

# A la découverte des fréquences basses

Jean-Louis Rault F6AGR

*jf6agr@wanadoo.fr*

La partie basse du spectre radioélectrique est un univers peu connu.

Vous êtes-vous déjà demandé s'il y avait une limite inférieure au spectre radioélectrique ?

Que peut-on espérer capter avec des moyens amateurs ?

Par leurs particularités, les signaux de grandes longueurs d'onde, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, constituent un sujet d'étude captivant. Nous vous proposons dans ce bref survol des basses fréquences de partir à la découverte d'un domaine passionnant et souvent surprenant.

Un deuxième article décrira en détail la réalisation pratique d'un récepteur VLF vous permettant de partir vous-même à la chasse aux signaux de basse fréquence.

Pour bon nombre d'entre nous, la connaissance du spectre radioélectrique s'arrête à l'extrémité basse de la bande des Grandes Ondes.

La station de radiodiffusion France Inter, qui émet en modulation d'amplitude sur 164 kHz, représente l'émetteur le plus bas en fréquence qu'il soit donné à chacun de capter facilement avec un récepteur grand public.

Les récepteurs ou les transceivers radioamateurs du commerce permettent parfois de descendre plus bas, jusqu'à 60 kHz, voire 30 kHz pour certains d'entre eux, mais leurs performances sont souvent très dégradées à ces fréquences. De plus, le manque d'antennes adaptées fait que les tentatives d'écoute ne donnent souvent que de piètres résultats.

Le spectre radioélectrique compris entre 150 kHz et... quelques Hz (oui, quelques hertz !) comporte de nombreux signaux artificiels ou naturels dont beaucoup sont détectables avec des moyens amateurs. Nous allons les passer successivement en revue.

Les toutes premières transmissions radioélectriques eurent lieu en VHF/UHF, puisque en 1887 Heinrich Hertz mena ses premières expériences en ondes amorties sur des fréquences comprises entre 60 et 500 MHz environ.

Guglielmo Marconi se fit entendre pour la première fois de l'autre côté de l'Atlantique en 1901 avec un émetteur à étincelles dont la fréquence fondamentale était voisine de 820 kHz<sup>1</sup>.

Reginald Fessenden fut le premier à tenter des transmissions radio en ondes continues, c'est-à-dire non-amorties. En

mettant en œuvre des alternateurs haute fréquence de sa conception, il put réaliser dès 1906 des transmissions à longue distance sur des fréquences comprises entre 10 et 20 kHz.

La voie des communications VLF était alors ouverte !

Par convention, la partie inférieure du spectre est aujourd'hui divisée en plusieurs tranches, comme représenté dans le tableau ci-dessous.

LF (low frequencies)	De 300 à 30 kHz
VLF (very low frequencies)	De 30 à 3 kHz
ELF (extremely low frequencies)	De 3 kHz à 300 Hz
ULF (ultra low frequencies)	Moins de 300 Hz

Les particularités de ces basses fréquences sont vite apparues à l'usage.

De façon générale, les signaux de grande longueur d'onde se caractérisent par une propagation d'une grande stabilité. L'amplitude et la phase des signaux VLF sont moins sujets qu'en ondes plus courtes aux caprices de l'ionosphère ou de la troposphère. Les transmissions VLF permettent une couverture mondiale. De plus, les fréquences les plus basses ont la particularité de se propager en partie sous l'eau, ce qui représente un atout majeur pour communiquer avec les sous-marins en plongée.

Les inconvénients liés à l'utilisation des basses fréquences sont de plusieurs types :

- l'activité kéraunique<sup>2</sup> dégrade le rapport signal/bruit en cas d'orages proches ou lointains,
- la bande passante utilisable est faible, le débit d'information est donc limité,

- les antennes d'émission doivent avoir une taille énorme pour permettre d'espérer rayonner l'énergie basse fréquence de façon relativement efficace.

A la surface du globe, les ondes LF et VLF se propagent "en onde de sol" dans un guide d'ondes dont l'une des parois est la surface terrestre, et l'autre la couche ionisée la plus basse de l'ionosphère, à savoir la couche D.

Les guides d'ondes sont surtout connus pour leur utilisation en hyperfréquences, mais les lois qui les régissent sont les mêmes quelle que soit la fréquence considérée !

Donnons quelques ordres de grandeur : la couche D, dont la hauteur varie entre le jour et la nuit, se situe entre 60 et 85 km d'altitude environ.

Pour des signaux en polarisation verticale, la fréquence de coupure<sup>3</sup> d'un tel guide est

$$f_c = \frac{c}{2 \cdot h}$$

c étant la célérité de l'onde dans le vide (300 000 km/s) et h la hauteur du guide.

Pour une couche D de hauteur apparente égale à 90 km, les signaux radioélectriques se propagent avec très peu de pertes si leur fréquence est supérieure à la fréquence de coupure qui est de 1,6 kHz (180 km de longueur d'onde). Souvenez-vous de cette fréquence, nous en reparlerons plus tard.

Comme dans tout guide d'ondes, on peut se représenter la propagation des signaux par la réflexion successive de rayons sur les parois.

1 - On suppose aujourd'hui, au vu des conditions de propagation et de la sensibilité des dispositifs de réception de l'époque, que c'est le

deuxième ou troisième harmonique de son émission qui fut détecté à Terre-Neuve, et non pas la fréquence fondamentale d'émission.

2 - du grec keraunos, la foudre

3 - fréquence au dessous de laquelle les signaux ne se propagent plus dans le guide d'ondes.

Considérons une source d'émission VLF située en TX (voir figure 1). Si nous nous plaçons en RX, le signal reçu sera la somme des différents signaux qui se propagent en se réfléchissant une, deux, trois, ..., n fois sur les parois du guide.

Les différents trajets ont évidemment des longueurs et donc des temps de propagation différents. L'atténuation et le retard de propagation d'un rayon augmentent avec le nombre de réflexions successives. Un signal très bref, tel un éclair d'orage, peut donc être entendu à distance comme une succession d'échos d'amplitude décroissante.

En un point donné, le signal reçu d'une porteuse continue est composé de la somme de plusieurs sinusoïdes de phase et d'amplitude différentes.

Si l'on considère un émetteur fixe et qu'on mesure l'amplitude du signal reçu pendant qu'on s'en éloigne progressivement, on constate que l'amplitude du signal passe par des bosses et des creux, car à certains endroits les différents signaux reçus s'additionnent (interférences constructives) et à d'autres ils s'annulent (interférences destructives).

Considérons maintenant le cas d'un émetteur et d'un récepteur fixes.

Si l'on surveille l'amplitude (ou la phase) du signal reçu sur une durée de 24 heures, on constate qu'elle fluctue profondément, notamment au lever et au coucher du soleil.

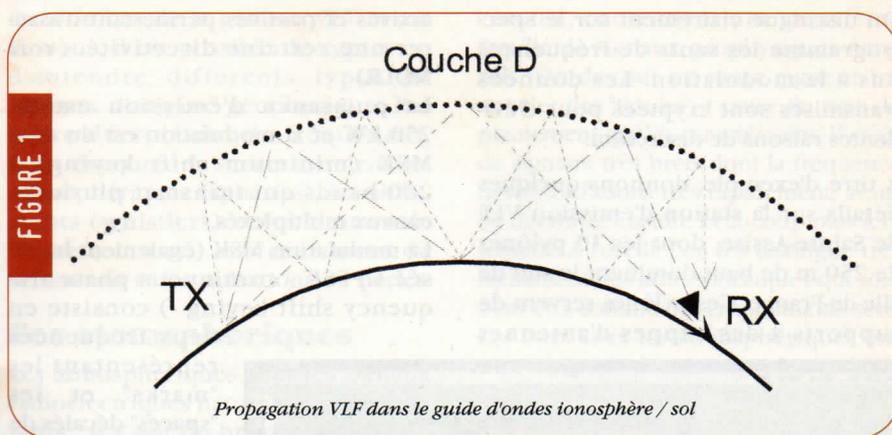
En effet, la hauteur apparente et la densité de la couche D de l'ionosphère varient selon qu'elle est éclairée ou non par le Soleil.

La hauteur variant, la longueur des trajets des différents rayons (voir figure 1) est modifiée et le résultat global des interférences donne donc une amplitude fluctuant au fil du temps.

L'enregistrement de la station horaire GBR par exemple, que j'ai effectué en Ile-de-France (QRA locator : JN18DQ) au mois de novembre 2002 (voir figure 2) montre clairement les fluctuations importantes d'amplitude du signal<sup>4</sup>.

Le signal de GBR, transmis à partir de Rugby en Grande-Bretagne, est une porteuse pure de fréquence 60 kHz, découpée au rythme des signaux horaires.

A 60 kHz, la longueur d'onde est de 5000 mètres. Pour de tels signaux, le guide d'ondes ionosphère/sol fonctionne en multimode et le signal reçu en un point est constitué de nombreux signaux diversement réfléchis et combinés entre eux, ce qui explique la forme compliquée des variations d'amplitude. L'axe vertical de la courbe bleue représente l'ampli-



tude du signal reçu, et l'axe horizontal est le temps écoulé. J'ai pointé sur la figure 3 la situation géographique de la station anglaise GBR de Rugby, ainsi que celles de quelques autres stations LF et VLF. HBG (75 kHz) et DCF77 (77,5 kHz) sont comme GBR des étalons horaires. FUG, FTA et HWU sont des stations de transmissions VLF du réseau TRANSFOS destinées à transmettre des informations aux sous-marins français de la Force Océanique Stratégique.

Sur la figure, le petit trait rouge reliant GBR à JN18DQ représente le trajet direct entre Rugby et mon lieu de réception.

Le grand trait oblique qui s'étend du sud de la Suède au sud du Portugal représente la position du terminateur, c'est-à-dire la ligne de séparation jour/nuit au moment de l'enregistrement représenté en figure 2.

Quittons maintenant le domaine des LF pour explorer celui des VLF.

La bande de fréquences comprise entre une dizaine et une trentaine de kHz est essentiellement occupée par les systèmes de radiolocalisation et de communications avec les sous-marins en plongée.

L'ancien réseau de localisation hyperbolique OMEGA (démantelé en 1997 suite à l'avènement du GPS, système de positionnement par satellites) était constitué de plusieurs émetteurs dont les porteuses étaient parfaitement synchronisées en phase, ce qui permettait de déterminer sa position avec précision.

Sur l'île de la Réunion dans l'océan Indien, par exemple, était encore érigé il y a quelques années un imposant pylône OMEGA de 400 mètres de hauteur solidement haubané pour résister aux cyclones. Ce pylône était accordé à la base par un système d'in-

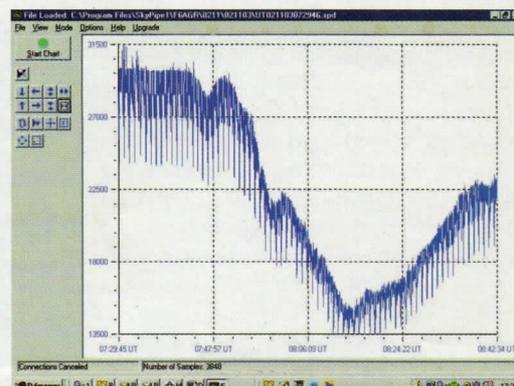


Figure 2 : Fluctuation d'amplitude à la réception d'un signal VLF

ductances de taille impressionnante, ce qui lui permettait de résonner sur une fréquence d'émission de 12,3 kHz. Le système de navigation VLF russe RSDN-20, alias ALPHA, est lui toujours en activité.

On peut voir en figure 4 une analyse spectrale des signaux reçus au mois de novembre dernier, toujours en JN18DQ, dans la tranche 10 à 16 kHz.

On distingue clairement des transmissions de porteuses à 11,9 kHz, 12,65 et 14,88 kHz qui sont celles d'émetteurs ALPHA situés à Novossibirsk, Krasnodar et Komsomolskna-Amur.

Sur cette gamme de fréquences, on peut également capter des transmissions numériques destinées aux sous-marins.

Sur l'analyse spectrale représentée en figure 5, on distingue clairement, outre les stations russes ALPHA ci-dessus, les émetteurs suivants :

- Rugby sur 16 kHz (Royal Navy, Grande Bretagne)
- Rosnay sur 18,3 kHz (Marine française)
- Une station de l'OTAN sur 19,6 kHz (Anthorn, Grande Bretagne)
- Une autre station de l'OTAN sur 20,27 kHz (Ile de Tavolara, Sardaigne)
- Sainte-Assise sur 20,9 kHz (Marine française)
- Une troisième station de l'OTAN sur 23,4 kHz (Rhauderfehn, Allemagne).

4 - Conditions de réception: transceiver ICOM IC-738 et antenne G5RV décamétrique à 10m du sol.

On distingue clairement sur le spectrogramme les sauts de fréquences dus à la modulation. Les données transmises sont cryptées pour d'évidentes raisons de discrétion.

A titre d'exemple, donnons quelques détails sur la station d'émission VLF de Sainte-Assise, dont les 10 pylônes de 250 m de haut dominant le sud de l'Ile-de-France. Ces pylônes servent de supports à des nappes d'antennes

actives et passives permettant d'assurer une certaine directivité. (voir NDLR)

La puissance d'émission est de 250 kW et la modulation est du type MSK (minimum shift keying) à 200 bauds qui transmet plusieurs canaux multiplexés.

La modulation MSK (également baptisée CPFASK - continuous phase frequency shift keying -) consiste en

deux fréquences représentant les "marks" et les "spaces" décalés de façon symétrique par rapport à la porteuse  $F_0$ .

Pour une modulation à 200 bauds, les écarts de fréquence sont de  $\pm 50$  Hz.

Tous ces différents signaux VLF ont été captés avec un récepteur

qui sera décrit en détail par la suite. L'antenne utilisée était un fouet vertical de 2 m sensible à la composante électrique (verticale) du champ électromagnétique reçu.

Nous avons vu que les ondes de basse fréquence peuvent se propager sous l'eau.

L'atténuation du signal croît de façon exponentielle avec la profondeur.

La profondeur de pénétration (définie comme celle pour laquelle le signal est égal à  $1/e$ , soit 0,37 fois celui de la surface) est exprimée par la formule :

$$P_p = \frac{503}{\sqrt{\sigma \cdot f}}$$

$F$  est la fréquence exprimée en Hz et  $s$  représente la conductivité du milieu de propagation en Siemens par mètre. Pour l'eau de mer,  $s$  vaut 5 S/m et la profondeur de pénétration est donc de 2,5 m environ.

Pour un sol mauvais conducteur ( $s = 3$  ms/m), la profondeur de péné-

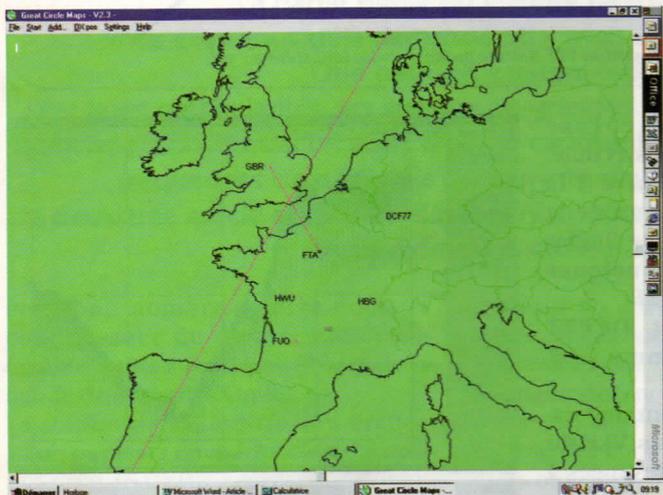


Figure 3 : Influence de l'éclaircissement sur la propagation VLF

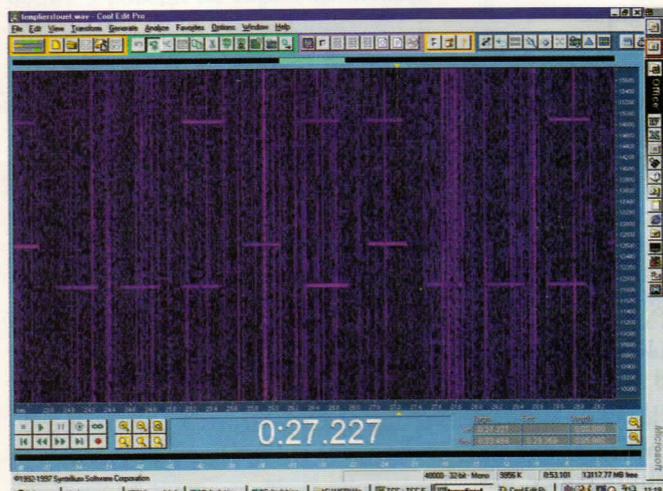


Figure 4 : Système de localisation russe VLF ALPHA

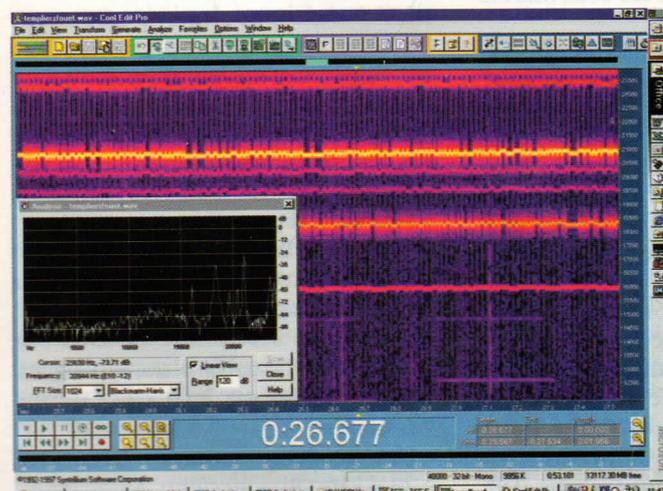
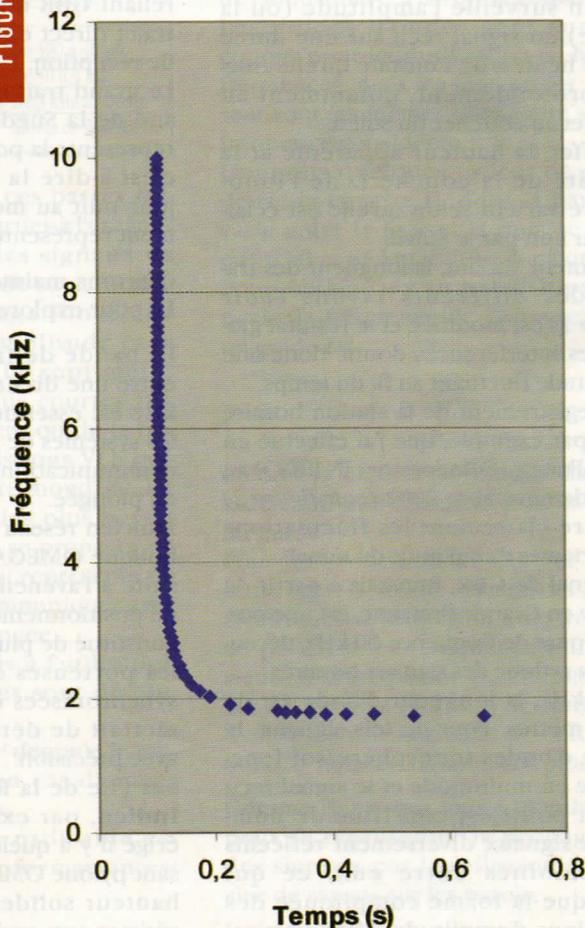


Figure 5 : Transmissions VLF pour la marine

### Dispersion fréquentielle d'un tweek reçu à 3000 km

FIGURE 6



Courbe théorique des fréquences d'un tweek

tration devient 92 m, ce qui vous donne une idée du pouvoir de pénétration des basses fréquences ; Pour en terminer avec le sujet des communications avec les sous-marins en plongée, signalons l'existence du système russe ZEVS, qui transmet depuis Mourmansk sur... 82 Hz (3 658 km de longueur d'onde !) avec un débit de quelques bits par minute, et de l'équivalent américain qui émet lui depuis le Wisconsin et le Michigan sur 76 Hz.

Ces signaux peuvent être reçus jusqu'en plongée profonde, puisque l'absorption de l'eau diminue avec la fréquence du signal.

Les moyens à mettre en œuvre pour détecter de tels signaux sont encore du domaine amateur, mais se compliquent sérieusement.

Une première solution consiste à capter la composante magnétique du champ émis. Il faut pour cela bâtir une antenne d'un bon mètre de long composée de dizaines de milliers de spires bobinées sur un noyau de fer ou de mumétal.

Si l'on préfère capter le champ électrique du signal à l'aide d'un d'une antenne filaire ou sphérique, il faudra construire un amplificateur d'impédance d'entrée extrêmement grande (plusieurs centaines de MW).

Dans les deux cas, il faudra que l'amplificateur soit à grand gain et à faible bruit : voilà un challenge intéressant à relever pour ceux qui aiment bidouiller !

A noter que la chaîne de réception devra impérativement être située loin de toute zone habitée, pour s'affranchir des nombreux parasites inévitables en zone urbaine.

Nous avons évoqué jusqu'à présent les émissions LF et VLF d'origine artificielle. Partons maintenant à la découverte du bestiaire des signaux d'origine naturelle.

Dans le bas de la gamme VLF et au-dessous, il est possible de capter ou d'entendre différents types de signaux d'origine géophysique. Par ordre décroissant de fréquences, nous évoquerons successivement les atmosphériques (spherics), les sifflements (whistlers) et les chœurs de l'aube (chorus), les résonances de Schumann et les pulsations en perles.

## Les atmosphériques

Les atmosphériques sont les signaux radioélectriques naturels les plus courants : il s'agit de brèves impulsions radio dues aux éclairs orageux.

On estime qu'à tout moment, il existe environ 1800 orages en cours de par le monde, qui sont source d'une moyenne de 37 éclairs par seconde !

Ces éclairs, qui sont une décharge très brève de courant électrique de plusieurs dizaines de milliers d'ampères, génèrent une impulsion radioélectrique couvrant un très large spectre, depuis les ELF jusqu'aux UHF. Les basses fréquences se propagent très loin dans le guide d'onde formé par la couche D et la surface terrestre, car l'atténuation n'y est que de quelques décibels par millier de kilomètres parcouru.

A titre d'exemple, de nombreux atmosphériques sont visibles sur le spectrogramme de la figure 4, bien qu'aucun orage proche n'était présent le jour de l'enregistrement.

A chaque trait vertical correspond un atmosphérique qui se manifeste à l'oreille par des claquements brefs.

Ce sont eux qui en grande partie limitent la qualité des liaisons radio VLF, car ils dégradent fortement le rapport signal/bruit.

## Les tweeks

Les tweeks (pas de mot équivalent en français), nommés ainsi à cause du bruit qu'ils font lorsqu'on les perçoit à

l'oreille, constituent une deuxième famille de signaux géophysiques naturels. On devrait en toute rigueur les appeler des "tiuouks", à cause du type de pialement qui les caractérise. Il s'agit de signaux très brefs dont la fréquence descend d'abord très rapidement, avant de décroître ensuite beaucoup plus lentement. A l'oreille, on les distingue très facilement des atmosphériques qui sonnent eux comme des crépitements secs. Les tweeks et les atmosphériques ont une origine commune : les éclairs d'orage. En fait, les tweeks sont des atmosphériques provenant d'éclairs lointains. Nous avons vu plus haut que le guide couche D / sol, comme tout guide d'ondes, avait une fréquence de coupure au-dessous de laquelle les ondes étaient extrêmement atténuées. Il faut savoir que la vitesse de propagation de l'énergie dans un guide (vitesse de groupe) diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche de la fréquence de coupure.

Cette vitesse de groupe s'exprime sous la forme :

$$v_g = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{f_c^2}{f^2}}}$$

Les signaux de fréquence  $f$  supérieure à la fréquence de coupure  $f_c$  du guide se propagent à une vitesse proche de  $c$ , célérité de la lumière (le dénominateur de la fraction reste très voisin de 1). Par contre, les fréquences à peine supérieures à  $f_c$  se propagent beaucoup plus lentement (jusqu'à atteindre  $v_g = 0$  pour une fréquence égale à la fréquence de coupure).

Le guide d'ondes, au voisinage de sa fréquence de coupure, se comporte donc comme un milieu très dispersif : les différentes composantes fréquentielles du signal ne se propagent pas toutes à la même vitesse, les fréquences basses se propageant le plus lentement.

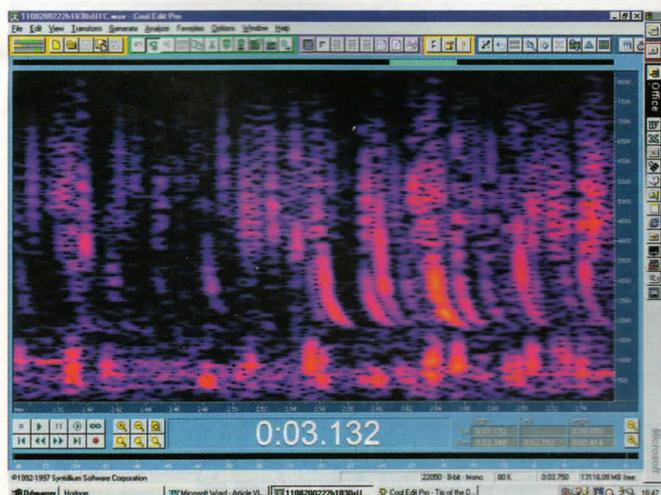


Figure 7 : Exemple réel de tweeks

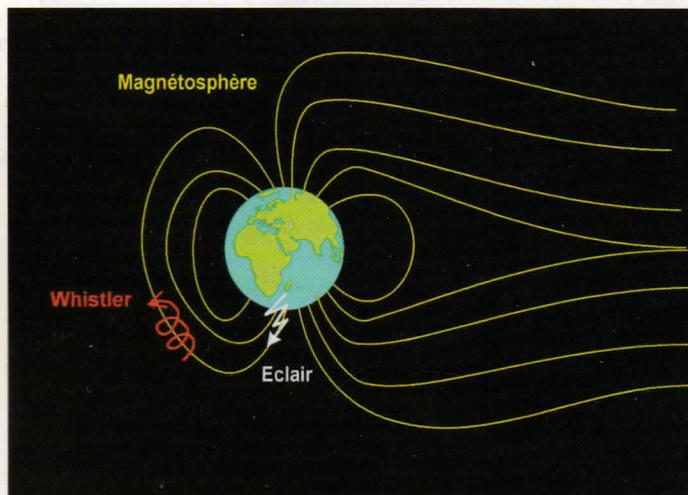


Figure 8 : Propagation d'un whistler d'une hémisphère à l'autre

La *figure 6* représente les temps théoriques d'arrivée successive des différentes fréquences d'un tweek.

### Qu'en est-il en pratique ?

La *figure 7* montre une analyse spectrale de tweeks réels captés par le SWL Thierry Alves du radioclub F6KEO de Bordeaux pendant ses dernières vacances d'été au Portugal (antenne fouet, récepteur BBB-4 McGreevy à transistor à effet de champ).

On retrouve bien la forme caractéristique "en crochet" qui tend asymptotiquement vers 1 700 Hz, fréquence de coupure du guide correspondant à une hauteur de la couche D située à 88 km environ du sol. La courbure du "crochet" permet d'estimer qu'il s'agissait d'éclairs situés à un millier de kilomètres environ.

### Les sifflements

Les sifflements, ou whistlers, sont des bruits particulièrement étranges qui se manifestent sous forme d'un son rauque de fréquence descendante. Ils peuvent durer plusieurs secondes. Il semble qu'ils aient été entendus pour la première fois dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par les tout premiers utilisateurs du téléphone.

Les whistlers sont des ondes électromagnétiques de basse fréquence engendrées comme les atmosphériques ou les tweeks par des éclairs d'orage. Les fréquences basses du large spectre créé par l'impulsion de l'éclair se propagent dans la magnétosphère en suivant sur des dizaines de milliers de kilomètres les lignes du champ magnétique terrestre. Le tube de plasma ionisé qui guide un whistler le long d'une ligne de force est un milieu dispersif : les fréquences hautes s'y déplacent plus rapidement que les fréquences basses. C'est la raison pour laquelle on entend dans l'hémisphère nord un éclair d'un orage situé dans l'hémisphère sud, non sous forme d'un "crrrac" bref mais plutôt d'un "tchiiiiououou" qui peut durer plusieurs secondes. Sur la *figure 8*, j'ai représenté de façon simplifiée la Terre entourée de sa magnétosphère, ainsi qu'un whistler se propageant le long d'une ligne de force du champ magnétique.

On constate que les lignes du champ magnétique terrestre sont comprimées du côté gauche de la figure et étirées du côté opposé. Cela est dû aux particules du vent solaire émises par un Soleil situé à gauche de l'image.

Une partie de l'énergie d'un éclair orageux de l'hémisphère sud, injectée le long d'une ligne de force du champ magnétique, se propage sur des milliers de kilomètres dans le plasma de la magnétosphère avant d'arriver au sol dans l'hémisphère nord, au point conjugué magnétique.

Le point conjugué magnétique de votre position est l'endroit situé dans l'hémisphère opposé où aboutit

la ligne de force du champ magnétique qui traverse votre propre site. Attention : les latitudes et longitudes magnétiques ne correspondent pas aux latitudes et longitudes géographiques. D'un part, les pôles nord et sud magnétiques ne sont pas centrés sur les pôles géographiques correspondants (leur position dérive d'année en année), et d'autre part, le champ magnétique ne représente pas de structure parfaitement régulière.

Ainsi, la ligne de force magnétique susceptible de guider des whistlers jusqu'à ma station située par 48° 40' Nord et 2° 19' Est n'aboutit pas dans l'hémisphère sud en un point symétrique situé par 48° 40' de latitude Sud et 2° 19' de longitude Est...

Le point conjugué de l'hémisphère sud où des orages sont susceptibles de créer des whistlers audibles en Ile-de-France, par exemple, se situe en réalité par 38° 05' de latitude Sud et 18° 06' de longitude Est, c'est-à-dire au large de la ville du Cap, en Afrique du Sud<sup>5</sup>.

La carte de la *figure 9* vous permet de comparer d'un simple coup d'œil les coordonnées géographiques et magnétiques de tous lieux.

Le temps d'arrivée d'une fréquence particulière d'un whistler ayant voyagé le long d'une ligne de force s'exprime sous la forme

$$t = \frac{D}{\sqrt{f}}$$

f étant la fréquence considérée et D étant égal à

$$\frac{d \cdot \omega_{pe}}{2 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot c \cdot \sqrt{\omega_e}}$$

avec

-  $\omega_a$  et  $\omega_{pe}$  qui sont des gyrofréquences dépendant du nombre d'électrons du plasma traversé, de la charge

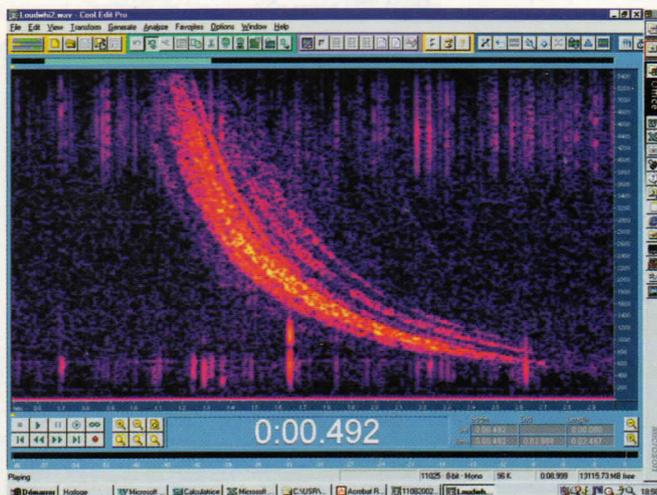
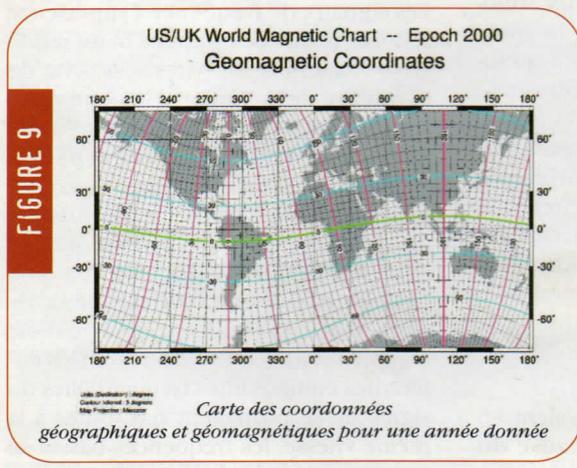


Figure 10 : Analyse spectrale d'un whistler réel

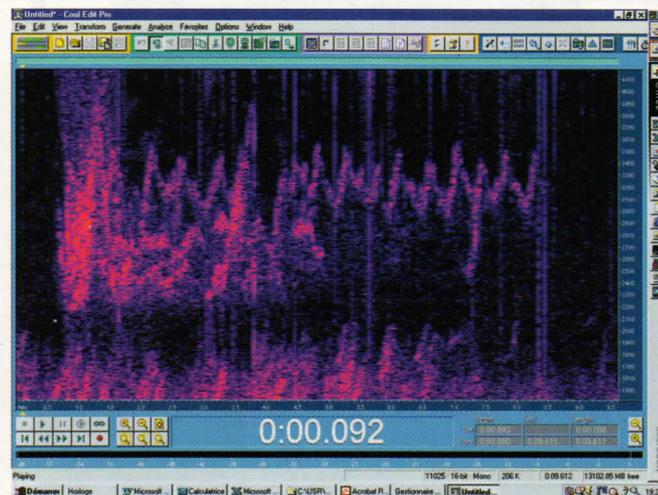


Figure 11 : Analyse spectrale d'un chœur de l'aube réel

5 - Le site Internet [nssdc.gsfc.nasa.gov/space/cgm/cgm.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/cgm/cgm.html) par exemple vous permet de déterminer avec précision le point conjugué de votre propre position.

électrique de l'électron et de sa masse ainsi que de la constante diélectrique du milieu traversé,

- d la distance parcourue par l'onde,
- c la célérité de la lumière.

On retiendra que la dispersion du sifflement dépend des caractéristiques physiques du plasma de la magnétosphère et de la longueur du trajet parcouru.

Il arrive qu'un whistler soit assez puissant pour qu'une fois arrivé à son point magnétique conjugué, il rebondisse et reparte pour une nouvelle ballade loin de la Terre avant de revenir à son point de départ et ceci, parfois, plusieurs fois de suite !

La figure 10 représente un magnifique whistler enregistré par Stephen P. McGreevy aux Etats-Unis. On distingue plusieurs raies de fréquences pures groupées constituant un sifflement de 2 secondes au moins.

Le champ électrique mesuré au sol pour de tels sifflements est compris entre quelques  $\mu\text{V}/\text{m}$  et  $4 \text{ mV}/\text{m}$  pour les plus puissants. Avec un fouet vertical de 2 m dont la hauteur électrique effective est de un mètre environ, la f.e.m. (force électromotrice) produite au niveau de l'antenne est donc de 2 mV pour les signaux les plus forts, ce qui montre qu'un récepteur de fabrication amateur de fabrication soignée est parfaitement à même de les capter.

### Les chœurs de l'aube

Parmi les nombreux bruits radioélectriques naturels qui nous entourent, il existe également un phénomène appelé "chœur de l'aube" car il se produit le plus souvent juste avant le lever du soleil. De toute beauté, le son produit ressemble à un souffle mêlé de chants d'oiseaux, car à un bruit à large bande se superposent des raies de fréquence pures et fluctuantes.

Un exemple de tel chœur est donné en figure 11.

Ces phénomènes, dus à des interactions dans la magnétosphère entre les particules du vent solaire et les lignes de force du champ magnétique terrestre, se captent au sol plus facilement aux hautes latitudes qu'à celles de la France. Il est néanmoins possible d'en entendre (souvent associés à des phénomènes auroraux) sous nos latitudes tempérées en période de Soleil actif comme actuellement, c'est-à-dire tous les onze ans.

### Toujours plus bas...

Terminons ce rapide survol des signaux naturels par deux sortes de phénomènes parmi les plus bas en fréquence qu'il soit possible de détecter.

Dans la partie ULF du spectre, on rencontre des oscillations radioélectriques naturelles centrées sur 7, 14 et 21 Hz.

Il s'agit de fréquences dites "résonances de Schumann".

L'activité orageuse est une fois encore responsable de ces oscillations à très basse fréquence. Les éclairs excitent la cavité ionosphère/terre qui, telle une cloche, résonne sur plusieurs fréquences qui ne sont pas forcément en relation harmonique exacte (voir figure 12).

Enfin, et nous arrêterons là pour aujourd'hui, des pulsations de fréquence égale ou inférieure à 1 Hz dont l'existence est due à des instabilités du plasma de la magnétosphère sont régulièrement détectées, et ce particulièrement aux hautes latitudes. Nommées perles en raison de leur forme, ces pulsations (baptisées PC1) prennent naissance dans la magnétosphère au niveau de l'équateur et se propagent le long des lignes de force pour aboutir au niveau du sol en des points magnétiquement conjugués.

Un exemple de telles pulsations en perles que j'ai eu le loisir d'enregistrer autrefois pendant plus d'un an d'affilée lors d'un hivernage aux Iles Kerguelen pour le compte du CNRS vous est représenté en figure 13.

Une analyse spectrale d'un tel signal complexe montrerait qu'il est constitué d'une somme de plusieurs fréquences pures dont la valeur dérive au cours du temps.

Les différents signaux que nous venons d'évoquer et leur caractéristiques de propagation font l'objet de nombreux programmes de recherche scientifique purement fondamentale visant à améliorer nos connaissances sur l'environnement terrestre. Il existe également des programmes de recherche appliquée. L'analyse fine des anomalies de propagation des transmissions VLF par exemple aboutira peut-être un jour à une prédiction fiable des tremblements de terre. Il est en effet avéré aujourd'hui que la couche D de l'ionosphère, et donc les signaux radio qui s'y réfléchissent, sont parfois perturbés par les contraintes mécaniques de la croûte terrestre qui précèdent les catastrophes sismiques.

Nous décrirons dans un prochain article la

réalisation d'un récepteur simple vous permettant de vous lancer à votre tour à l'écoute des VLF.

### Bibliographie succincte

#### Livres :

"Radiowave Propagation" de MPM Hall et LW Barclay. IEE Electromagnetic Waves Series 30. 1989.

"Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction" de M. Hayakawa, terra Scientific publishing, Tokyo.

#### Proceedings :

"ELF/VLF/LF Radio Propagation and Systems aspects" de l'AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development). 1992.

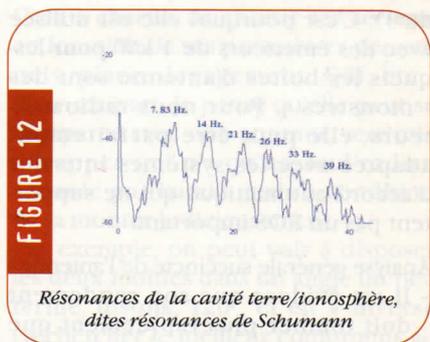
#### Thèses :

"Conception et réalisation d'un système (...) pour l'identification (...) de signaux transitoires de type sifflement" de Frank Elie, CNRS, Université d'Orléans, 1997.

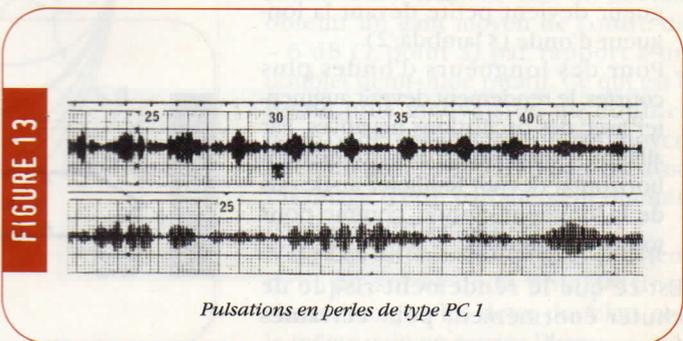
"Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics" de Steven A. Cummer, DEE, Université de Standford, 1997

### NDLR de F6AEM :

Les nappes tendues entre les pylônes constituent des capacités terminales, et ne participent pas directement au rayonnement. Les parties rayonnantes sont les fils d'alimentation, (verticaux ou en oblique) parcourus par un courant à peu près constant (longueur réelle très faible par rapport à la longueur d'onde). Le rayonnement est donc en polarisation verticale, afin d'exciter l'onde de sol.



Résonances de la cavité terre/ionosphère, dites résonances de Schumann



Pulsations en perles de type PC 1