

Système de détection de météores et d'aéronefs

Cédric Willemin (*cedric@willemin.li*)

Dans le cadre de son travail de maturité gymnasiale, Cédric (18) a réalisé un détecteur de météores et d'aéronefs par radar bistatique. Celui-ci a été qualifié pour la finale du concours Science et Jeunesse (Schweizer Jugend forscht) qui s'est déroulé à Bienne du 23 au 25 avril 2020. Là il a reçu le prix Prix spécial Aldo e Cele Daccò pour ce travail avec le prédicat "excellent". Pour cette raison il pourra prendre part au concours international (EUCYS) qui devrait se dérouler en Espagne, à Salamanque. Cédric Willemin a démontré qu'il est possible de détourner l'existence d'instrumentations sophistiquées pour les mettre au service de ses projets scientifiques. Les militaires français opèrent la source radio GRAVES pour espionner les satellites. Ces ondes radio peuvent être réfléchies par différents objets de notre environnement. En construisant un système de réception, Cédric a pu démontrer cette technique pour observer des avions, des trains, des satellites mais surtout des météores. Il a découvert plusieurs milliers de météores, en particulier de l'essaim des Perséides.



Fig. 1: Emetteurs du radar GRAVES, situé entre Dijon et Vesoul; Fréquence d'émission à 143.05 MHz.

Introduction

Le radar militaire français GRAVES (**G**rand **R**éseau **A**dapté à la **V**eille **S**patiale) émet des ondes électromagnétiques en permanence sur la fréquence de 143.05 MHz. Les antennes émettrices du réseau GRAVES sont situées entre Dijon et Vesoul, dans le département français de Haute-Saône (Fig. 1). Les ondes générées par le radar sont réfléchies par tout

objet électriquement conducteur, comme par exemple des satellites ou des avions. Le signal réémis par l'objet est réceptionné par un réseau composé d'une centaine d'antennes, situé sur le plateau d'Albion.

La détection de météores et d'aéronefs est réalisée selon le même principe. L'antenne émettrice est celle du radar GRAVES et la réception est

effectuée au moyen d'une antenne Ground-Plane $\frac{3}{4}\lambda$ (Fig. 2), placée sur la toiture de la halle de gymnastique du Gymnase de la rue des Alpes à Bienne. Un tel système est communément qualifié de radar bistatique, car l'émetteur TX est significativement éloigné géographiquement du récepteur RX (Fig. 3).

Si l'objet est en mouvement, l'onde réfléchi verra sa fréquence augmenter ou diminuer en fonction de sa vitesse radiale par rapport au radar, mais aussi par rapport au mouvement de l'observateur. Ce phénomène de décalage de fréquence est connu sous la dénomination d'effet Doppler-Fizeau.

$$\Delta f = f_{TX} - f_{RX}$$

où f_{TX} est la fréquence émise par le radar et f_{RX} la fréquence captée par l'antenne. Les objets qui réfléchissent l'onde se déplacent à une vitesse relativement élevée dans le cas d'un météore et bien plus faible



Fig 2: Système de réception placé sur le toit de la Halle de gymnastique du Gymnase des Alpes à Bienne. Un préamplificateur est placé directement sur le mât de l'antenne pour gagner en qualité de signal.

s'il s'agit d'avions. En ayant connaissance de la trajectoire du météore, il est possible dès lors de localiser son éventuel point d'impact sur notre planète.

$$\Delta f = \frac{2f_{TX} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{c} \cdot \cos \delta \cdot \|\vec{v}\|$$

La constante c correspond à la vitesse de la lumière, soit environ: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. L'angle bistatique β n'est pas connu mais peut être estimé; sa valeur étant relativement faible lorsque le signal provient d'un météore ou d'un satellite et est plus élevé pour un avion.

Malheureusement, la vitesse v et la position de l'objet ne peuvent pas être définies avec une seule station de réception, car l'angle δ (Fig. 3) est inconnu. Mais il est néanmoins possible de définir la projection de la vitesse sur l'angle bistatique w .

$$\|\vec{w}\| = \cos \delta \cdot \|\vec{v}\|$$

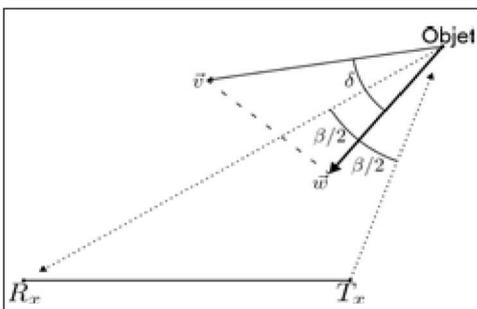


Fig. 3: Représentation géométrique du radar bistatique. L'émetteur est éloigné du récepteur. L'angle β correspond à l'angle bistatique.

Dans les années 1940, une expérience similaire avait déjà été réalisée. Par contre, la technologie de l'époque ne permettait pas d'atteindre les résultats actuels. Le but d'alors était d'écouter l'écho des météores sous forme sonore. Les fichiers audio étaient enregistrés sur des bandes magnétiques, technologie totalement obsolète de nos jours.

Acquisition des données

Un météoroïde (terme désignant un météore lorsqu'il est encore dans l'espace) pénètre dans la mé-

sosphère, couche de l'atmosphère située à une centaine de kilomètres d'altitude, à une vitesse hypersonique. L'onde incidente est réfléchiée par la traînée d'ionisation formée par le météore lors de sa chute dans l'atmosphère (Fig. 4). L'onde émise par le radar est également réfléchiée par des satellites, avions et autres objets conducteurs.

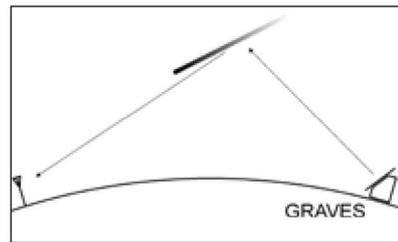


Fig. 4: L'onde n'est pas réfléchiée par le météore lui-même, mais par sa traînée.

L'onde réfléchiée est captée par le système de réception via l'antenne Ground-Plan $\frac{3}{4}\lambda$. Un préamplificateur et un filtre passe-bande ont été insérés pour offrir plus de sensibilité et de sélectivité (Fig. 5). Le signal est ensuite transmis à un récepteur USB type Funcube Dongle PRO+.

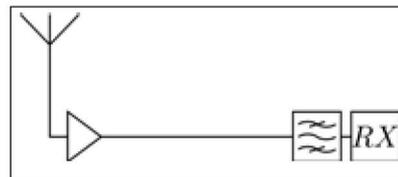


Fig. 5: Schéma bloc du système de réception placé sur le toit de la Halle de gymnastique du Gymnase des Alpes de Bienne.

Le logiciel informatique Spectrum Lab V2 permet une visualisation de type chute d'eau (Waterfall) de ce signal; c'est-à-dire le défilement du temps en ordonnée et le décalage Doppler en abscisse. Les valeurs d'abscisse positives correspondent à une augmentation de fréquence par rapport à la fréquence nominale, alors que les valeurs négatives indiquent une fréquence captée inférieure à celle d'émission du radar (Fig. 6). Le software présente de nombreux paramètres, comme par exemple la sensibilité de la réception.

- Si le décalage en fréquence est grand et sa durée faible, alors il s'agit d'un objet ayant une vitesse très élevée, comme par exemple un météore.
- Si le décalage est grand et sa durée longue, l'objet se déplace à une vitesse relativement importante. Il s'agit vraisemblablement d'un satellite.
- Si le décalage est faible et la durée longue, alors l'objet se déplace à une basse vitesse comme par exemple celle d'un avion.

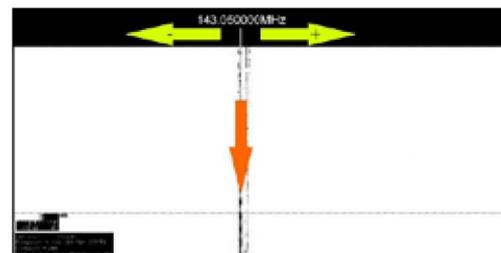


Fig. 6: Les signaux sont représentés sur un modèle de type Waterfall. Le décalage en fréquence se mesure en abscisse (flèches jaunes) et le temps s'écoule en ordonnée (flèche orange).

Résultats

Avions: Il est facile de les reconnaître, car leur vitesse de croisière et donc l'effet Doppler engendré par celle-ci est relativement faible. De plus, ils sont très nombreux.

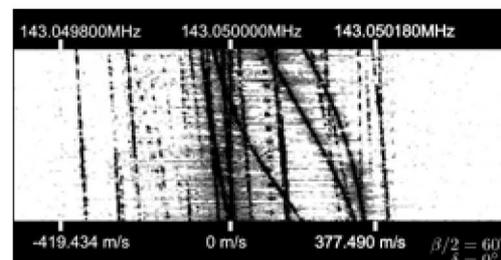


Fig. 7: Signature des avions, leurs décalages en fréquence est relativement faible.

Météores:

Beaucoup de météores pénètrent dans l'atmosphère et une grande partie d'entre eux se consomment intégralement quasiment instantanément. Contrairement aux aéronefs, le météore présente de très fortes variations Doppler sur une très brève durée.

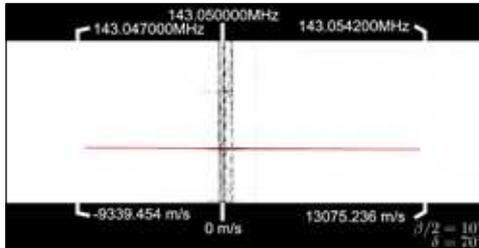


Fig. 8: Signature d'un météore, le décalage Doppler est bien plus important que pour celui d'un avion.

Pluies d'étoiles filantes:

Il est intéressant de compter le nombre de météores détectés lors d'une période durant laquelle une pluie d'étoiles filantes est attendue, comme par exemple lors des Perséides ou lors des Aquarides (Fig. 9). Le nombre de détection de météores s'élève à plusieurs dizaines par heures en période de «pluies d'étoiles filantes», contre de l'ordre d'une dizaine par heure en période normale.

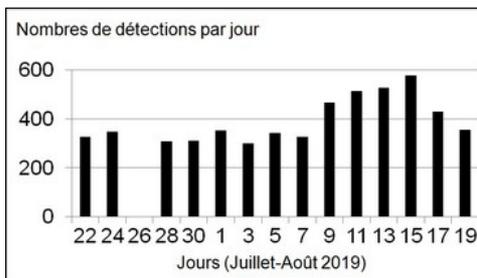


Fig. 9: Nombre de météores détectés journalièrement durant les Perséides avec cette instrumentation. Le nombre de météores augmente lors du pic d'activité (11-15 août) à environ 30 détections par heure.

Satellites:

La position et l'instant de passage de certains satellites comme par exemple l'ISS (Station Spatiale Internationale) sont des données accessibles au public. Il est possible d'affirmer avec certitude qu'il s'agit de satellites, car leur vitesse est par exemple d'environ 24'000 km/h, est plus élevée que des avions, mais bien plus faible que celle des météores.

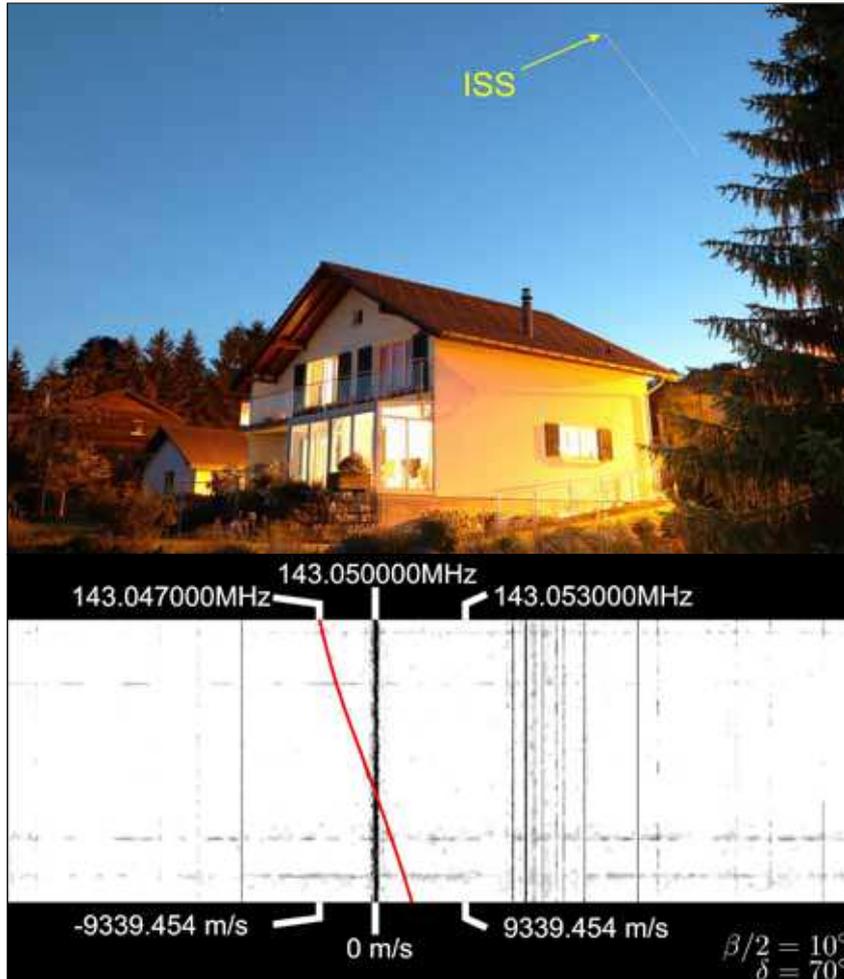


Fig. 10: Deux illustrations de l'ISS enregistrées simultanément: optiquement (photographie) et par détection radar bistatique.

Conclusions

Le système de détection basé sur le modèle du radar bistatique est opérationnel par tous les temps, de jour comme de nuit. La plausibilité des résultats a été vérifiée de différentes façons, comme la détection du passage de la Station Spatiale Internationale (ISS) ou les pluies d'étoiles filantes des Perséides.

L'installation de ce système relativement simple ne nécessite aucune licence de radioamateur, ni d'autorisation particulière.

Pour approfondir les résultats, il serait possible d'opérer par triangulation sur plusieurs sites, permettant ainsi de quantifier raisonnablement la vitesse des objets détectés. Avis aux radioamateurs !

Remerciements

- Club de radioamateurs HB9XC; USKA Section Pierre-Pertuis
- Gymnase français de Bienne

Littérature

- <https://f6crp.pagesperso-orange.fr/ba/graves.htm>
- <http://www.astrosurf.com/luxorion/meteores-anomalies.htm>
- Olivier Pilloud (HB9CEM), 2018; "Le Radioamateur", Editions TECHNIP, ISBN 978-2-7108-1184-8
- https://www.willemin.li/cedric/utiles/Detection_meteores_aeronefs_191022.pdf