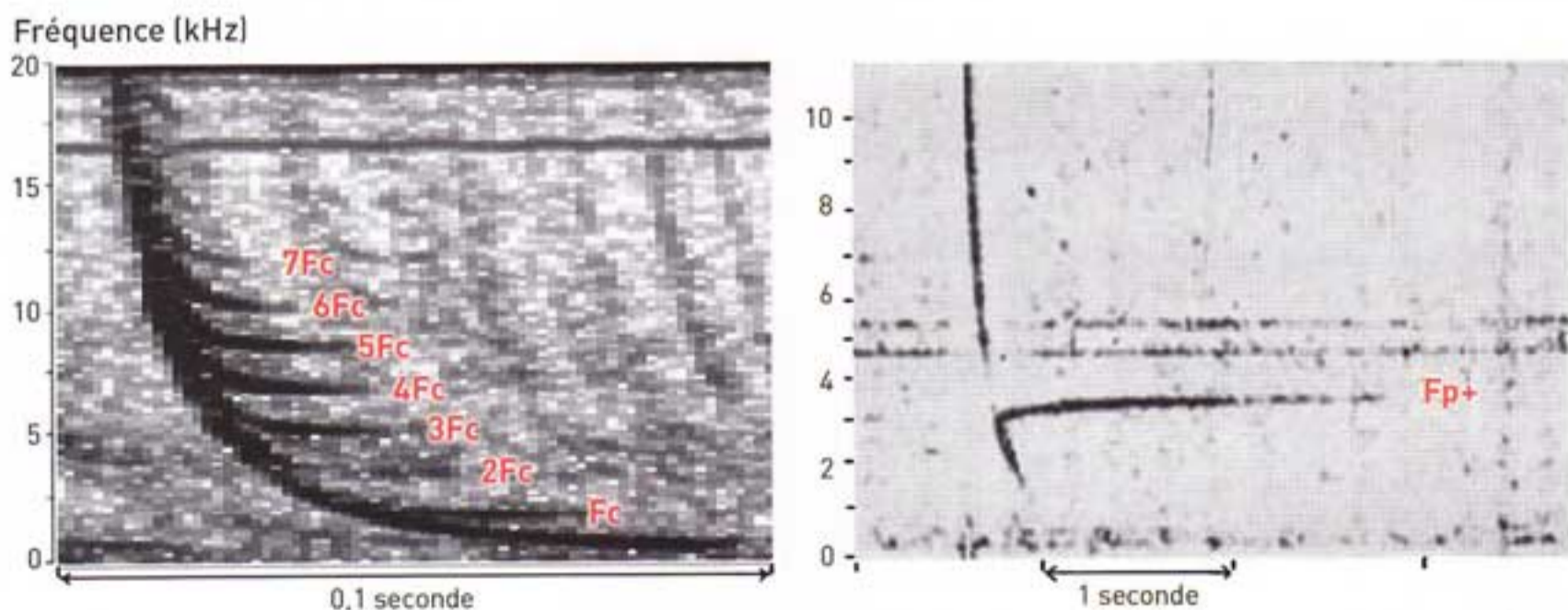


Figure 7. Réception TBF sur satellite. A gauche, whistler primaire (éclair direct), suivi des spiky-whistlers (pointus) reçus par le satellite Demeter [8]. A droite, whistler normal et son protonique associé, reçus par le satellite Injun 3 de la NASA [5].



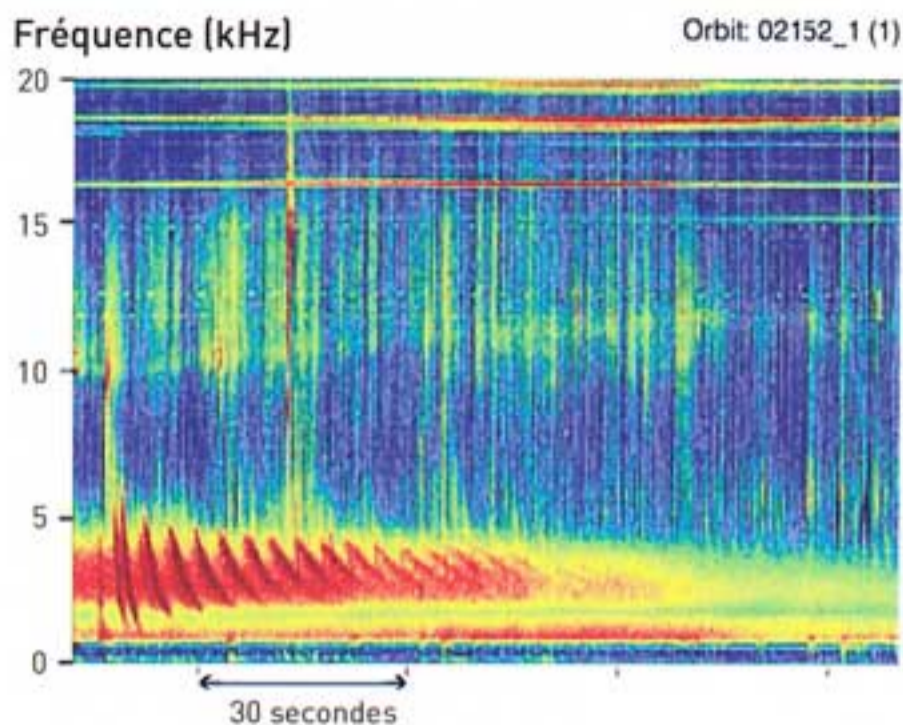


Figure 8. — Whistlers multi-bonds (14 rebonds) reçus par le satellite Demeter le 27 novembre 2004 à 10 h 58 TU [6].

Antarctique (figure 6). Ce cas est assez exceptionnel, car le processus aller-retour est observable jusqu'au moins le sixième rebond !

Avec les possibilités offertes par les nombreux satellites scientifiques lancés en orbite circumterrestre depuis les années soixante, l'étude des ondes TBF naturelles a considérablement progressé. En ce qui concerne les *whistlers* et les *tweeks*, les progrès sur leur interprétation furent immédiats. Ces phénomènes ne justifient plus actuellement des missions spatiales spécifiques, mais ils font partie de retombées secondaires des programmes visant d'autres objectifs. À titre d'exemple, le satellite français Demeter du CNES et LPC2E-CNRS université d'Orléans [9], consacré à l'étude des signatures ionosphériques des séismes, a collecté un grand nombre d'observations d'ondes TBF dans une région jusqu'alors peu explorée en permanence (660 km d'altitude). Parmi les différences entre les observations au sol et dans l'espace, concernant les *whistlers* et les *tweeks*, je citerai trois phénomènes remarquables.

## Observations spatiales

Le premier phénomène illustre la possibilité que les composantes électromagnétiques des *tweeks* visibles au sol se comportent comme des sources ajoutées au rayonnement initial de l'éclair. Ils consti-

tuent alors un signal secondaire, dispersé à son tour dans le mode de propagation whistler. Un cas exceptionnel (figure 7 gauche) montre jusqu'à 7 modes harmoniques de  $F_c$  superposés au whistler proprement dit. Un autre phénomène inobservable au sol, est l'apparition de *whistlers* ioniques. Il s'agit en fait d'un couplage électromagnétique entre le mode électronique classique et les modes de propagation liés aux fréquences gyromagnétiques des différentes espèces d'ions ionosphériques.

Dans l'exemple de la figure 7 (droite), le couplage s'est effectué à une altitude inférieure et à une fréquence sensiblement plus basse que la valeur de la fréquence gyromagnétique des protons  $F_{p+}$  autour du satellite (320 Hz dans ce cas). Le mode protonique nouvellement créé se propage ensuite vers le satellite avec une vitesse d'autant plus faible que la fréquence s'approche de la valeur critique  $F_{p+}$ . On observe alors une traînée, nommée *proton-whistler*, associée au whistler électronique primaire. Il existe des cas d'observation de *helium-whistlers* et plus rarement des *oxygen-whistlers*. La figure 8 montre un autre cas remarquable de *whistlers* multibonds en région de moyenne latitude, vu par le satellite DEMETER. Il s'agit d'une série de *whistlers* allers-retours, que l'on pense être piégés dans des irrégu-

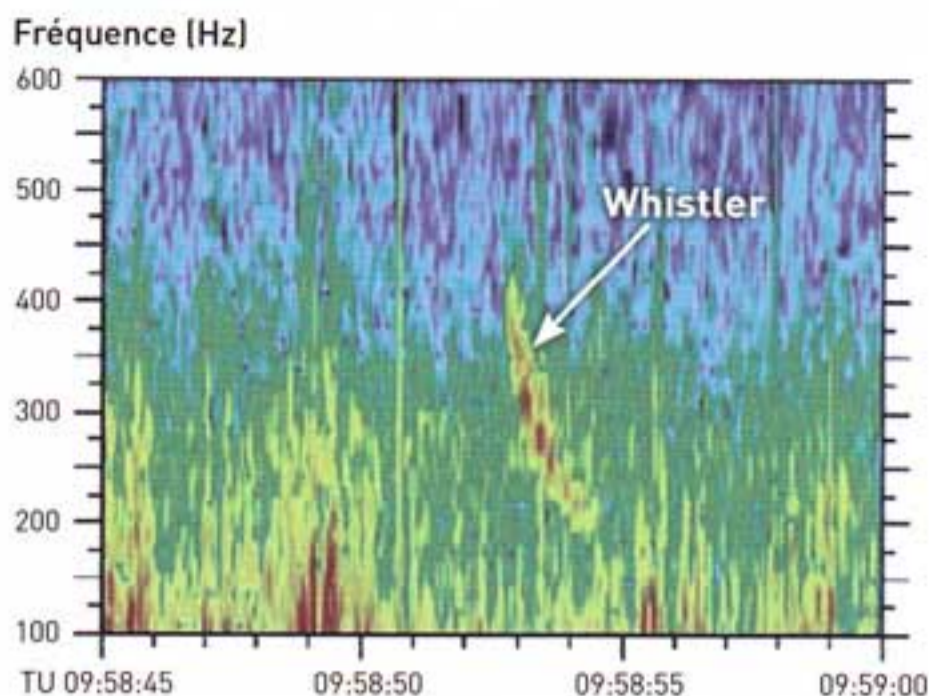


Figure 9. — Whistler dans la magnétosphère de Saturne, observé le 28 octobre 2004 à bord de Cassini, à 6,18 rayons de Saturne [7].

larités alignées sur les lignes de force du champ magnétique entre les deux hémisphères conjugués.

Enfin, il semble bien que les *whistlers* ne soient pas réservés à la Terre. Pourvu qu'une planète possède une atmosphère avec des nuages susceptibles de produire des décharges électriques, et qu'il existe une ionosphère magnétisée, que l'on nomme aussi magnétosphère et dont nous reparlerons dans les parties suivantes, tous les éléments sont réunis pour que les mêmes causes produisent les mêmes effets. Parmi toutes les planètes du système solaire susceptibles de produire des *whistlers*, la seule qui en a fourni jusqu'à présent la preuve irréfutable est Saturne, grâce à la mission conjointe ESA-NASA Cassini-Huygens autour du système saturnien depuis fin 2004 [7]. Les nuages de haute altitude de Saturne sont le siège d'une activité orageuse très intense, et la signature radio des éclairs se détecte à des centaines de milliers de kilomètres. Un exemple de *whistler* reçu le 28 octobre 2004 par le récepteur TBF de l'orbiteur Cassini [7] est montré figure 9. Il convient de souligner ici que l'interprétation de toutes les émissions radio naturelles fournit un outil indispensable pour la mesure des paramètres physiques et la connaissance du milieu traversé par les sondes spatiales.



## Activités amateurs

Avant de conclure cette première partie, il faut noter l'intérêt grandissant de nombreux amateurs dans le monde entier, pour l'observation des ondes TBF naturelles et du même coup, des émissions militaires, des radiobalises, et divers parasites dus à l'activité humaine. Rien de plus simple que d'installer une station TBF d'amateur, à condition de disposer d'un site calme à l'écart des harmoniques du réseau 50 Hz. La panoplie usuelle des amateurs comporte des amplificateurs appropriés à tube ou à semi-conducteurs [11] [13] ainsi que des

logiciels de traitement numérique des données permettant de produire avec un PC des sonagrammes de qualité professionnelle [12] [14].

À titre d'exemples, au hasard des navigations sur Internet, je signale deux travaux d'amateurs qui n'ont pas de complexes à avoir par rapport aux professionnels. Le premier est un exercice de localisation de l'éclair initial d'un whistler aller-retour double-hop (figure 10), reçu le 27 décembre 2002 à Cicouro (Portugal), dont l'éclair source est estimé à une distance d'environ 500 km du lieu de réception [12]. Le second travail (figure 11, [11]) démontre qu'il est possible de rece-

voir en un même endroit un whistler court, venant directement d'un orage dans l'hémisphère conjugué, et dans la même journée, un double-hop echo (aller-retour), issu d'un orage proche du lieu de réception (la Floride en l'occurrence).

Nous retrouverons aussi des amateurs dans des gammes de fréquences très différentes, jusque par exemple en radioastronomie qui sera traitée ultérieurement. Dans le prochain article, nous verrons un autre type d'ondes naturelles, toujours associées aux orages, mais dans la gamme EBF (Extra Basses Fréquences), avec une extension du domaine d'exploration vers d'autres planètes du système solaire.

Fréquence (kHz)

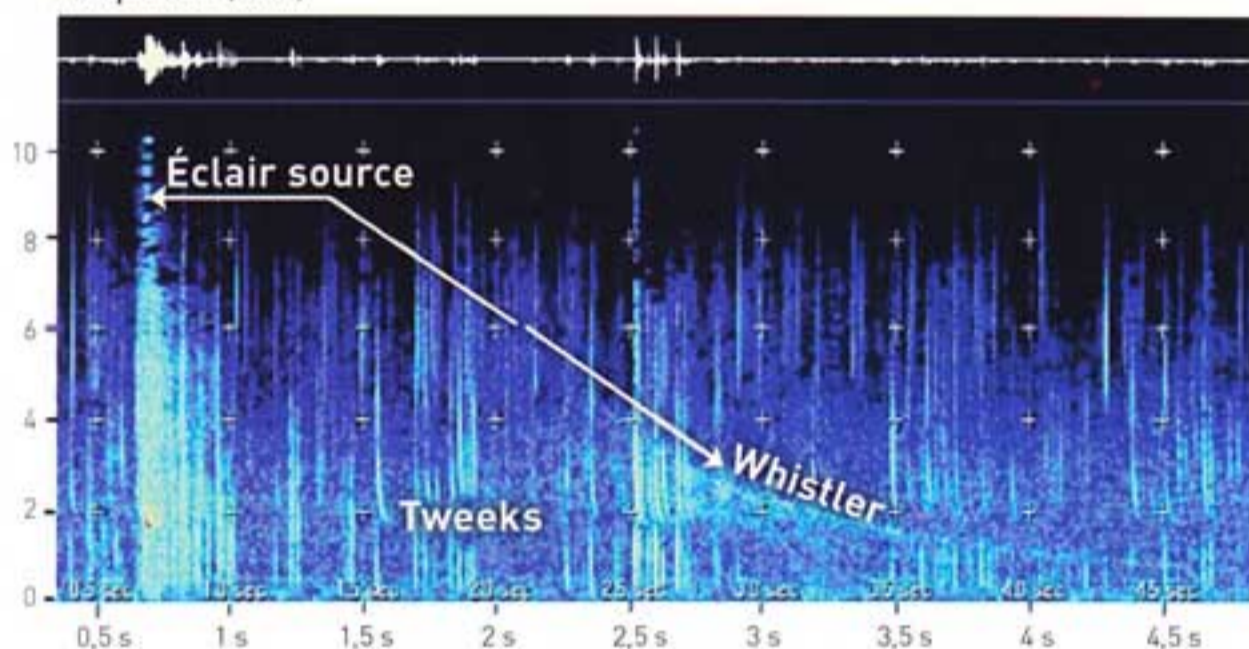


Figure 10. — Réception TBF d'amateur : whistler aller-retour et tweeks [Thierry Alvez, [12]]. Portugal, 27 décembre 2002.

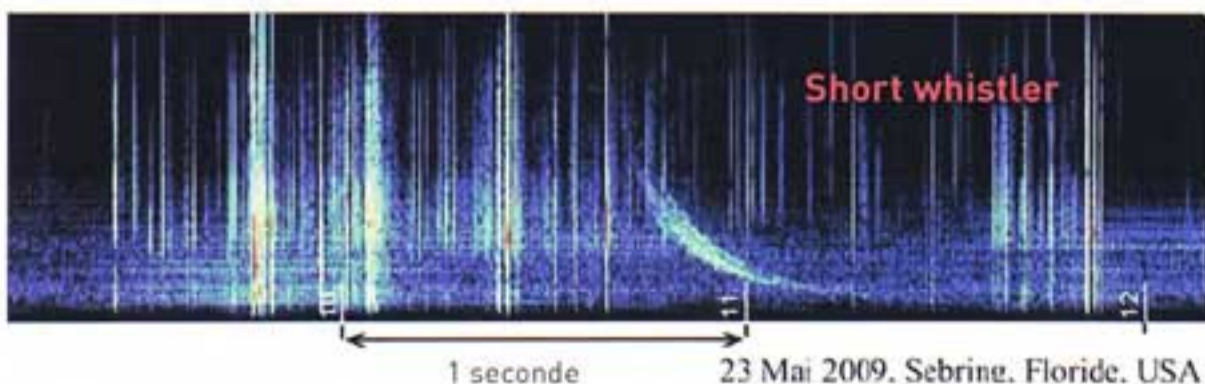
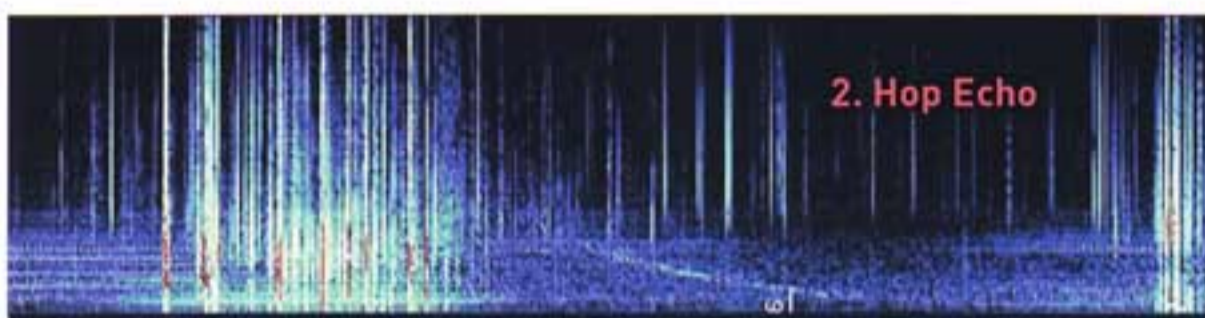


Figure 11. — Réception TBF d'amateur : short whistler [whistler court] et 2 hop echo (aller-retour), le même jour au même endroit [Joel Gonzales, [11]].

## Références bibliographiques

- [1] Storey L.R.O., PhD Dissertation, Phil. Trans. Royal Soc., London, 246, 1953.
- [2] Bablot M. et al., *Le Patrimoine des télécommunications françaises*. Ed. Flohic, 2002.
- [3] Kumar S., Deo A., Ramachandran V., *Earth Planets Space*, 61, 905-911, 2009.
- [4] Carpenter D.L., Orville R.E., *J. Geophys. Res.*, vol. 94, n° A7, 1989.
- [5] Gurnett D.A., Shawhan N.M., Brice, Smith R.L., *J. Geophys. Res.*, vol. 70, n° 7, 1965.
- [6] Parrot M. et al., *Space Sci. Rev.*, doi : 10.1007/s11214-008-9347-y, 2008.
- [7] Akalin D. A. et al. *G.R.L.*, vol. 33, L20107, 2006.

## Liens Internet et sites d'amateurs

- [8] Collection Faurillon : [http://www.faurillon.com/photos%2014-18/index\\_4.htm](http://www.faurillon.com/photos%2014-18/index_4.htm)
- [9] Satellite DEMETER : <http://demeter.cnrs-orleans.fr>
- [10] Palmer station: <http://vlf.stanford.edu/research/whistler-mode-wave-studies-palmer-station-antarctica>
- [11] Récepteur TBF à semi-conducteurs : [http://www.backyardastronomy.net/vlf\\_receiver.html](http://www.backyardastronomy.net/vlf_receiver.html)
- [12] Whistlers au Portugal : [http://www.vlf.it/thierry/waveguide\\_propagation.html](http://www.vlf.it/thierry/waveguide_propagation.html)
- [13] Récepteur TBF à tube : [http://www.vlf.it/accardo/vlf\\_Tube\\_eng.html](http://www.vlf.it/accardo/vlf_Tube_eng.html)
- [14] Les ondes sifflantes (en français) : [http://radioref.ref-union.org/pdf/2005\\_p/f4eob\\_0505.pdf](http://radioref.ref-union.org/pdf/2005_p/f4eob_0505.pdf)
- [15] Le Sonographe (en français) : <http://www.uclouvain.be/235509.htm>

C. Béghin, Directeur de Recherche Émérite, CNRS-Université d'Orléans  
E-mail : [cbeghin@cnrs-orleans.fr](mailto:cbeghin@cnrs-orleans.fr)