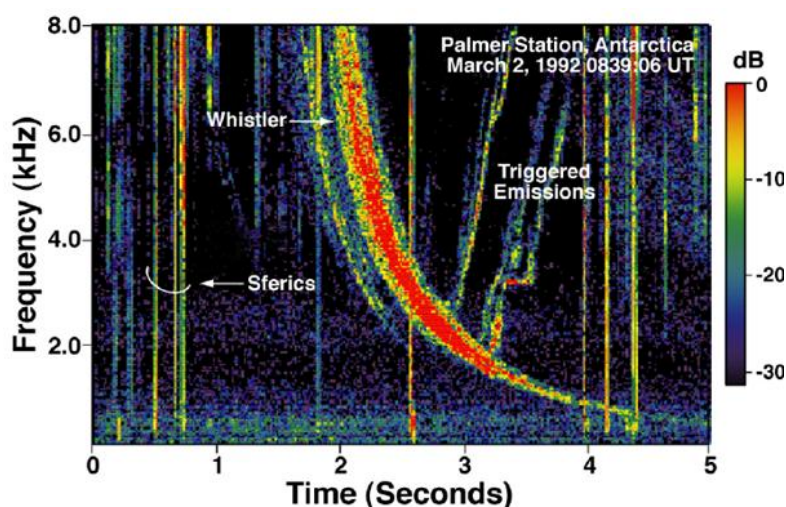




Le monde mystérieux des UBF-TBF



Analyse en fréquence d'un signal naturel TBF reçu à la base Palmer en Antarctique

Partie 1 : Introduction et émissions naturelles en UBF/TBF

Introduction

Par convention, les ondes électromagnétiques de fréquence inférieure à 30 kHz (soit une longueur d'onde supérieure à 10 km dans le vide) sont qualifiées de TBF. Bien que la production de signaux électriques dans ce domaine de fréquence soit très facile, leur transmission à distance sous la forme d'une onde électromagnétique est très peu efficace, du fait notamment du faible rendement des antennes qui ont des longueurs toujours beaucoup plus faibles que la longueur d'onde.

Par convention toujours, ce domaine TBF est subdivisé en 4 régions :

- Les ELF (extrêmement basse fréquence) de 3 Hz à 30 Hz
- Les SBF (super basse fréquence) de 30 Hz à 300 Hz
- Les UBF (ultra basse fréquence) de 300 Hz à 3 000 Hz
- Les TBF (très basse fréquence) de 3 kHz à 30 kHz

Cet article a pour but de décrire les différentes familles de signaux de nature électromagnétique qui peuvent être reçus dans ces domaines de fréquence.

Les émissions naturelles dans les domaines UBF/TBF

Bien avant l'apparition des technologies humaines qui permettent d'émettre et de recevoir des rayonnements électromagnétiques, notre environnement est baigné par un océan de signaux électromagnétiques d'origine naturelle ; on peut citer, entre autres :

- le soleil qui peut émettre, lors de certaines éruptions solaires, des ondes radio incohérentes et à large spectre sous la forme d'un souffle qui peut brouiller la réception des émetteurs de radio ; ces émissions ont des fréquences supérieures à 10 MHz ;
- l'univers "profond" qui émet un spectre d'ondes lié à sa température (le bruit de fond cosmologique, découvert - par hasard - en 1964 - mais prévu par la théorie dès 1948), dans des domaines de fréquence très élevées ;
- les éclairs orageux, qui provoquent des craquements lors de la réception des émetteurs de radio ; leur spectre d'émission s'étend de quelques centaines de Hz à plusieurs dizaines de MHz ; l'impulsion électrique associée aux éclairs peut être guidée par les lignes de force du champ magnétique terrestre et se propager très loin ;
- des phénomènes naturels qui émettent des ondes radioélectriques dans les domaines UBF (quelques Hz) et TBF (quelques centaines de Hz à quelques kHz), dont l'origine est située à proximité de la Terre, dans l'ionosphère et la magnétosphère. Ils résultent de l'interaction entre le vent solaire (un flux de particules chargées : protons et électrons) et le champ magnétique qui entoure notre planète.

La propagation et les interactions dans l'ionosphère et la magnétosphère des impulsions électriques produites par les éclairs.

Lors des orages, des décharges de courants très intenses (largement supérieures à 1 million d'ampère !) ont lieu. Ces variations de courant très rapides donnent lieu à des variations de potentiel électrique dans le milieu de propagation de l'éclair, et donc à l'émission d'une onde électromagnétique impulsionnelle dont le spectre s'étend de quelques centaines de Hz à quelques dizaines de MHz. C'est la réception de cette impulsion électromagnétique par voie directe (onde « de sol ») ou éventuellement via la réflexion sur une couche ionisée (essentiellement la couche D, la plus proche du sol et présente seulement en période de nuit) qui provoque des perturbations lors de la réception d'émetteurs radio. Ces perturbations sont perceptibles à proximité immédiate des orages et jusqu'à plusieurs milliers de km.

Dans certaines circonstances, une partie de l'énergie contenue dans cette onde électromagnétique impulsionnelle peut traverser les différentes couches ionisées (D, E, F) présentes à ce moment-là, et pénétrer dans la magnétosphère. L'onde peut alors être guidée par les lignes de force du champ magnétique terrestre et se propager sur de longues distances.

Cette propagation est dispersive, ce qui signifie que la vitesse de propagation dépend de la fréquence : l'impulsion électromagnétique initiale qui était de très courte durée (donc à spectre très large) se transforme, au fur et à mesure de sa propagation le long des lignes de force du champ magnétique, en un train d'ondes dont la fréquence diminue avec le temps de propagation. En pratique, ces phénomènes sont situés dans les domaines UBF-TBF. Quand cette onde « dispersée » est reçue et transformée en un signal acoustique (dans un haut-parleur par exemple) ressemblant à un sifflement de fréquence décroissante qui peut durer de 0.5 à 3 secondes.

Cette onde peut être reçue au sol ou par des satellites évoluant dans la magnétosphère (plusieurs centaines à plusieurs milliers de km d'altitude). La première détection de ces phénomènes a eu lieu dans les années 1880, quand des perturbations, sous la forme de "sifflements" parasites, sont apparues sur les signaux électriques du téléphone transportés par les câbles sous-marins. Mais aucune explication n'avait été trouvée à l'époque.

Les interactions du vent solaire avec l'ionosphère et la magnétosphère

Le vent solaire est constitué par un flux de particules chargées émises par le soleil, qui se propagent à quelques centaines de km/s. Il est constitué, notamment, de protons et d'électrons. L'interaction de ce flux, qui constitue donc un courant électrique, avec le champ magnétique terrestre, conduit à faire tourner les particules chargées autour des lignes de force du champ magnétique : la fréquence de cette rotation, appelée gyrofréquence, dépend :

- de la masse et de l'énergie de la particule ;
- de l'intensité et de l'orientation du champ magnétique terrestre.

Cette rotation s'accompagne de la production d'une onde électromagnétique qui peut être reçue au sol ou par des satellites circulant dans la magnétosphère. Ces phénomènes peuvent durer des heures. En pratique, les domaines de fréquence caractéristiques sont dans le domaine UBF (1 à 100 Hz) pour les protons et le domaine TBF (50 à 5 000 Hz) pour les électrons.

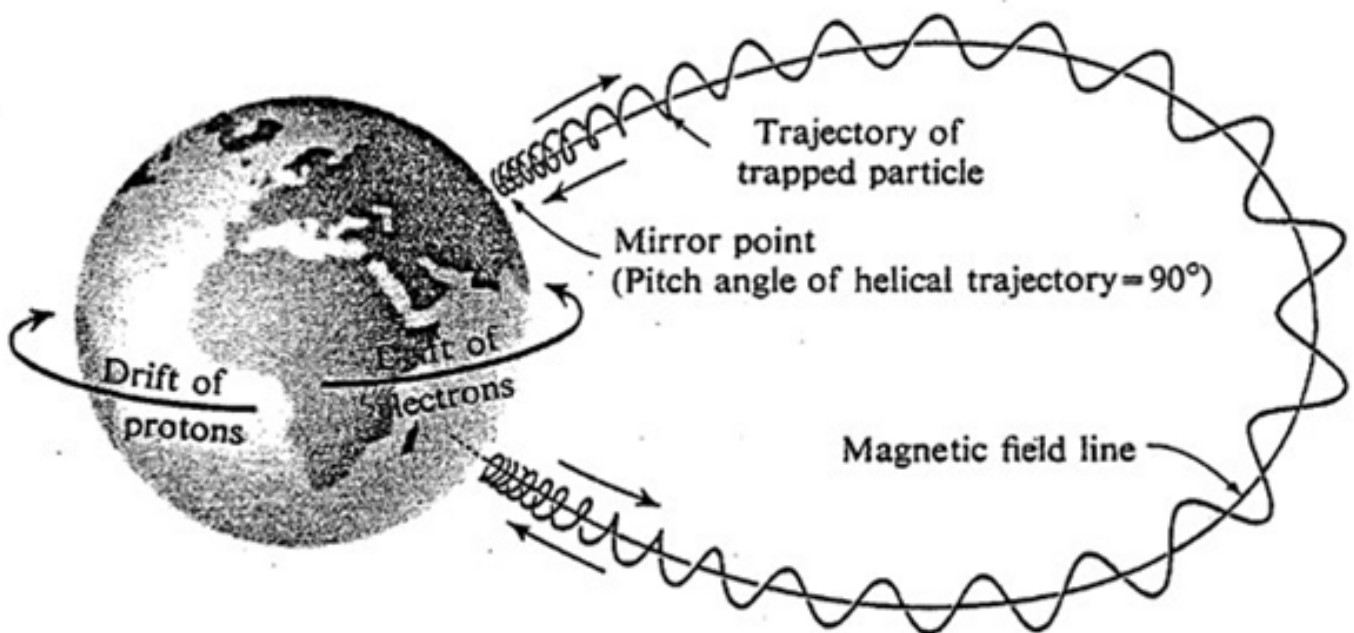
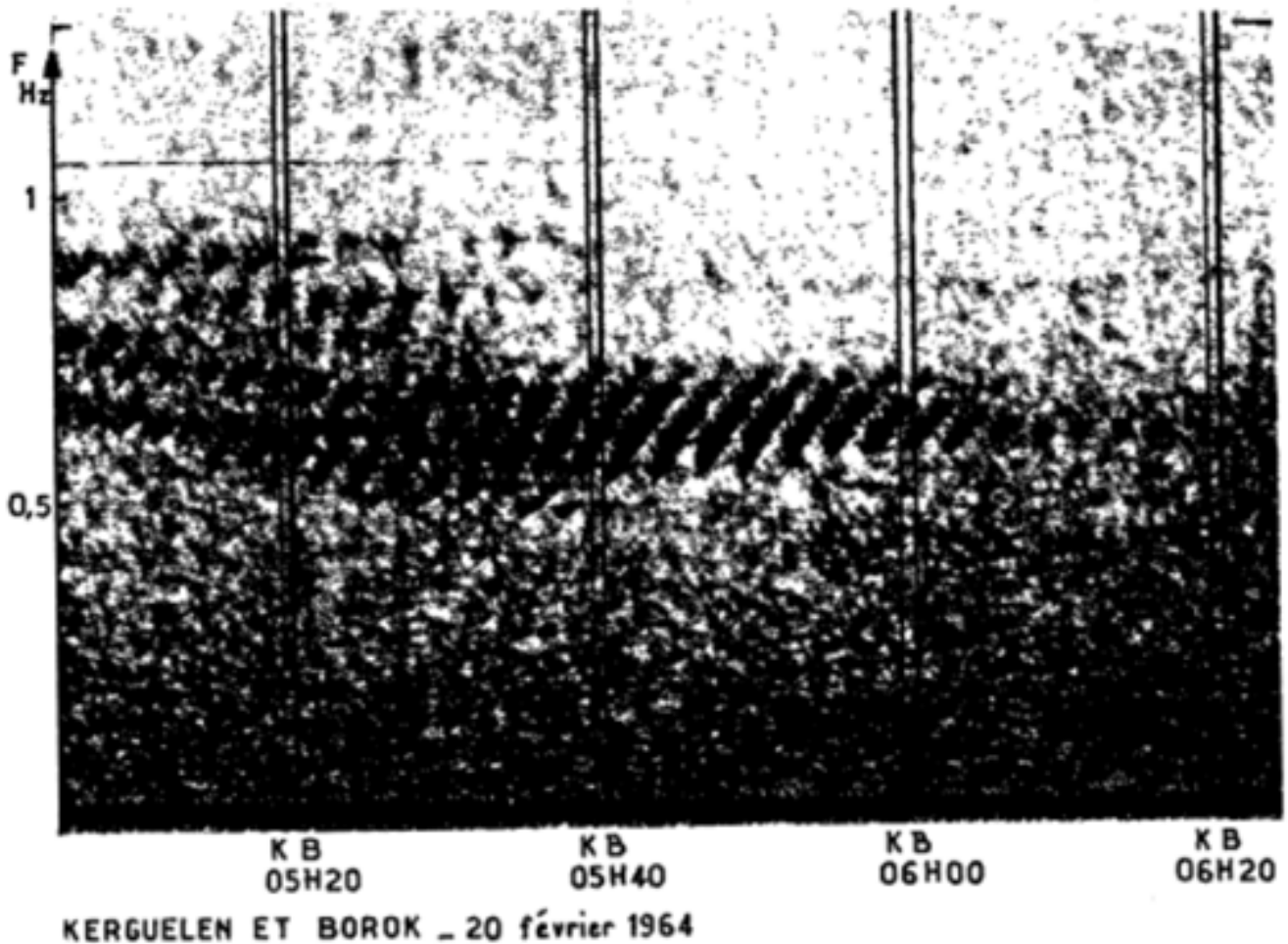


Schéma de principe de l'interaction des particules chargées du vent solaire avec le champ magnétique terrestre

Contrairement aux interactions entre les impulsions électriques provenant des orages et le champ magnétique terrestre, la propagation de ces ondes UBF/TBF conduit à des variations lentes et continues de la fréquence de ces ondes. De plus, dans certaines conditions, ces ondes peuvent être réfléchies par les couches ionosphériques et repartir en sens inverse, et ceci plusieurs fois.

Le phénomène peut durer plusieurs heures : il est appelé « perles » ou « cœur de l'aube » car il ressemble aux piailllements des oiseaux à l'aube !

Ce type de phénomène peut être reçu au sol dans les zones où les lignes de force du champ magnétique se rapprochent du sol, donc au voisinage des zones polaires nord et sud.



Exemple de signaux UBF/TBF créés par l'interaction du vent solaire avec le champ magnétique terrestre reçus à Kerguelen en 1964. Il s'agit d'un sonogramme représentant l'évolution du contenu fréquentiel (en ordonnée) avec le temps (en abscisse)

Etude des ondes naturelles dans les domaines UBF et TBF

Ce n'est qu'à la fin des années 1950 - et les premiers satellites - que ces phénomènes ont pu être expliqués, et que de nombreux programmes de recherches ont été lancés. Ce fut notamment le cas à l'occasion de l'année géophysique internationale de 1957-1958, à laquelle la France a participé en mettant en place des moyens de mesure de ces phénomènes, en Terre Adélie et à Kerguelen. Ces moyens sont toujours en place, et l'auteur de ces lignes a eu la chance d'y contribuer lors de son séjour à Kerguelen en 1979-1980.

Que ce soit au sol ou à bord de satellites, les moyens de mesures sont constitués par de gros bobinages dont la fréquence de résonance est fortement amortie pour se situer dans le domaine des fréquences étudiées. La principale difficulté à surmonter est la très faible efficacité de ce type de capteur, et donc la préservation d'un rapport signal/bruit suffisant.

Les moyens de mesure que j'ai mis en œuvre à Kerguelen pour le Laboratoire de Géophysique Externe de St Maur des Fossés étaient constitués par :

- Un ensemble de capteurs situés à proximité du laboratoire, lui-même situé à 4 km de la base de Port aux Français pour limiter les signaux parasites émis par les groupes alternateurs et les émetteurs radio professionnels (50 kW + antennes rhombiques de 200m de long pointées sur la Métropole !) ;



Laboratoire de Géophysique Externe de Kerguelen en 1979

On distingue à gauche le radome pour les télécommunications avec les satellites et au centre le mat de l'antenne 2 GHz pour la liaison avec la station automatique de Pointe Suzanne

- Un ensemble similaire de capteurs situés dans une station automatique située à Pointe Suzanne, à 20 km à vol d'oiseau de la base, et télécommandée par une liaison numérique SHF sur 2 GHz ;



La station de géophysique externe de Pointe Suzanne à Kerguelen (1979)

- D'une station (1 kW sur 137 MHz, antenne 2x13 éléments croisées pilotées en site et azimuth) pour la télécommande et la réception de signaux UBF/TBF reçus par les satellites défilants des programmes ISIS et GEOS.



La station de télécommande des satellites de géophysique à Kerguelen (1979)

A titre d'exemple, voici 2 fichiers audio qui illustrent à quoi ressemblent ces signaux radioélectriques d'origine naturelle que nous avons reçus à Kerguelen, une fois transposés dans le domaine sonore :

- une série de sifflements dans le domaine TBF (0.5 à 5 KHz) déclenchés par des éclairs d'orages en Afrique centrale ; Un exemple d'une séquence de « perles » enregistré à Kerguelen en 1979 est accessible par le lien http://f6ftbinfo.chez.com/tbf_ker1.wav

- une séquence de signaux complexes dans la bande 0.1 à 10 Hz appelés « perles ». Ces événements peuvent durer des heures et ne sont pas audibles après conversion en signal audio car beaucoup trop bas en fréquence ; mais si on relit l'enregistrement audio 512 fois plus vite, les signaux sont décalés dans le domaine audible : ici de 50 à 5000 Hz. Un exemple d'une séquence de « perles » enregistré à Kerguelen en 1979 est accessible par le lien <http://f6ftbinfo.chez.com/perles.wav> .

L'analyse de ces signaux permet de calculer les paramètres physiques dans le milieu de propagation de ces ondes : intensité du champ magnétique et densité ionosphérique, et les caractéristiques du vent solaire incident : nature, vitesse, nombre de particules.