

Le 'Radio Meteor Zoo'

Une chasse aux météores à l'échelle mondiale

Hervé Lamy et Stijn Calders

Météoroïde vs météore

Suivant la définition récente de l'Union Astronomique Internationale, un météoroïde est un objet solide se déplaçant dans l'espace interplanétaire, d'une taille comprise entre environ 30 microns et 1 mètre. Les météoroïdes se déplacent autour du Soleil avec des orbites très variées et avec des vitesses de plusieurs dizaines de km/s. Parfois leur orbite entre en collision avec celle de la Terre et elles pénètrent dans notre atmosphère. La plupart des météoroïdes sont de toutes petites poussières. Un météore (communément appelé aussi 'étoile filante') est le phénomène lumineux qui résulte de l'interaction du météoroïde avec l'atmosphère terrestre. Il se produit généralement entre 80 et 120 km d'altitude. Les météoroïdes peuvent être détectés et étudiés au moyen d'observations optiques mais également au moyen d'observations radio.

L'observation radio des météoroïdes

Le principe de la détection radio des météores est simple et est illustré à la Figure 1: une onde radio est émise vers le ciel par un émetteur et couvre une région relativement importante du ciel à 100 km d'altitude. Quand un météoroïde entre dans l'atmosphère avec une vitesse supersonique, il heurte les particules de la haute atmosphère et les ionise (arrache un ou plusieurs électrons). La traînée ionisée qui se forme dans le sillage du météore peut temporairement réfléchir l'onde radio vers le sol. Le signal peut alors être capté par une station de réception au sol dont la fréquence

est calée sur celle de l'émetteur: on parle d'écho de météore'. Sa durée peut varier d'une fraction de seconde à plusieurs secondes et dépend approximativement de la taille du météoroïde: plus il est grand, plus le signal sera long. La majeure partie des échos de météores durent seulement une fraction de seconde. L'analyse du signal reçu peut donner accès à des informations sur l'objet telles que sa trajectoire, sa vitesse ou sa masse.

Les observations radio présentent deux avantages par rapport aux observations visuelles : 1) les données peuvent être enregistrées 24h/24 et ne dépendent pas des conditions météorologiques, 2) elles permettent de détecter des objets de plus petite masse qui ne produisent pas de phénomène lumineux mais qui sont les plus nombreux.

BRAMS

Le réseau BRAMS⁽¹⁾ (Belgian Radio Meteor Stations), initié par l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique en 2010, est un réseau belge de stations radio dont l'objectif est d'étudier les météoroïdes au moyen d'ondes radio. Il est constitué d'un émetteur dédié situé au Centre de Géophysique du Globe à Dourbes, et d'un ensemble de +/- 30 stations de réceptions réparties sur le territoire belge.

Chaque jour, une immense quantité de données est générée par le réseau BRAMS avec des milliers d'échos de météores enregistrés, ce qui nécessite l'utilisation d'algo-

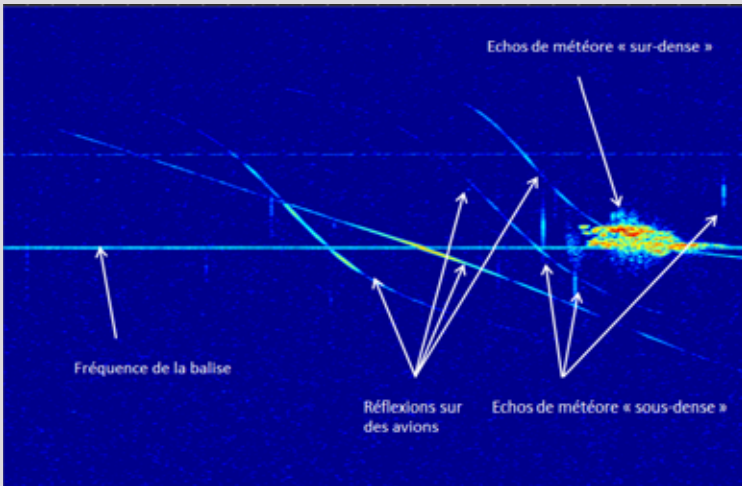


Figure 2: Exemple typique de spectrogramme obtenu avec le réseau BRAMS et des différents signaux observés.

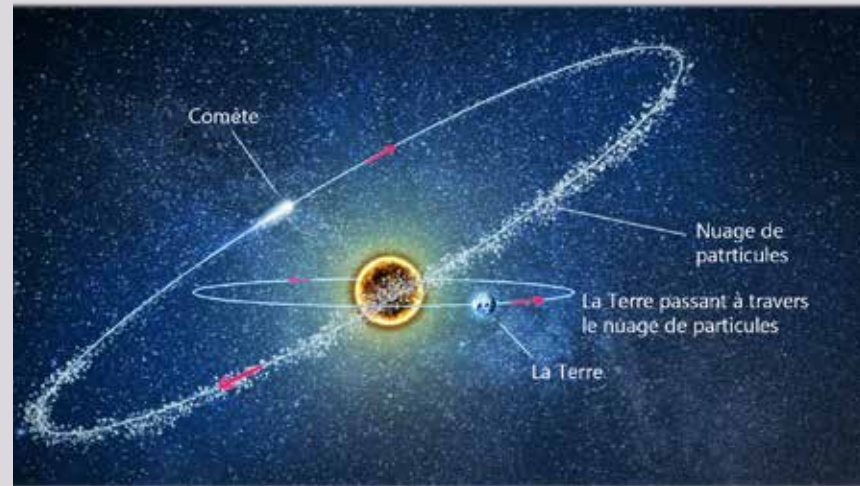


Figure 3: Illustration de l'origine des essaims de météores quand la Terre croise l'orbite d'une comète.

rithmes de détection automatique. Les données BRAMS sont généralement présentées sous forme d'images appelées spectrogrammes qui donnent une représentation visuelle du spectre de fréquence contenu dans un signal et son évolution au cours du temps. Chaque spectrogramme dure 5 minutes et contient une bande de fréquence de 200 Hz dans laquelle apparaissent les échos de météores. La puissance du signal est représentée par un code de couleur, le rouge correspondant à une puissance élevée et le bleu à une puissance très faible proche du bruit électromagnétique ambiant capté par l'antenne. Un exemple de spectrogramme est donné à la Figure 2.

Sur cette image, le signal horizontal (appelé 'fréquence de la balise') est le signal direct provenant de l'émetteur. Le spectrogramme est construit de sorte que la bande de 200 Hz soit centrée sur ce signal. Les signaux de très longue durée sont dus à des réflexions de l'onde radio sur des avions. Les signaux avec une durée de vie très courte (une fraction de seconde) sont des échos de météores dits 'sous-denses'. Ils apparaissent comme des traits essentiellement verticaux. Ils sont dus à de très petites poussières et constituent la majeure partie des détections obtenues avec le réseau BRAMS. Les échos de météores dits 'sur-denses' ont une durée de vie beaucoup plus longue (de l'ordre de la seconde à quelques dizaines de secondes) et sont produits par des météoroïdes beaucoup plus grands (avec des tailles typiques allant jusqu'au cm). La forme de ces échos dans les spectrogrammes est très complexe et varie fortement, ce qui rend leur détection automatique très difficile.

Météores sporadiques versus essaims de météores

Des météores tombent en permanence dans l'atmosphère terrestre et constituent ce que les astronomes appellent la composante sporadique car ces météores peuvent provenir de n'importe quelle direction et se produire à n'importe

quel moment (bien que certaines directions soient privilégiées). Leur origine est essentiellement liée aux astéroïdes. Il existe une seconde population de météores, les essaims de météores, associés à des poussières situées le long de l'orbite d'une comète. Quand une comète s'approche du Soleil, elle s'échauffe, sa surface commence à sublimer et libère le long de son orbite des grains de poussières qui étaient piégés dans la glace. Si la Terre croise l'orbite de cette comète, elle entre chaque année à la même période dans un nuage de poussières donnant lieu à un essaim de météores (voir Figure 3). Suite à un effet géométrique, tous les météores appartenant à un essaim semblent provenir d'un point sur le ciel appelé le radiant. Chaque essaim de météore porte un nom lié à la constellation dans laquelle ce point se situe. Par exemple, le radiant des Perséides (qui se produisent chaque année au mois d'août) se situe dans la constellation de Persée.

Durant les essaims de météores, un nombre beaucoup plus important d'échos de météores 'sur-denses' avec des formes très complexes est observé dans les spectrogrammes, ce qui rend l'utilisation des algorithmes de détection automatique peu fiable. Dans ce cas, l'œil humain (entraîné) reste le meilleur détecteur. De là est née l'idée d'un projet citoyen dans lequel des milliers d'utilisateurs analysaient les données BRAMS obtenues durant les essaims de météores.

Le Radio Meteor Zoo

En août 2016, l'équipe BRAMS a lancé le projet citoyen Radio Meteor Zoo⁽²⁾ (RMZ) en collaboration avec l'équipe de Zooniverse⁽³⁾. Sur ce site, l'utilisateur est invité à identifier les échos de météore dans des spectrogrammes BRAMS en dessinant des rectangles autour des échos de météores potentiels. Un bref tutoriel est disponible et explique ce qu'est un spectrogramme, comment reconnaître et identifier les échos de météores, et donne quelques conseils pour éviter les erreurs les plus évidentes. Le site contient également une

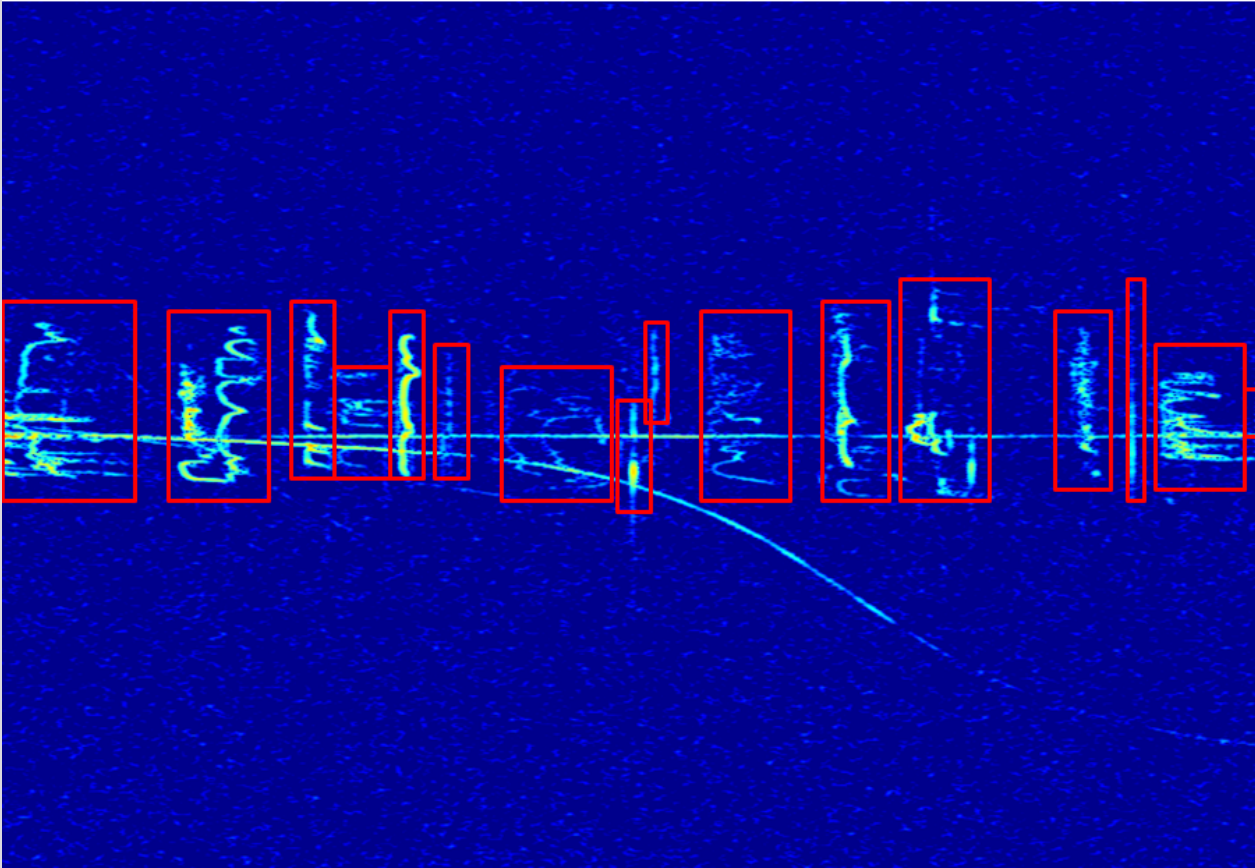


Figure 4: Spectrogramme obtenu avec le réseau BRAMS le 12 août pendant le pic d'activité des Perséides. Les rectangles rouges correspondent à l'identification manuelle des différents échos de météores.

section décrivant plus en détails le projet BRAMS ainsi qu'un forum où les utilisateurs sont invités à interagir avec l'équipe de recherche.

Le projet a démarré le 12 août 2016 avec l'analyse des Perséides, un des essaims de météores les plus actifs causés par les météoroïdes de la comète Swift-Tuttle dont la période de révolution autour du Soleil est de 130 ans. Les Perséides heurtent l'atmosphère terrestre avec une vitesse relative de 59 km/s, une des raisons possibles quant à l'origine des nombreux échos complexes observés dans les spectrogrammes. La Figure 4 montre un exemple de spectrogramme obtenu pendant le pic d'activité des Perséides le 12 août 2016. Les échos de météores y ont des formes extrêmement complexes et dans certains cas se recouvrent même. Les rectangles rouges correspondent à une classification manuelle correcte en suivant les règles du tutoriel.

Chaque image est envoyée aléatoirement à 10 utilisateurs différents et un pixel de l'image n'est comptabilisé comme appartenant à un écho de météore que si au moins 4 personnes sur les 10 l'ont entouré d'un rectangle. De la sorte, si un utilisateur commet une erreur, soit en oubliant un écho de météore, soit en marquant erronément un autre signal, le risque d'avoir de fausses détections est minimum. Le choix de ces 2 nombres est basé sur une étude préalable réalisée à plus petite échelle avec 12 spectrogrammes et

une quarantaine de volontaires. L'étape finale de la détection des échos de météores consiste à regrouper tous les pixels sélectionnés par au moins 4 utilisateurs et contigus dans le plus grand rectangle commun.

La Figure 5 donne un exemple de résultat : elle contient un zoom sur une région d'un spectrogramme sur lequel les rectangles (rouges) dessinés par les 10 utilisateurs ont été reproduits ainsi que les candidats échos de météore (rectangles verts) sélectionnés par la méthode décrite ci-dessus. On constate que les deux échos de météores sont correctement détectés (entourés par des rectangles verts) et ce malgré le fait que certains rectangles individuels (rouges) soient dessinés beaucoup trop grands. Avec cette méthode, la plupart des échos de météores sont détectés. Néanmoins, quelques échos de météores très proches sont parfois regroupés en une seule détection (rectangle vert) et quelques échos de météores faibles peuvent être manqués car non-comptabilisés par au moins 4 utilisateurs. De nouvelles méthodes d'analyse prenant en compte un 'facteur de qualité' pour chaque utilisateur sont prévues pour améliorer ces points.

Résultats préliminaires

Bien que les analyses ne soient pas encore définitives, ces comptages peuvent être utilisés pour générer une courbe d'activité de l'essaim de météore, c.à.d. une courbe don-

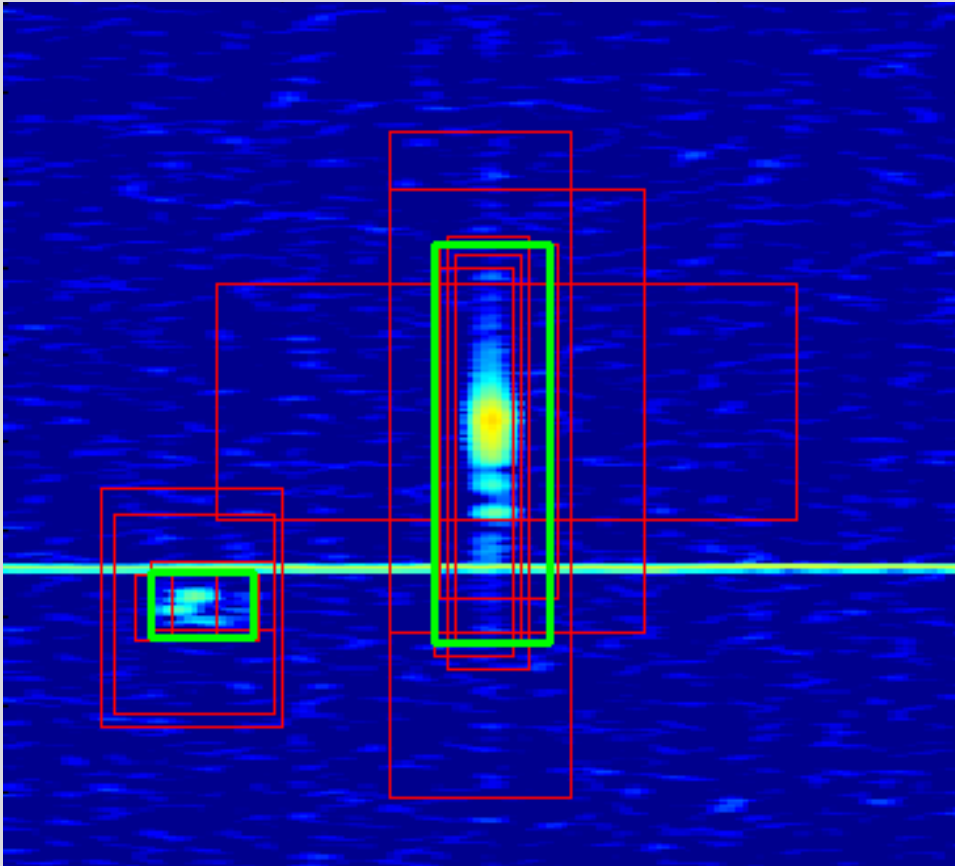


Figure 5 : Zoom sur une partie d'un spectrogramme envoyé à 10 utilisateurs différents. Les rectangles rouges sont ceux dessinés par les 10 utilisateurs tandis que les rectangles verts sont les détections finales obtenues en utilisant les critères de sélection définis dans le texte. Dans cet exemple, les échos de météores sont parfaitement contenus à l'intérieur des rectangles verts.

nant le nombre de météores détectés par heure. La Figure 6 montre l'activité des Perséides obtenue à partir des données enregistrées à la station de Humain entre le 10 et le 14 août 2016.

La courbe rouge montre tous les échos de météores obtenus à partir des comptages du RMZ et représente l'activité totale qui est due d'une part aux météores appartenant à l'essaim, et d'autre part aux météores sporadiques. Les points noirs sont les mesures horaires de l'activité des météores sporadiques, obtenues en utilisant la moyenne des données de la même station les 17 et 19 août 2016, quand l'essaim des Perséides n'était plus actif et aucun autre essaim n'avait lieu. La courbe noire est une courbe sinusoïdale qui ajuste au mieux ces points noirs. En effet, il est connu depuis longtemps que l'activité des météores sporadiques varie de manière journalière à cause de la rotation de la Terre. Chaque jour, on a un maximum le matin vers 6h qui correspond au moment où la Terre fait face à la direction vers laquelle elle se déplace (appelée apex par les astronomes). A ce moment de la journée, la Terre heurte non seulement les météores qui se dirigent vers elle mais rattrape aussi ceux qui se déplacent devant elle plus lentement que 30 km/s (la vitesse de la Terre le long de son orbite autour du Soleil). Le phénomène inverse se produit vers 18h temps local où on observe dès lors un minimum. La variation entre les deux est supposée être +/- sinusoïdale.

La courbe bleue est le résultat de la soustraction de la courbe noire de la courbe d'activité totale et correspond approximativement à l'activité de l'essaim des Perséides lui-même. Sur le graphe en dessous, les points verts représentent l'élévation du radiant des Perséides au-dessus de l'horizon. En effet, à cause de la rotation de la Terre, le radiant se déplace sur le ciel au cours de la nuit. Quand le radiant des Perséides est bas sur l'horizon, il n'y a pas d'activité de l'essaim détectée par le réseau BRAMS. Quand le radiant est haut dans le ciel, les conditions pour la réflexion des ondes radio ne sont pas idéales non plus et un creux est en effet observé chaque jour dans la courbe bleue quand le radiant est à son élévation maximale.

Le pic d'activité des Perséides est observé le 12 août, peu après minuit TU (Temps Universel), ce qui correspond aux observations visuelles. La prochaine étape consistera à 'corriger' cette courbe d'activité en utilisant ce qu'on appelle la fonction d'observabilité. Cette fonction prend en compte la géométrie du système (positions de l'émetteur et du récepteur, position du radiant sur le ciel) et les sensibilités des émetteurs/récepteurs pour calculer un facteur de correction qui relie les comptages bruts (Figure 6) et le nombre réel de météores.

L'essaim des Perséides peut être distingué de la composante sporadique de manière beaucoup plus nette quand on se fo-

calise sur les échos de météores 'sur-denses'. A la Figure 7, les mêmes quantités sont représentées qu'à la Figure 6 mais pour les échos de météores avec une durée d'au moins 10 secondes. Le nombre de météores est logiquement beaucoup plus petit mais la contamination des Perséides par les météores sporadiques est bien moindre (et donc la correction plus aisée). Les deux pics d'activité (le principal évoqué plus haut et un secondaire observé le 13 août) sont bien plus visibles. Le fait que les Perséides apparaissent bien plus nettement quand seuls les météores 'sur-denses' sont considérés est lié à l'indice de masse de l'essai. L'indice de masse d'une population de météoroïdes décrit comment la masse est distribuée parmi les particules : un indice de masse élevé indique que la masse de l'essai est surtout présente dans les petites particules alors qu'un indice de masse faible révèle que l'essai est surtout constitué de particules plus grosses.

Conclusions et perspectives

Depuis son lancement en août 2016, le RMZ a été un énorme succès. Un peu moins de 5000 utilisateurs se sont déjà enregistrés sur le site, ce qui a permis d'analyser plus

de 24.000 spectrogrammes. Les données de plusieurs essais sont en cours d'analyse : Quadrantides 2016 et 2017, Géminides 2017 et Lyrides 2017. Ces résultats seront utiles pour étudier l'activité et la distribution de masse des essais mais ils seront également utilisées dans le projet BRAMS pour évaluer, par exemple, l'efficacité des méthodes de détection automatiques ou pour tester des algorithmes de reconstruction de trajectoires.

Notes

- (1) <http://brams.aeronomie.be>
- (2) <http://www.radiometeorzoo.be>
- (3) <http://www.zooniverse.org>

Les auteurs

Hervé Lamy et Stijn Calders sont chercheurs permanents au sein de la division 'Physique Spatiale' de l'IASB. Hervé Lamy est aussi responsable du projet BRAMS.

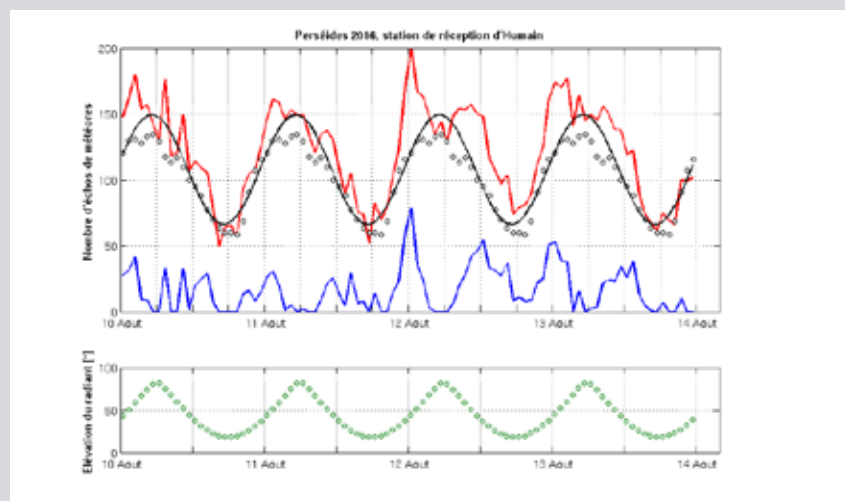


Figure 6 : Courbe d'activité des Perséides 2016 obtenue à partir des résultats du RMZ. Le temps est donné en Temps Universel (TU = temps local + 2 heures).

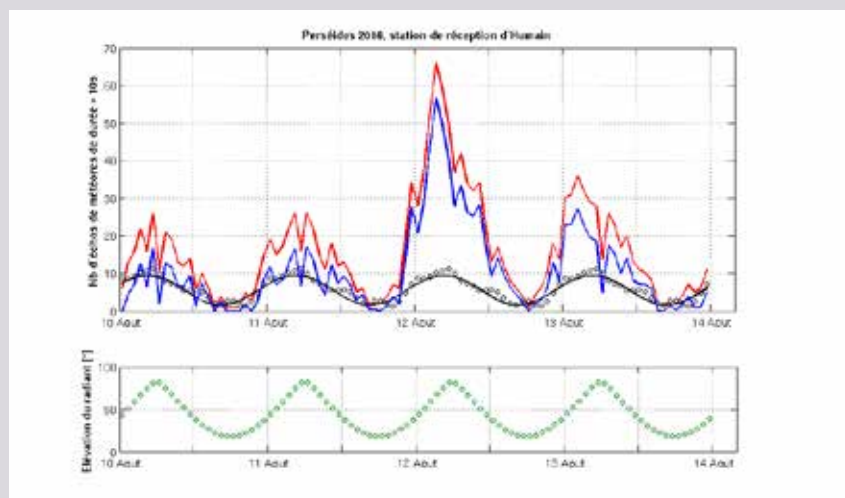


Figure 7 : Courbe d'activité des Perséides 2016 mais uniquement pour les échos de météores avec une durée de plus de 10 secondes.