

Recherche de radiations VLF éventuelles par les météores

Campagne de mesures Perséides 2009

VLF radiations by some meteors: a reality ?

Perseids 2009 campaign

Jean-L. RAULT F6AGR

Commission Radioastronomie de la Société Astronomique de France
Commission Radio de l'International Meteor Organization
f6agr@orange.fr

Résumé: De nombreux témoignages crédibles relatifs à des sons variés apparaissant simultanément avec des étoiles filantes ont été relatés au cours des siècles. Quelques travaux théoriques prédisent qu'une onde électromagnétique pourrait servir de vecteur à ces sons. La présente étude est basée sur l'observation des fréquences radio les plus basses du spectre électromagnétique pendant des averses d'étoiles filantes et recherche des corrélations entre des événements radio et des météores. Les résultats préliminaires tendent à montrer une corrélation significative entre certains météores et des événements ELF/VLF associés.

Mots-clé: Météores électrophoniques, ELF, VLF, forward scatter, correlations.

1. Introduction

Depuis plusieurs siècles, de nombreux témoins dignes de foi rapportent avoir entendu des bruits de nature diverse accompagnant instantanément l'apparition d'étoiles filantes. Ce type d'observations défie les lois de l'acoustique dans la mesure où ces témoins certifient que les sons entendus apparaissent au moment même où le météore est observé visuellement. Sachant que la célérité du son dans l'air est d'environ 340 mètres par seconde, et que les météores se manifestent dans la haute atmosphère à des altitudes se chiffrant en dizaines de kilomètres, les sons accompagnant un météore devraient survenir plusieurs minutes après sa manifestation lumineuse.

Pour tenter d'expliquer l'existence de ces sons anormaux, Keay (1980) a supposé qu'une onde électromagnétique de basse fréquence était produite lors de l'entrée de certains météores dans l'atmosphère, que cette onde atteignait quasi-instantanément l'observateur puisqu'elle se propageait à la vitesse de la lumière et qu'enfin, par un phénomène de transduction électrique/acoustique, elle se transformait en onde sonore, donc audible, en arrivant au sol.

Vincović et al. (2002) ont procédé à une grande enquête pour collecter de nombreux témoignages concernant ces météores qu'on appelle électrophoniques. Cette enquête montre que les

témoins font état d'une très grande variété de sons entendus, citant des craquements, des crépitements, des souffles, des ronflements et autres sifflements.

Pour expliquer l'émission d'une onde radioélectrique de basse fréquence par un météore, la théorie de Keay fait appel à un piégeage et à une déformation de lignes de force du champ magnétique terrestre dans le plasma de la traînée du météore, suivi par une relaxation brutale de ces lignes de champ magnétique. Cette relaxation brutale serait susceptible de produire des ondes radio VLF (Very Low Frequency) de grande énergie dans une bande de fréquences couvrant la gamme 100 Hz à 10 kHz.

Breech & Foschini (1994) ont argué que ce type de relaxation devrait produire des sons de longue durée comme les souffles ou les sifflements, mais ne pouvait expliquer les sons brefs, comme les tic, clac et autres crépitements souvent rapportés par les témoins du phénomène.

Ils proposent donc leur propre de théorie de "modèle de charge d'espace" faisant appel à des ondes de choc au sein de la traînée ionisée des météores, ce qui produirait des variations soudaines et importantes de champ électrique se propageant jusqu'au sol avant d'être transformés en ondes sonores par un phénomène inexplicable.

Ol'khovtsov (1998) conteste la théorie de Keay en arguant du fait que l'énergie dissipée par un météore entrant dans l'atmosphère est bien

inférieure à celle qu'il faudrait (de l'ordre de 10^{12} watts) pour créer un champ électrique d'amplitude suffisante (environ 160 V/m) pour déclencher un stimulus auditif perceptible au niveau de l'observateur.

Pour prendre en compte l'objection de Ol'khovatorov, l'auteur de cet article propose de son côté qu'un météore entrant dans l'atmosphère ne soit que le simple déclencheur d'un phénomène géophysique susceptible de libérer une grande énergie sous forme électromagnétique. Le phénomène en question serait une décharge électrique se produisant entre différentes couches de l'atmosphère terrestre, sous l'influence du "court-circuit" produit par la traînée ionisée, donc conductrice, laissée derrière lui par un météore.

Il est en effet connu qu'entre le sol et l'ionosphère terrestre existe un champ électrique naturel d'une centaine de volts par mètre (par beau temps, et bien plus par temps orageux).

La magnitude des météores susceptibles de rayonner des ondes VLF varie beaucoup selon les auteurs, allant de -10' (Beech et al., 1995) à -6.6' (Beech & Foschini, 1999). Colin & Blum (2000), eux, affirment que des météores beaucoup moins importants sont susceptibles de rayonner de l'énergie électromagnétique.

La raison du deuxième phénomène qui entre en jeu dans les météores électroacoustiques, à savoir la transduction d'une onde électromagnétique en onde acoustique, est également difficile à définir. Keay (1994) envisage que des objets (cheveux, herbes, branches, etc.) soumis à un champ électrique variable intense soient susceptibles de vibrer mécaniquement. Paul Avan (2008), un chercheur en psychoacoustique a été interrogé par l'auteur sur l'existence possible d'illusions sonores qui seraient déclenchées par l'apparition soudaine de lumières vives dans le noir. Aucun cas de ce type n'a été identifié par ce chercheur, qui a recensé par contre quelques cas inverses, à savoir l'apparition d'illusions lumineuses lorsqu'un sujet est soumis à des sons très intenses.

Le réseau REFORME, Réseau Français d'Observations de Météores¹ a recueilli pendant l'été 2009 le témoignage de Fabien Gauthier qui signalait avoir observé un météore électroacoustique. Dans une correspondance privée avec l'auteur, l'observateur a comparé le son entendu à celui du crépitement d'une étincelle électrique.

Les météores électroacoustiques sont très rarement observés, et il existe très peu d'enregistrements convaincants de ce phénomène. Keay (1994) par exemple présente une observation unique, par Watanabe & al. (1981), d'un sursaut VLF coïncidant avec une traînée lumineuse d'étoile filante. Beech & al. (1995) rapportent l'observation,

grâce à un récepteur VLF couplé à un photomètre, d'un seul météore électroacoustique de magnitude -10' lors des Perséides 1993. Price & Blum (2000) indiquent avoir observé un accroissement significatif du bruit radio VLF aux alentours de 300 Hz lors de leur campagne d'observation des Léonides en 1999. Toutefois, ils n'ont corrélé aucuns événements VLF discrets avec l'apparition de météores particuliers. Lors d'une campagne d'observation en Mongolie, Garaj et al. (2000) rapportent avoir observé quelques rares corrélations entre des manifestations lumineuses de météores et des événements radio VLF (sans perceptions acoustiques associées). Trautner et al. (2002) de leur côté ont observé, lors d'une campagne de mesure en Australie, une certaine augmentation du champ électrique ultra basse fréquence, sans toutefois, tout comme Price & Blum, l'associer à certains météores de façon individuelle. Plus récemment, Guha & al. (2008) ont signalé avoir observé une augmentation de l'activité radio VLF vers 6 kHz, mais encore une fois sans établir de corrélations claires avec certains météores précis.

Suite à la rareté des enregistrements radio VLF, acoustiques et vidéo concernant les météores électroacoustiques, les théories de Keay et de Beech & Foschini restent à encore à conforter par des campagnes d'observations à mener sur le terrain avec sérieux et persévérance.

Dans ce cadre, le but de la présente expérimentation a été de vérifier, à l'aide d'observations en nombre suffisant pour être statistiquement significatives, si certains météores émettent des ondes électromagnétiques de basse fréquence lors de leur arrivée dans l'atmosphère terrestre.

2. Expérimentation

2.1 Principe de l'expérimentation

Le principe retenu pour cette expérimentation consiste à enregistrer simultanément tous les événements de la gamme radio VLF entre 5 Hz et 24 kHz d'une part, et l'ensemble de l'activité météorique détectable autour du lieu d'observation, d'autre part. La détection des météores est effectuée selon le principe du radar bistatique. Un émetteur VHF (Very High Frequency) lointain est utilisé pour illuminer en altitude les météores incidents et leurs traînes ionisées. Les signaux radio VHF réfléchis sur le plasma créé par les météores lors de leur entrée dans l'atmosphère sont enregistrés au sol grâce à un récepteur prévu à cet effet. Ce système radio "forward scatter" est préféré à l'observation visuelle des météores (Rault, 2007), car il procure, grâce à son extrême sensibilité, de bien

¹ <http://www.imcce.fr/host/reforme/>

plus nombreuses détections de météores qu'avec des observations visuelles ou vidéo. De plus, la détection radio des météores, contrairement aux observations optiques, peut être effectuée 24 heures sur 24, car elle n'est pas sujette à des perturbations dues à la lumière du jour, à la Lune, aux nuages ou au brouillard.

La réduction des données enregistrées consiste à examiner, pour chaque écho VHF reçu indiquant l'arrivée d'une étoile filante, si un quelconque bruit VLF ne survient pas simultanément.

Un tel dépouillement ne peut être automatisé, car on ne dispose d'aucune information a priori sur la signature que pourrait présenter un signal VLF quelconque rayonné par un météore. De plus, la bande VLF est encombrée de multiples signaux naturels et artificiels, et seul un nombre statistiquement significatif de coïncidences peut permettre de statuer sur le rayonnement VLF éventuel de certains météores. Pour mener à bien le dépouillement des données VLF, une bonne connaissance des signaux géophysiques et anthropiques que l'on rencontre habituellement sur cette bande est indispensable, de façon à ne retenir a priori pour les corrélations VLF/VHF que les signaux VLF présentant un caractère inhabituel, et donc susceptibles de provenir des météores.

2.2 Equipement mis en œuvre

Le système d'enregistrement utilisé pour la campagne d'observation des Perséides 2009 (voir Figure 1) comporte essentiellement:

- une chaîne de réception VHF destinée à détecter l'apparition de météores ,
- un capteur ELF/VLF (Extremely Low Frequency/Very Low Frequency)
- un enregistreur numérique à deux voies permettant de stocker simultanément les évènements détectés par les senseurs VHF et ELF/VLF

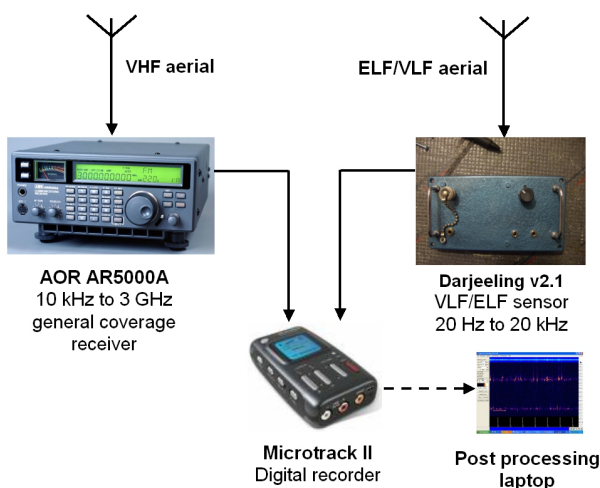


Figure 1. Synoptique du système d'observation

L'emploi d'un PC portable pour stocker les informations et les analyser sur le terrain a été écarté, car la plupart de ces PC rayonnent de nombreux parasites qui brouillent les enregistrements. C'est la raison pour laquelle un enregistreur audio numérique a été préféré. De plus, un enregistreur numérique haute fidélité de type semi professionnel présente des qualités bien supérieures à celles de la carte son d'un PC portable en termes de dynamique, de bruit de fond et de linéarité.

Les données enregistrées sur le terrain sont stockées dans des mémoires de type Compact Flash. Ces données peuvent ainsi être analysées à loisir par la suite sur un PC possédant toute la puissance de calcul nécessaire.

La figure 2 montre l'équipement déployé sur le terrain. L'ensemble de l'électronique est protégé contre les intempéries par un conteneur étanche.

L'ensemble est alimenté par une batterie de voiture 12V offrant une autonomie de fonctionnement d'une cinquantaine d'heures.



Figure 2. Aperçu du système d'observation installé sur le terrain

Le système complet est sujet à des évolutions permanentes. Dans sa version de juin 2009 utilisée pour la campagne des Perséides 2009, il comprenait:

- une antenne VHF (dipôle pour la bande 50 MHz et fouet vertical 5/8^{ème} d'onde pour la bande 143 MHz)
- un récepteur du commerce type AR5000A+ de marque AOR pour la réception des échos VHF sur météores et pour la réception de signaux horaires destinés à dater le début et la fin de chaque enregistrement,
- une antenne cylindrique ELF/VLF conçue spécialement pour la campagne de mesures,

- un récepteur ELF/VLF à hautes performances de conception personnelle,
- un enregistreur audio numérique du commerce de type Microtrack II de marque M-Audio équipé de mémoires Compact Flash de capacité 8 Go,
- une batterie 12 volts d'une capacité de 54 ampères.heures
- un convertisseur 12V/5V utilisé pour augmenter la durée de fonctionnement de l'enregistreur audio déjà alimenté par sa batterie interne,
- quelques accessoires comme une lampe d'éclairage 12V à lampe LED, un casque d'écouteurs et un PC portable pour contrôler la qualité des signaux enregistrés, et une trousse de "survie" comprenant quelques outils indispensables tels qu'un fer à souder 12V.

Pour concevoir et mettre au point le récepteur ELF/VLF prévu pour cette campagne d'observations, les exigences suivantes ont été prises en compte:

- fréquence de coupure basse la plus faible possible,
- grande dynamique,
- taux de distorsion faible,
- grand gain,
- bruit propre faible,
- encombrement et poids réduit,
- consommation électrique réduite,
- coût faible.

Les performances intrinsèques de l'enregistreur Microtrack II (bande passante de 20 Hz à 20 kHz +/- 0.3dB, grande dynamique de 101 dB avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz pour des mots de 24 bits) ont servi de référence pour concevoir la chaîne de réception ELF/VLF.

Les longueurs d'onde à observer s'étalant de 15 à 15000 kilomètres, l'antenne est nécessairement très petite par rapport à ces longueurs d'onde. Une antenne verticale sensible à la composante électrique du champ électromagnétique a été choisie, plus simple à réaliser qu'un cadre sensible lui à la composante magnétique du champ.

Du fait de l'impédance extrêmement élevée présentée par une antenne fouet électriquement très courte, l'impédance d'entrée du récepteur ELF/VLF doit elle-même être très grande. Un étage d'entrée cascade équipé d'un transistor à effet de champ et d'un transistor bipolaire, tous deux à faible bruit a été choisi en raison de ses qualités intrinsèques.

A titre indicatif, le schéma de cet étage d'entrée est représenté en figure 3.

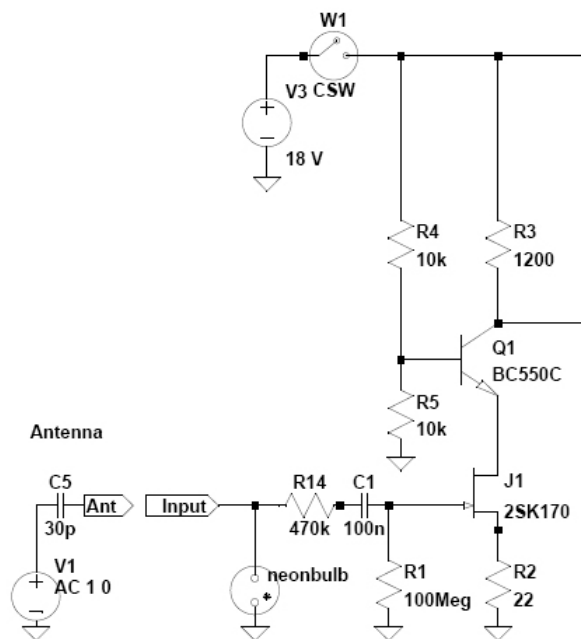


Figure 3. Schéma de l'étage d'entrée du récepteur ELF/VLF

L'étage d'entrée est suivi par des filtres passe-bas de type Butterworth commutables (80 dB d'atténuation par décade) permettant d'éliminer au choix les fréquences supérieures à 4 ou à 10 kHz. Ces filtres sont destinés à atténuer efficacement les émissions VLF puissantes en provenance d'émetteurs de systèmes de navigation russes et d'installations de communications avec les sous-marins nucléaires en plongée.

Une simulation de la bande passante de la chaîne de réception ELF/VLF complète (antenne + récepteur) est représentée en figure 4. Les détails techniques complets relatifs à la construction et à la mise au point du récepteur ELF/VLF sont publiés dans la revue Radio-REF (Rault, 2009).

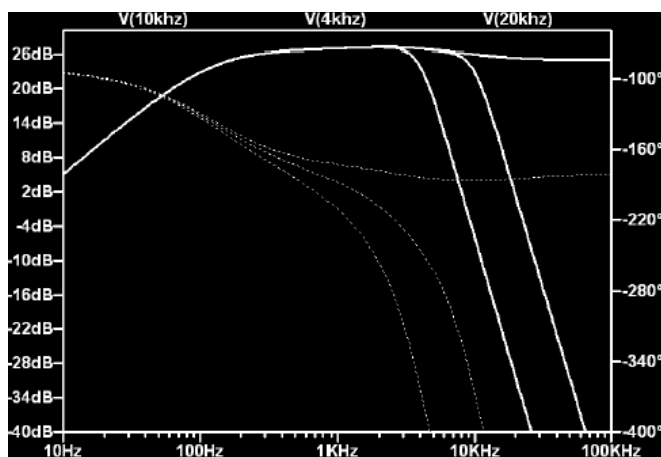


Figure 4. Bande passante du récepteur ELF/VLF

En pratique, la performance globale de la chaîne de réception ELF/VLF complète permet l'enregistrement fidèle et l'étude des signaux de fréquences comprises entre 5 Hz et 24 kHz.

2.3 Choix du lieu d'observation

Le lieu d'observation doit être un emplacement le plus éloigné possible de tous bâtiments, routes et lignes EDF qui rayonnent une foule de parasites et de nombreux harmoniques de la fréquence fondamentale 50 Hz du réseau EDF.

L'endroit doit être éloigné de tout pylône, arbre ou buissons qui atténuent le champ électrique ELF/VLF à observer. Un espace bien dégagé, un bord de côte isolé (bordé de dunes ou de marais) ou une colline dénudée sont des endroits propices, à condition d'être situés à plusieurs kilomètres de toute activité humaine. Ce type d'endroit devient de nos jours de plus en plus difficile à trouver en France métropolitaine: même le plateau du Larzac ou les Causses du Quercy, qui paraissent être des sites favorables à ce type d'observations sont pollués au point de vue radio par les clôtures électriques servant à parquer les moutons !

2.4 Taxonomie sommaire des événements observés

2.4.1 Représentation des événements

Les enregistrements sont dépouillés à l'œil et à l'oreille, en utilisant des logiciels de manipulation/traitement du son tels que Audacity² ou Spectrum Lab³.

Ces logiciels permettent de survoler visuellement et auditivement les enregistrements audio, ce qui permet de localiser les corrélations potentiellement intéressantes entre événements ELF/VLF et pings VHF de météores, puis de les étudier en détail dans le domaine temporel ou fréquentiel (en mode "oscilloscope" pour une représentation temporelle ou en mode "analyse spectrale" pour une représentation du spectre fréquentiel, grâce à une transformée discrète de Fourier rapide).

2.4.2 Signature des échos VHF sur météores

Les météores sont détectés grâce aux réflexions qu'ils provoquent lorsqu'ils sont illuminés par un émetteur lointain qu'on ne peut capter en direct à cause du masquage dû à la courbure de la surface terrestre. Ces échos se produisent soit sur le

plasma qui entoure le météore entrant à très grande vitesse dans l'atmosphère terrestre, soit sur la traînée ionisée que le météore laisse derrière lui. L'écho radio original (à 50 ou 143 MHz, selon l'émetteur choisi) qui est affecté d'un décalage Doppler dû à la grande vitesse du météore ou à la dérive de la traînée entraînée par les vents qui règnent aux hautes altitudes, est translaté par le récepteur VHF vers la bande audible, entre 20 et 20000 Hz, de façon à pouvoir être traité par la carte son d'un PC quelconque.

La figure 5 représente l'analyse spectrale d'un écho sur la tête d'un météore qui se déplace très rapidement.

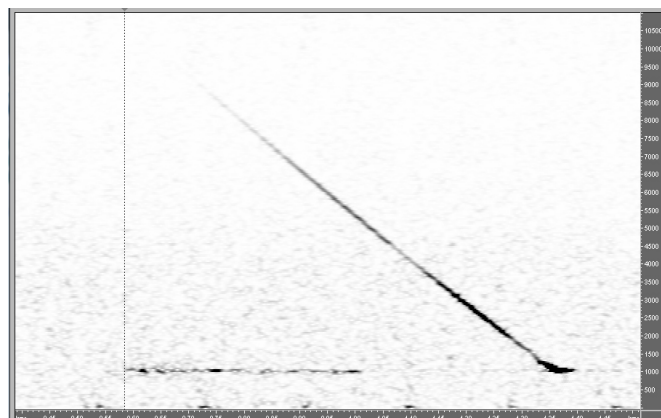


Figure 5. Exemple d'écho sur météore se déplaçant à grande vitesse

La figure 6 représente l'écho du même météore dans le domaine temporel.

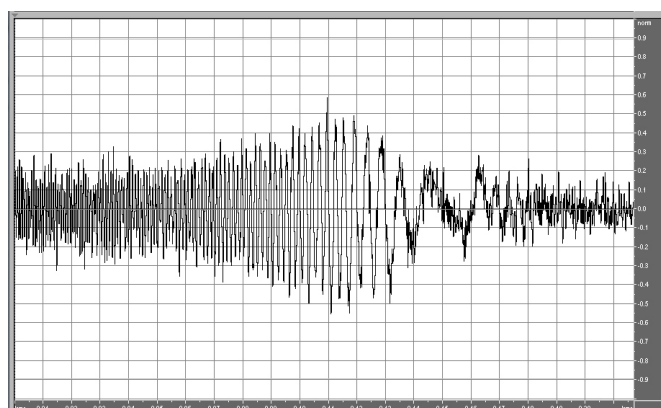


Figure 6. Exemple du même écho représenté dans le domaine temporel.

On voit sur les deux figures que la fréquence diminue très rapidement par suite de l'effet Doppler, à cause de la variation de vitesse radiale du météore par rapport à l'observateur.

La figure 7 représente un écho sur la traînée qui accompagne un météore. Cet écho est étalé selon l'axe des fréquences car il se réfléchit sur une traînée turbulente de météore. De plus, sa forme est incurvée à cause des vents qui

² <http://audacity.sourceforge.net/>

³ <http://freenet-homepage.de/dl4yhf/spectra1>

distordent la forme de la trainée et/ou à cause du champ magnétique terrestre qui a tendance à aligner les ions et les électrons libres du plasma le long de ses lignes de force.

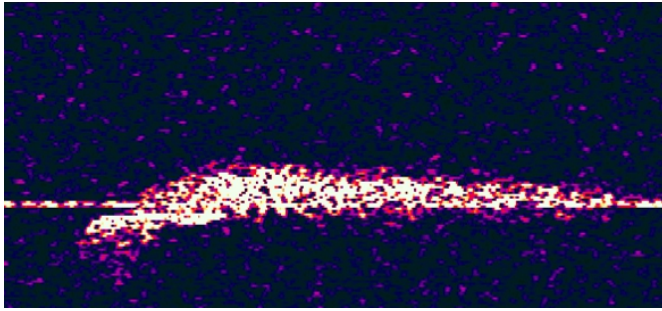


Figure 7. Exemple d'écho sur trainée turbulente de météore

La figure 8 est une analyse spectrale d'un écho complexe comprenant à la fois un écho sur le plasma entourant le météore lui-même, suivi d'un écho sur la trainée ionisée.

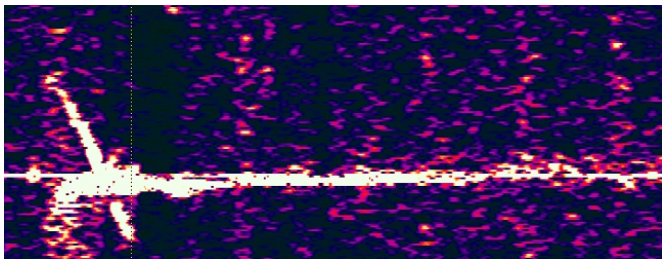


Figure 8. Exemple d'écho sur météore et sur sa trainée.

Un classement sommaire utilisant des symboles typographiques a été adopté pour cette étude, de façon à répertorier les différents types d'échos rencontrés:

\ : écho sur tête de météore

_ : écho sur tête de météore suivi d'un écho sur trainée non turbulente

=_ : écho sur tête de météore suivi d'un écho sur trainée non turbulente, et précédé d'une trainée turbulente

___ : écho sur trainée non turbulente de météore

=== : écho sur trainée turbulente de météore

Div : autres types d'échos

2.4.3 Signatures des événements VLF

Le spectre électromagnétique compris entre 5 Hz et 24 kHz est envahi de nombreux signaux naturels et artificiels. Parmi les signaux naturels, on distingue les "sferics", les "tweeks" et les sifflements qui sont tous des signaux ELF/VLF créés par les éclairs d'orages du monde entier. Selon leur type de propagation (propagation dans le guide d'onde constitué par la cavité Terre/ionosphère, ou encore via la magnétosphère, c'est-à-dire le long d'une ligne de champ magnétique terrestre), les signaux affectent des formes différentes (voir figures 9 à 11).

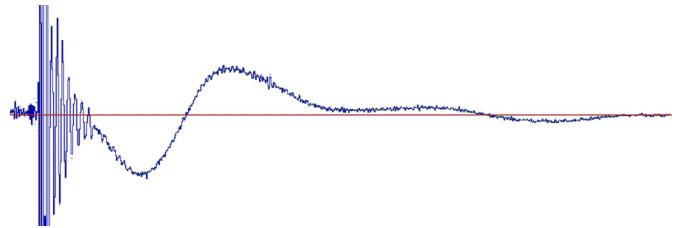


Figure 9. Décharge orageuse lointaine propagée en mode QTEM (quasi transverse magnétique électrique) dans le guide d'onde Terre/ionosphère

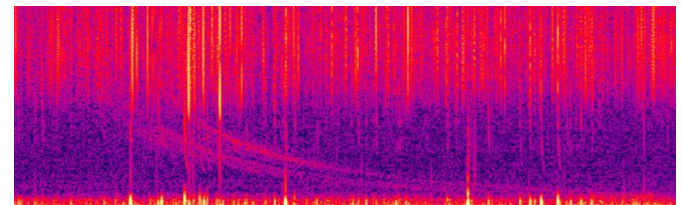


Figure 10. Sifflement dû à la propagation d'une décharge orageuse à front raide dans le milieu dispersif du plasma de la magnétosphère (domaine fréquentiel)



Figure 11. Rafale de décharges au sein d'un éclair d'orage relativement proche (domaine temporel)

Les événements ELF/VLF observés ont été classés en 5 familles, comme suit:

ELF : événement extrêmement basse fréquence

VLF : train d'événements très basse fréquence

Pic : événement à front raide

Tweek : évènement bref à spectre étalé
Div. : autres types d'évènements

3. Résultats de la campagne Perséides 2009

Plus de 20 heures d'enregistrements stéréo VHF et ELF/VLF (soit plus de 20 Go de données codées au format wav en 24 bits et échantillonnées à 48 kHz) ont été effectuées le 6 août 2009 en Bretagne avant les Perséides puis les 11 et 12 août en Corrèze pendant les pics des Perséides.

10 h et 10 mn d'enregistrements du 12 août ont été dépouillés en détail pendant les pics des Perséides survenus autour de 8 h TUC et de 18h TUC. Le troisième pic d'activité du 13 août vers 6h TUC n'a pas été enregistré.

500 météores ont été identifiés pendant ces 610 minutes d'observation. L'émetteur utilisé pour les détections était le radar militaire GRAVES situé près de Dijon. La figure 12 indique l'emplacement de l'émetteur employé et ceux des deux sites d'observation.

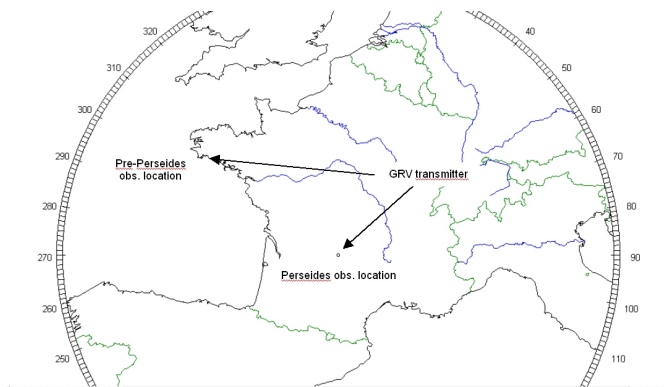


Figure 12. Sites d'observation des Perséides 2009 et emplacement du radar militaire GRAVES

Sur ces 500 météores analysés, 174 étaient accompagnés d'un évènement ELF/VLF, ce qui donne 34% de météores potentiellement électrophoniques.

Le plus grand soin a été apporté lors du processus conduisant à décider qu'un évènement ELF/VLF était réellement lié à un météore particulier. Les critères de sélection ont été les suivants :

- temps séparant l'apparition d'un météore d'un évènement ELF/VLF inférieur ou égal à 300 mS,
- signature de l'évènement ELF/VLF n'entrant dans aucune des catégories de signaux déjà connus et habituellement rencontrés dans cette gamme de fréquences.

Les tables 1 et 2 donnent le détail des échos de météores classés selon leur signature et le

classement par type des évènements ELF/VLF corrélés avec ces météores.

Fichier	\	_	=_	----	====	Div.	Tot.
n° 40	6	15	0	13	2	2	38
n° 42	4	14	0	9	7	3	37
n° 68b	8	12	0	10	3	5	38
n° 69b	131	37	0	21	5	28	222
n° 78	34	4	2	26	1	33	100
n° 79	4	1	1	2	2	5	15
n° 80	5	3	7	1	2	5	23
n° 81	10	2	2	2	5	6	27
Total	202	88	12	84	27	87	500

Table 1. Classement des échos de météore par type

Fichier	ELF	VLF	Pic	Tweek	Misc	Total
n° 40	7	1	12	1	1	22
n° 42	7	3	11	0	3	24
n° 68b	2	0	11	2	7	22
n° 69b	9	5	24	0	11	49
n° 78	5	2	4	0	13	24
n° 79	1	0	6	0	2	9
n° 80	1	0	6	0	4	11
n° 81	2	0	8	0	3	13
Total	34	11	82	3	44	174

Table 2. Classement des évènements ELF/VLF par type

Les figures 13 à 18 donnent quelques exemples remarquables de coïncidence entre l'apparition d'une étoile filante et d'un évènement ELF/VLF associé.

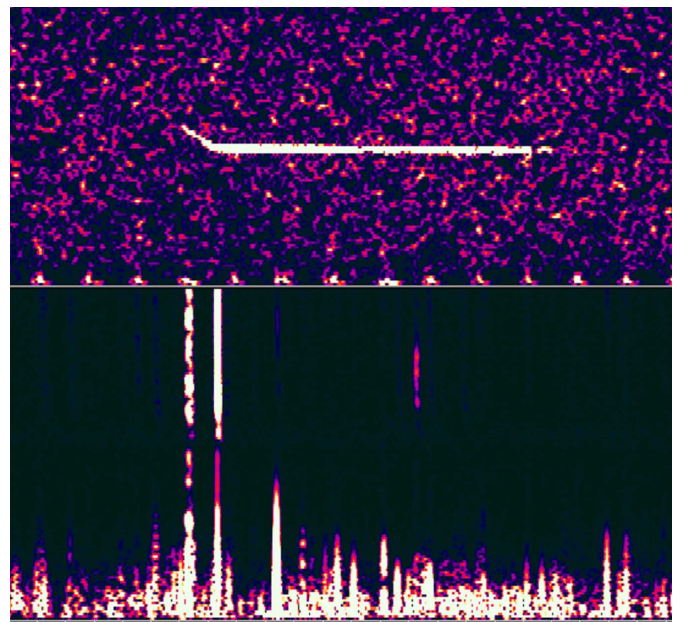


Figure 13. Pics VLF (canal du bas) apparaissant lors de l'écho sur un météore en mouvement (canal du haut) vus dans le domaine fréquentiel

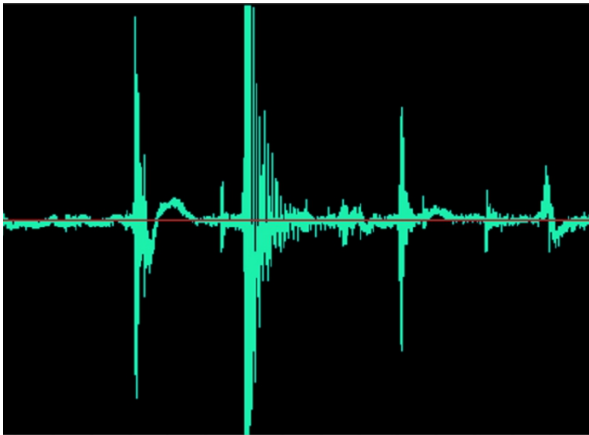


Figure 14. Aspect des pics VLF de la figure 13 visualisés dans le domaine temporel



Figure 18. Représentation temporelle de la rafale de pics VLF de la figure 17

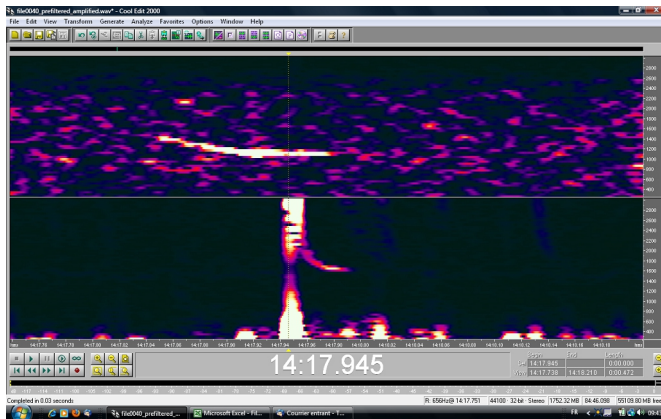


Figure 15. Aperçu dans le domaine fréquentiel d'un tweek VLF (canal du bas) survenant un même qu'un météore (canal du haut)

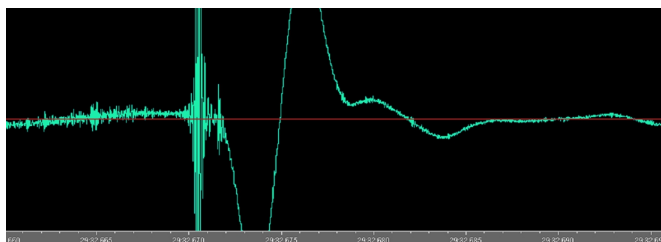


Figure 16. Pic très basse fréquence et de très grande amplitude survenant au moment même de l'apparition d'un météore (représenté dans le domaine temporel)

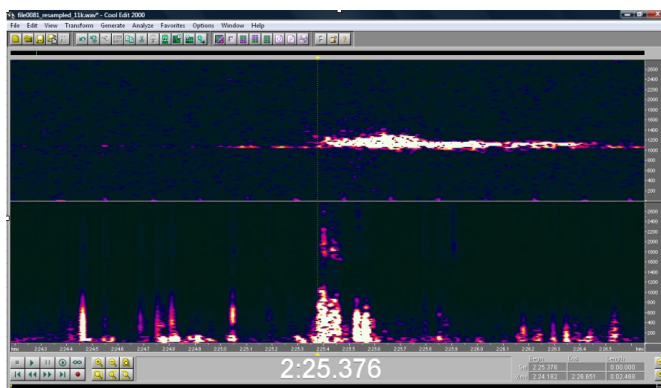


Figure 17. Rafale de pics VLF (canal du bas) survenant au début de la traînée turbulente d'un météore (canal du haut)

4. Discussion

Rechercher des corrélations entre l'apparition de météores et des évènements ELF/VLF est un travail qui demande beaucoup de discernement. Au début de cette étude, il était envisagé d'utiliser une approche purement statistique. A cet effet, un fichier contenant 100 météores a été analysé, qui présentait 24 corrélations avec des évènements ELF/VLF survenant à moins de 500 mS de l'apparition de chaque météores, soit 24% de corrélations constatées.

Si l'on prend en compte l'ensemble des évènements ELF/VLF de ce fichier, soit 2880 évènements, le taux de coïncidences fortuites (sans relation de cause à effet entre météores et évènements basse fréquence) s'établit à 42 %. On voit donc que l'approche purement statistique n'est pas significative. Cela s'explique par le fait que les 2880 évènements représentent la totalité des signaux détectés en ELF/VLF.

Le taux de 24%, lui, ne prend en compte des évènements ELF/VLF corrélés temporellement avec des météores et qui montrent des signatures originales, différentes de celles qu'on rencontre habituellement avec les parasites industriels ou les phénomènes naturels orageux par exemple.

5. Conclusion

Les différentes théories qui prédisent que certains météores seraient capables de rayonner de l'énergie électromagnétique basse fréquence n'étaient jusqu'à présent confortées que par de très rares données concrètes observées et enregistrées avec des capteurs adéquats. Ces enregistrements ne sont pas statistiquement significatifs, du fait du peu de corrélations effectivement enregistrées jusqu'à présent.

Le présent travail apporte, grâce aux quantités importantes de météores observés et de corrélations constatées, une indication très encourageante sur le fait que les météores rayonnent effectivement dans le domaine radioélectrique.

D'autres campagnes d'observation sont prévues à l'occasion des prochaines pluies d'étoiles filantes (Léonides en novembre 2009 notamment), dans le but de conforter les premiers résultats obtenus par cette étude et d'affiner les caractéristiques détaillées des signatures des événements ELF/VLF associés à des météores.

Références

- Avan Paul (2008). Laboratoire de Biophysique, Faculté de Médecine de Clermont-Ferrand. Correspondance privée.
- Beech M., Brown P., Jones J. (1995). "VLF detection of fireballs". *Earth Moon and Planets* 68: 181–188.
- Beech M., Foschini L. (1999). "A space charge model for electrophonic bursters". *Astron. Astrophys.* 345, L27-L31
- Chakrabarti S.K., Pal S., Acharya K., Mandal S., Chakrabarti S., Khan R., Bose B. (2002). "VLF observation during Leonid Meteor Shower-2002 from Kolkata". *Indian Journal of Physics* 2002,76B, 693.
- Cummer S.A. (1997). "Lightning and remote ionospheric sensing using VLF/ELF radio atmospheric". Stanford University thesis.
- Delcourt J.J. (2003). "Ionosphère : région D, sondage passif et propagation des signaux LF et VLF". Hermes Science Publications. ISBN 978-2746206564
- Drobnock G.J. (2001). "Meteors producing VLF signatures independent from producing electrophonic sounds". *WGN* 29:1, 45-50.
- Drobnock G.J. (2002). "VLF signatures from non-fireball meteors – Observations from the 2001 Leonid shower". *WGN* 30:5, 152-156.
- Gauthier Fabien (2009). Correspondance privée.
- Garaj S., Vinković D., Zgrablić G., Kovačić D., Gradečak S., Biliškov N., Grbac N., Andreić Ž., (2000). "Observational detection of meteor-produced VLF electromagnetic radiation". *Fizika A (Zagreb)* 8 (1999) 3, 91-98
- Guha A., De B.K., Roy R., (2008), "Possible detection of GEMINID 2007 meteor shower during day-time from VLF Radiation Spectra". *Earth Moon and Planets*, april 2009.
- Keay C.S.L., (1980). "Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs". *Science* 210, 11-15
- Keay C.S.L., (1991). "Meteor fireball sounds identified". *Asteroids, Comets, Meteors* 1991, 297-30
- Keay C.S.L., (1994). "Audible fireballs and geophysical electrophonics". *Proceedings ASA* 1994, 11 (1) 12-15.
- Ol'khovатов (1998). "Letter to the Editor". *Meteorite!* Nov. 1998.
- Price C., Blum M. (2000). "ELF/VLF radiation produced by the 1999 Leonids meteors". *Earth Moon and Planets* 82–83: 545–554.
- Rault J.L. (2003). "A la découverte des fréquences basses". *Radio-REF*, january and march 2003.
- Rault J.L. (2005). "Lightning scatter: a faint and rare mode of propagation". *VHF Communications* 2/2005
- Rault J.L. (2007). "Radio observation of meteors – Leonids as an example". *Observations & Travaux*, vol. 65, 1-8.
- Rault J.L. (2009). "Searching for meteor ELF /VLF signatures". *WGN*. A paraître.
- Rault J.L. (2009). "A la découverte des fréquences très basses". *Radio-REF* A paraître.
- Trautner R., Koschny D., Witasse O., Zender J., Knöfel A. (2002) "ULF-VLF electric field measurements during the 2001 Leonid storm". *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors - ACM* 2002, 161-164.
- Vinković D., Garaj, S., Lim P.L., Kovačić D., Zgrablić G., Andreić Ž. (2002). "Global electrophonic fireball survey: a review of witness reports – I". *WGN* 30:6, 244-257.