

ASTRONOMIE AMATEUR

FRIPON et Vigie-Ciel

Radio astronomie et chasse aux météorites

Jean-Louis Rault, président de la commission radioastronomie de la Société Astronomique de France, directeur de la commission radio de l'International Meteor Organization

L'étude de notre Système solaire est facilitée par l'observation des météores et la recherche au sol de météorites. Les projets FRIPON et Vigie-Ciel de l'Observatoire de Paris et du Muséum National d'Histoire Naturelle sont succinctement décrits ici, et des travaux pratiques de détection radio des météores vous sont proposés.

Météoroïdes, météores et météorites

Avec les programmes FRIPON (Fireball Recovery and Interplanetary Observation Network) et Vigie-Ciel¹, des astronomes de l'Observatoire de Paris et des cosmochimistes du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) étudient la formation et l'évolution de notre Système solaire. Les météoroïdes (poussières ou petits corps rocheux ou métalliques souvent issus d'astéroïdes ou de comètes) qui gravitent dans l'espace autour du Soleil sont appelés météores lorsqu'ils deviennent lumineux dans le ciel en s'échauffant par frottement à plusieurs milliers de degrés Celsius lors de leur entrée à très haute vitesse (de 11 à 72 km/s) dans l'atmosphère terrestre. Les objets assez solides et assez gros pour résister à leur traversée dans l'atmosphère et pour tomber au sol sont appelés météorites.

Au XIX^e siècle, 46 nouvelles météorites ont été découvertes en France, alors qu'au XX^e siècle, on n'en dénombrait plus que 13, tout simplement parce que les modes de vie ont changé, et non pas parce qu'il tombait moins d'étoiles filantes sur Terre ! C'est ce constat qui a incité l'Observatoire de Paris et le MNHN à lancer les programmes de recherche FRIPON et Vigie-Ciel.

Le réseau FRIPON

Pour observer les étoiles filantes, calculer leurs orbites (afin de connaître leurs corps-parents) et déterminer avec la meilleure précision possible leur point de chute, l'Observatoire de Paris a déployé un réseau d'une centaine de caméras sur tout le territoire français. FRIPON-Europe a vu le jour récemment, et le réseau s'étend dorénavant aux Pays-Bas, à la Belgique, au Royaume-Uni, à l'Autriche, à l'Allemagne, à l'Espagne, à l'Italie, etc.

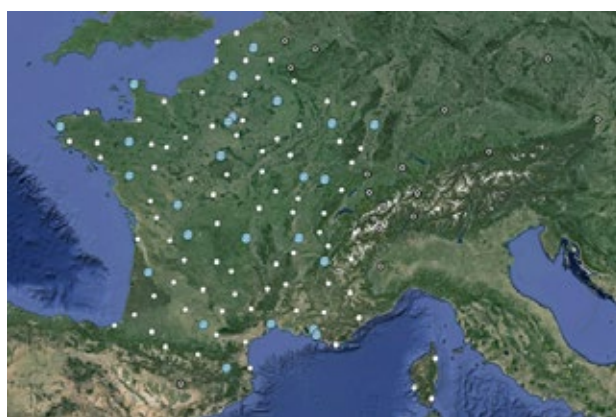


Fig.1. Répartition du réseau de caméras FRIPON sur le territoire français et dans les pays limitrophes.

Chaque caméra observe toute la voûte céleste sur 360°, de jour comme de nuit, grâce à un objectif grand-angle, dit « fish-eye ». Les images prises à 30 vues par seconde sont analysées en temps réel par un petit ordinateur associé à chaque caméra, ordinateur qui détecte toutes les cibles en mouvement. Tout objet se déplaçant à moins de 7 km/s (avion, satellite artificiel, chauve-souris, oiseau, insecte, etc.) n'est pas pris en compte. En cas de détection d'un objet rapide, une alerte est envoyée par Internet à un serveur central situé au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), et les vidéos sont téléchargées pour stockage et analyse. Le fait qu'un objet soit observé en même temps par plusieurs caméras distantes de 100 km ou plus est un bon indice qu'une étoile filante a effectivement été observée. Un calcul d'orbite et de zone de chute peut alors être lancé qui, outre les données vidéo, prend en compte les vents en altitude mesurés par Météo-France qui risquent de dévier la chute du météore.

¹ <https://www.fripon.org/>
<https://www.vigie-ciel.org/>

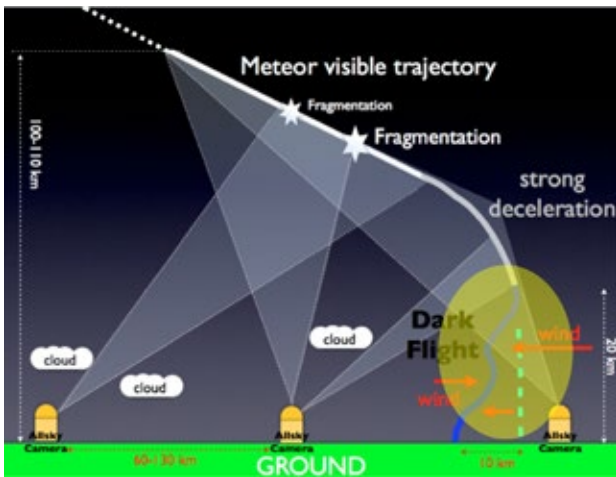


Fig 2. Triangulation d'une cible avec plusieurs caméras.

Le réseau de caméras permet de déterminer avec une bonne précision les données concernant la trajectoire des bolides dans l'atmosphère, mais leur vitesse n'est pas déterminée avec précision, ce qui risque d'induire de grosses erreurs sur les calculs d'orbites autour du Soleil. C'est la raison pour laquelle un réseau de 25 récepteurs radio a été ajouté à la centaine de caméras.



Fig.3. Répartition des récepteurs radio associés à certaines caméras FRIPON. En jaune : zone de couverture théorique optimale de détection radio des météores par le radar GRAVES.

Ces récepteurs fonctionnent en « mode radar multistatique » : le radar GRAVES de l'Armée de l'Air (situé près de Dijon), destiné à la détection des satellites, émet en continu à une fréquence d'environ 140 MHz. Les échos de ses émissions sur le plasma accompagnant les météores sont reçus par les récepteurs FRIPON (voir la figure 6). En cas de détection d'une étoile filante par plusieurs caméras, les enregistrements radio correspondants sont envoyés vers le serveur central du LAM. L'analyse spectrale de ces enregistrements permet de mesurer les décalages Doppler-Fizeau de ces échos, décalages

dus à la vitesse de déplacement des cibles². On peut donc, grâce à plusieurs récepteurs, mesurer avec une précision de quelques dizaines de mètres par seconde la vitesse absolue³ des météores.

Le projet Vigie-Ciel

Vigie-Ciel, qui comporte une forte composante de sciences participatives, est un projet associé à FRIPON. Ses vocations premières sont de proposer à un vaste public (novice ou amateur d'astronomie) d'observer les étoiles filantes, d'envoyer des rapports d'observation et de participer à des campagnes de recherche de météorites sur le terrain. Un réseau de correspondants Vigie-Ciel régionaux a été mis sur pied. Une vingtaine de mallettes pédagogiques sont mises à disposition des écoles, des clubs d'astronomie, etc., par le MNHN. Ces mallettes comportent des fiches d'explications, des expériences pédagogiques, des météorites variées et différents matériels de mesure (boîte à lumière polarisée pour examiner des tranches minces de minéraux, instrument de mesure de la perméabilité magnétique d'échantillons de roches).



Fig.4. Mallettes pédagogiques du MNHN.

Des campagnes d'entraînement à la recherche de météorites sont régulièrement organisées sur le terrain avec l'aide de clubs d'astronomie.



Fig.5. Recherche (sans succès !) d'une météorite tombée en forêt de Chambord. Les hautes fougères n'ont pas facilité la tâche...

² NDLR : voir CC n° 161 (mars 2018).

³ Vitesse mesurée dans un repère terrestre ici.

Zoom sur le système radio FRIPON

Et si vous observiez vous-même les météores en radio ? Le cahier des charges du système d'observation radio FRIPON a été conçu avec les objectifs principaux suivants : simplicité de mise en œuvre, efficacité, coût raisonnable.

De tels systèmes ont déjà été mis en œuvre avec succès dans le cadre des Olympiades de la Physique (Lycée André Maurois de Deauville) et de plusieurs Travaux Personnels Encadrés (par exemple avec des élèves d'un lycée de Strasbourg).

Pour observer les météores en radio, on utilise le phénomène physique suivant: les ondes radio-électriques sont réfléchies par les électrons libres du plasma entourant le météore en mouvement, et par les électrons libres de la traînée ionisée qui suit le météore (figure 6). Le plasma (ions + électrons libres + molécules et atomes neutres de l'atmosphère et du météore) est produit par le frottement intense et la chaleur résultants de l'entrée hypervélocité du météore dans l'atmosphère. En observant le météore sous différents angles avec des récepteurs radio espacés, on peut déterminer avec précision la vitesse absolue du météore observé. La figure 7 montre un exemple de spectrogramme obtenu.

Une station d'observation radio se compose essentiellement des éléments suivants :

- une antenne Yagi 4 éléments ou une antenne verticale colinéaire⁴ ;
- un récepteur numérique FunCube Pro⁵ ;
- un câble coaxial 50 ohms de longueur inférieure à 20 m ;
- un PC sous Windows 7 ou Windows 10 équipé d'un écran couleurs et de haut-parleurs ;
- un disque dur externe de 1 ou 2 To pour stocker les données brutes ;
- une suite de logiciels dédiés.

L'antenne est à placer sur un toit bien dégagé, et éloignée de tout obstacle (mâts, murs, câbles électriques, etc.). Si l'antenne choisie est de type directionnelle (antenne Yagi), il faut l'orienter en direction de Dijon. Le câble coaxial qui relie l'antenne au récepteur (qui est connecté directement au PC par une prise USB) doit être le plus court possible, pour ne pas atténuer les signaux reçus (longueur maximale : 20 m environ).

⁴ Voir par exemple modèle X-200N sur www.wimo.com/omnidirectional-vhf-antennas-diamond_e.html et modèle WY204 sur http://www.wimo.com/yagi-antennas-wimo_e.html#wimoyagi

⁵ https://funcubedongle.3dcartstores.com/checkout_one.asp

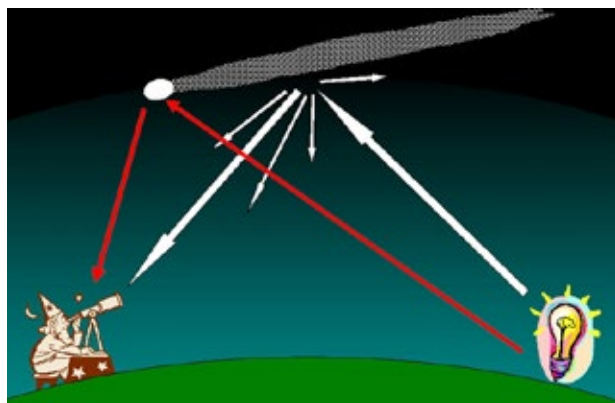


Fig.6. À droite, l'émetteur du radar GRAVES illumine le ciel. À gauche, l'observateur reçoit un écho de l'émission réfléchie sur la traînée ionisée du météore, et un écho réfléchi sur le plasma entourant l'objet.

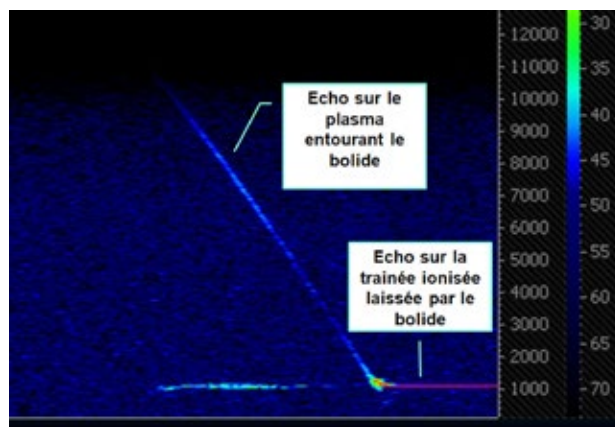


Fig.7. Sur ce spectrogramme d'un écho sur météore, on distingue une raie spectrale inclinée correspondant à la variation rapide de fréquence due au corps en mouvement. L'axe des abscisses représente le temps qui s'écoule, et l'axe des ordonnées les fréquences analysées. Une palette de couleurs (du noir au rouge) indique les intensités des signaux analysés. Quand le météoroïde s'approche, le décalage Doppler se fait vers les courtes longueurs d'onde donc du côté des hautes fréquences. La fréquence reçue est donc supérieure à la fréquence d'émission. Au cours de sa chute, la vitesse radiale diminue et la fréquence reçue se rapproche de la fréquence d'émission. La raie horizontale est due à l'écho sur la traînée ionisée. La fréquence de cette raie horizontale est affectée par les dérives éventuelles de la traînée ionisée réfléchissante, traînée qui peut dériver au gré des vents zonaux et méridionaux qui peuvent souffler à très haute altitude.



Fig.8. Une des 4 antennes d'émission du radar GRAVES utilisée par FRIPON.

Pour ne pas surcharger cet article avec une foule de détails techniques concernant l'installation et la mise en œuvre du matériel et des logiciels, nous renvoyons le lecteur sur un site de stockage Google Drive⁶ qui contient un manuel d'installation complet et tous les logiciels (gratuits) indispensables au système d'observation radio.

Ce système permet d'observer en temps réel les météores sporadiques (plusieurs dizaines par heure) et les météores appartenant aux essaims qui réapparaissent chaque année à dates fixes⁷ (plusieurs centaines par heure), comme les Perséides au mois d'août ou les Géminides au mois de décembre. À des fins d'études, le système permet de rejouer des enregistrements stockés sur disque dur externe, ou de les envoyer à l'Observatoire de Paris, puisque les enregistrements sont produits dans un format directement utilisable par l'équipe FRIPON.

Les analyses spectrales effectuées permettent non seulement de visualiser, d'entendre et de compter les météores détectés, mais également d'évaluer les vitesses radiales des cibles observées (météores bien sûr, mais aussi avions et station spatiale ISS qui réfléchissent également très bien les ondes radio VHF). En analysant finement les échos reçus, on peut également constater que les traînées ionisées des météores sont déformées par les vents qui règnent en haute altitude (vents zonaux et méridionaux vers 80 km d'altitude).

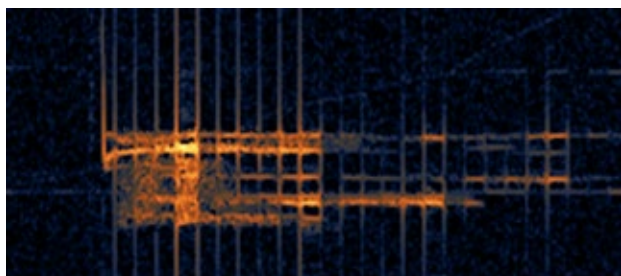


Fig.9. Exemple d'écho distordu sur une traînée de météore déformée par les vents en altitude. Axe horizontal : temps qui s'écoule, axe vertical : fréquences décalées par effet Doppler-Fizeau.

Il arrive également que de débris spatiaux se consumant dans l'atmosphère soient détectés par les récepteurs radio FRIPON. Le 25 mars 2018 par exemple, de nombreux observateurs visuels du Sud de la France et d'Italie signalaient l'apparition d'un bolide au-dessus de la Méditerranée. L'analyse spectrale des signaux reçus par les stations radio de Brest, puis Talence, Caen, Narbonne, Bruxelles, Toulouse, Gramat, Sutrieu, Lille et Marseille (voir

6 https://drive.google.com/open?id=1clUffkiE3u_vq4cRk0_OezhYdyXVafWr

7 <https://www.imo.net/files/meteor-shower/cal2018fr.pdf>

figures 10 et 11) montrait la désagrégation en plusieurs morceaux d'un étage de lanceur Soyouz et sa chute au large des côtes Ouest de la Corse.

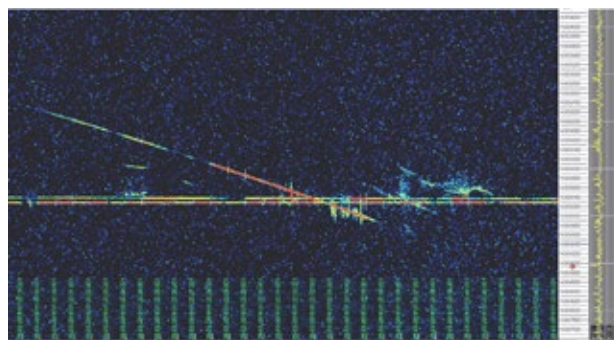


Fig.10. On distingue sur ce spectrogramme la désintégration en plusieurs morceaux d'un lanceur Soyouz qui est retombé au large de la Corse en mars 2018.

Les données vidéo de cet événement n'ont pas été conservées, puisque la vitesse de l'engin était d'environ 7 km/s et que seules les cibles possédant une vitesse de 11 km/s ou plus sont susceptibles d'être des étoiles filantes.



Fig.11. Le point rouge « JSpOC TIP Entry Point » pointe la zone de chute en mer des débris d'un lanceur Soyouz.

Mettre en œuvre une station d'observation radio de météores est un projet à la portée d'un groupe motivé. Le point le plus difficile est de souder correctement les prises coaxiales du câble d'antenne... Faites appel aux compétences d'un radioamateur, et... bonne chasse aux météores !

Petit problème

La date de Pâques 2019

On entend souvent dire que Pâques a lieu le 1er dimanche qui suit la pleine Lune qui suit l'équinoxe de printemps.

En 2019, l'équinoxe aura lieu le 20 mars, la pleine Lune le jeudi 21 mars et le dimanche qui suit est le 24 mars. Pourtant, les calendriers donnent pour Pâques la date du 21 avril. Où est l'erreur ?