

Le réseau MOROI: Suivi des météoroïdes entrant dans l'atmosphère au-dessus de la Roumanie

Simon Anghel

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
IMCCE, Observatoire de Paris,
Université de recherche PSL, CNRS UMR 8028

Mirel Birlan

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
IMCCE, Observatoire de Paris,
Université de recherche PSL, CNRS UMR 8028

Dan-Alin Nedelcu

Institut d'Astronomie
de l'Académie Roumaine
IMCCE, Observatoire de Paris,
Université de recherche PSL, CNRS UMR 8028

François Colas

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
IMCCE, Observatoire de Paris,
Université de recherche PSL, CNRS UMR 8028

Adrien Maltgoyre

Aix Marseille Université,
CNRS, OSU Institut Pytheas

Octavian Blăgoi

Astronomical Institute
of the Romanian Academy

Cristian Dănescu

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine

Petre Paraschiv

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine

Vlad Turcu

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
Observatoire d'Astronomie de Cluj-Napoca

& the MOROI team

Résumé— Le réseau MOROI suit les météoroïdes entrant dans l'atmosphère terrestre au-dessus de la Roumanie. Ces dernières années, nous avons intégré progressivement le réseau à celle du consortium FRIPON. Cet article présente les récentes avancées dans le traitement des données, en se concentrant sur une étude de cas d'un bolide du courant des Perséides particulièrement brillant. De plus, l'article met en évidence des applications complémentaires telles que l'estimation de la couverture nuageuse à l'aide de l'apprentissage profond appliqué aux images du ciel. Ces développements améliorent le rendement scientifique du réseau et ses contributions à la recherche sur les météoroïdes.

Mots-clés — MOROI, Météoroïdes, Météorites, FRIPON, observations.

I. INTRODUCTION

Des petits objets entrent dans l'atmosphère terrestre quotidiennement. En raison de leur taille, la plupart restent invisibles jusqu'à qu'ils interagissent avec l'air et génèrent de la lumière lors de leur entrée. La disponibilité des caméras numériques au cours des dernières décennies a permis une augmentation rapide du nombre de météorites récupérées avec des trajectoires atmosphériques enregistrées. Lorsque les détections sont centralisées, les calculs de champs d'éparpillement des fragments peuvent être obtenus plus rapidement (moins de 24 heures), facilitant la récupération de matériel météoritique non altéré et augmentant la valeur scientifique de ces impacts atmosphériques. Le réseau MOROI (Météorites Orbits Reconstruction by Optical Imaging), commencé en 2017 [1], a connu des développements significatifs depuis sa création. Cet article présente une mise à jour sur les capacités du réseau, en se concentrant sur les récentes avancées dans le traitement des données, les applications scientifiques et l'expansion.

II. LE RESEAU MOROI

Le réseau MOROI est un projet développé à l'Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine (Bucarest, Roumanie), suite à l'installation de la station la plus orientale (à l'époque) du réseau de récupération de boules de feu et d'observation interplanétaires (FRIPON) [3]. Depuis, le réseau s'est progressivement étendu à travers la Roumanie. À partir de novembre 2020, de nouvelles caméras installées (en moyenne une par mois) ont été intégrées directement à la base de données mondiale FRIPON à Marseille, France [4], [2]. Actuellement, le réseau comprend 20 caméras installées dans des observatoires, des musées des sciences et diverses institutions à travers la Roumanie (Figure 1). Parmi celles-ci, plusieurs sont déjà connectées au serveur central au Service Informatique Pytheas (Université Aix-

Marseille, France). Les observatoires astronomiques continuent d'être d'excellents emplacements en raison du ciel sombre, ce qui permet de détecter plus d'étoiles et de les utiliser pour les calibrations. L'intégration de MOROI avec FRIPON a résulté en un système complet avec une visibilité accrue, favorisant une base de données en libre accès (<https://fireball.fripon.org/>), étendant les capacités du consortium FRIPON plus large.

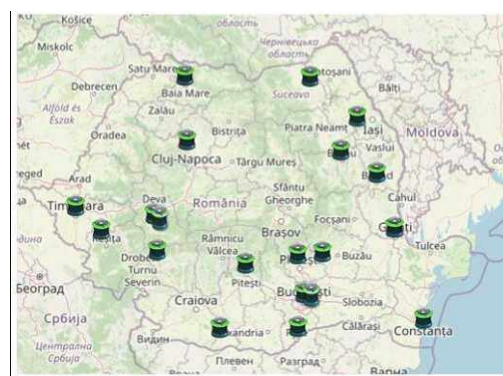


Fig. 1. La distribution actuelle des stations du réseau MOROI à travers la Roumanie. Chaque marqueur représente une station équipée de caméras à ciel ouvert, qui exécutent un algorithme de détection de météores. Deux emplacements (Bucarest et Berthelot) accueillent une station supplémentaire fonctionnant en acquisition continue d'images à longue exposition. Le réseau, intégré au système FRIPON, permet la collecte et le traitement des données en temps réel.

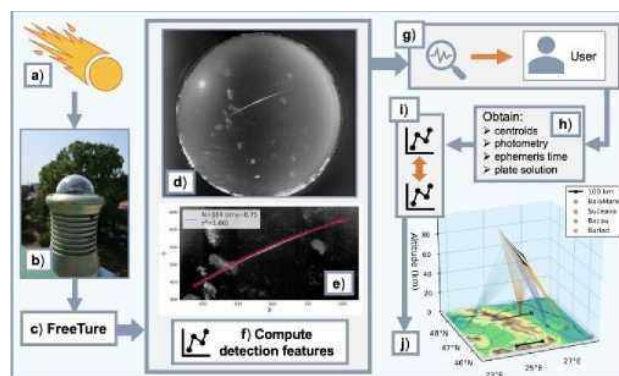


Fig. 2. Adapté de [2]. Schéma du flux de données du réseau MOROI. a) Le phénomène lumineux peut soit être un bolide soit un événement faux (par exemple, lumières de ville, reflets, avions, satellites). b) Une caméra à ciel ouvert qui surveille le ciel (ici est la caméra montée à l'AIRA). c) Le logiciel FREATURE exécute une boucle de détection en arrière-plan sur l'acquisition et stocke chaque événement. d) Les trames empilées de l'événement. e) Les positions de l'image de la détection superposées sur

une découpe des trames empilées. f) Un ensemble de caractéristiques (par exemple, vitesse radiale, durée, direction) est calculé à partir du fichier positions.txt. g) Le filtrage des détections vraies et fausses. Cela peut être employé par l'utilisateur ou un modèle d'apprentissage automatique forme' [2]. h) Calculer des positions précises de météoroïdes, obtenir la photométrie et les coordonnées célestes. i) Fusionner les données de cette station avec les données d'autres stations du même événement, qui sont également filtrées par les étapes précédentes. j) Reconstruire la trajectoire atmosphérique du météoroïde.

III. MATERIEL & TRAITEMENT DES DONNÉES

Chaque station MOROI est composée d'une caméra avec un capteur CCD Sony ICX445, adaptée avec une lentille à ciel ouvert. Cela se traduit par une échelle de 10 arcmin/pixel. La caméra est alimentée via Ethernet, et elle est connectée à l'ordinateur Intel Nuc, qui stocke temporairement les données et les transfère au serveur central pour traitement. Pour la détection des boules de feu, le logiciel FREEFIRE [5] est utilisé dans toutes les stations. De plus, le logiciel capture une image à longue exposition toutes les 10 minutes, utilisée pour calibrer l'astrométrie et la photométrie ou d'autres applications. Le logiciel exécute une boucle de détection en arrière-plan qui identifie automatiquement et stocke chaque trace de lumière. Une fois un événement associé à un météore, le système calcule des positions précises de météore et la photométrie. Ces données sont ensuite fusionnées avec les observations d'autres stations du réseau pour reconstruire la trajectoire atmosphérique du météore (Figure 2), permettant le calcul de son orbite [6] et le champ d'éparpillement es fragments, si l'objet est assez grand pour laisser des météorites au sol. Le calcul du champ d'éparpillement intègre des profils de vent atmosphérique utilisant une approche de Monte Carlo pour les paramètres inconnus [7]. Le réseau a également mis en œuvre un modèle de correction de saturation pour atténuer les effets des boules de feu brillantes et mieux comprendre la fragmentation. Ainsi, la masse avant l'entrée peut être calculée en utilisant la lumière rayonnée le long de la trajectoire atmosphérique [8].

Une avancée clé est la mise en œuvre de techniques d'apprentissage automatique pour le filtrage de détection de météores avec une précision de 99,99% lorsque l'objet a été détecté sur au moins deux stations [2]. Dans la section suivante, nous présenterons une analyse d'un météore Perséide.

IV. ÉTUDE DE CAS DU METEORE PERSEIDE 2024

Le 12 août 2024, pendant le pic de la pluie de météores des Perséides, un fragment cométaire particulier a été détecté simultanément par quatre stations du réseau MOROI. Cela a permis une reconstruction précise de la trajectoire et une analyse détaillée de sa courbe de lumière (Figure 3). Le météore a montré une augmentation rapide de la luminosité' (-8, 6 mag), avec plusieurs caractéristiques visibles le long de son ablation progressive, suivie d'une diminution rapide, indicative d'une fragmentation significative. La trajectoire lumineuse a couvert une longueur de 128,168 km sur une durée de 2,1 s.

L'ablation a commencé à une altitude de 112 km et s'est terminée à 79,9 km. L'énergie rayonnée est estimée à 0,04 tonnes de TNT, ce qui, avec sa vitesse d'entrée de 65,7kms⁻¹, correspond à une masse d'entrée nominale de 94 g. Au point de fragmentation, le météoroïde a subi une pression dynamique maximale de 0,04 MPa. L'intégration de MOROI avec FRIPON a considérablement amélioré la capacité du réseau à détecter et rendre disponibles de tels événements en temps réel et à calculer des trajectoires précises. Avec sa couverture étendue à travers la Roumanie (Figure 1), le réseau MOROI est actuellement la branche la plus orientale du réseau allsky FRIPON.

V. APPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

Au-delà de sa fonction principale dans l'observation des météores, le réseau MOROI a démontré un potentiel pour des applications scientifiques complémentaires. L'un de nos derniers cas d'utilisation des images à longue exposition (Figure 4) est le développement d'un modèle d'apprentissage profond conçu pour estimer le niveau de couverture nuageuse (CC). Cette technique utilise des réseaux de neurones convolutionnels (CNN) appliqués aux images du ciel capturées par les caméras MOROI [9]. La méthode a atteint des scores de précision entre 84-91% pour la classification de la couverture nuageuse, tant de jour que de nuit. Cette approche est indépendante des spécifications des capteurs, ce qui lui permet d'être mise à l'échelle et appliquée à plusieurs configurations de caméras. La nouveauté de cette méthode réside dans sa capacité à classer des images monochromes, qui sont plus abondantes en raison du grand nombre de réseaux des bolides. Ce développement non seulement améliore la capacité du réseau à évaluer la qualité du ciel, mais aussi à contribuer aux études climatiques.

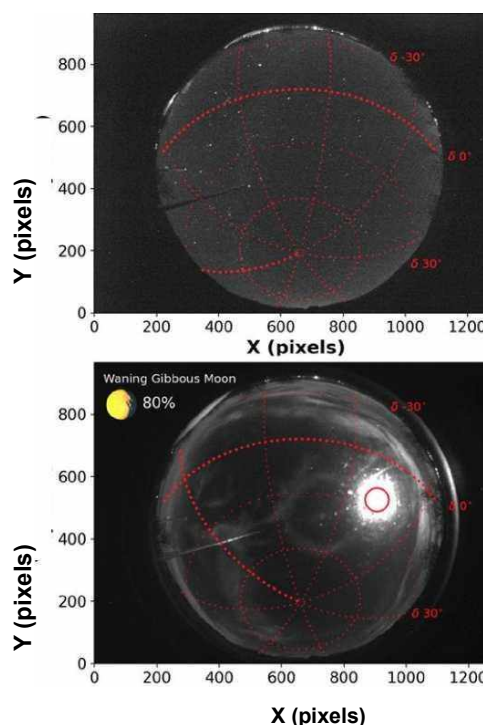


Fig. 4. Images du ciel capturées par la station Berthelot (ROHD01) du réseau MOROI. L'image du haut montre un ciel clair tandis que l'image du bas affiche un ciel mixte avec une Lune Gibbeuse Décroissante comme source lumineuse brillante. La grille rouge représente les coordonnées célestes.

CONCLUSIONS

La chaîne actuelle de traitement du réseau MOROI détient la capacité de traiter chaque événement et de calculer la trajectoire, le champ d'éparpillement, l'orbite et la masse des météores. Plusieurs améliorations/développements sont en cours de développement pour une mise en œuvre dans le pipeline de réduction FRIPON, qui traite déjà les données en temps réel. La combinaison d'une couverture réseau étendue, de techniques de traitement des données améliorées, et d'applications complémentaires comme l'estimation de la couverture nuageuse a considérablement amélioré la performance du réseau et son rendement scientifique.

Le plan est d'étendre encore le nombre de stations du réseau MOROI, en ajoutant des détections de bolides au serveur central de FRIPON à Marseille, avec l'objectif d'être sur le terrain dans les 24 heures suivant un événement de chute de météorites pour commencer la recherche de météorites.

REMERCIEMENTS

SA a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon Europe de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Skłodowska-Curie n° 101150536, pour le projet « FLAME ». Nous tenons également à remercier ceux qui contribuent en hébergeant les caméras et en assurant la maintenance du réseau des stations MOROI : Marian Achim, Remus Boată, Remus Cîrstea, Petre Cornea, Ionut, Minea, Gabriela Gurău, Ovidiu Ignat, Cezar Leșanu, Lilian Niacșu, Gabriel Rotaru, Valentin Rotaru, Florin Serbu, Ovidiu Tercu et Ciprian Vântdevară.

RÉFÉRENCES

- [1] D. A. Nedelcu, M. Birlan, V. Turcu et al., "Meteorites orbits reconstruction by optical imaging (moroi) network," *Romanian Astronomical Journal*, vol. 28, pp. 57-65, 2018.
- [2] S. Anghel, D. A. Nedelcu, M. Birlan, and I. Boaca, "Single-station meteor detection filtering using machine learning on MOROI data," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 518, no. 2, pp. 2810-2824, Jan. 2023.
- [3] F. Colas et al., "FRIPON: a worldwide network to track incoming meteoroids," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 644, p. A53, Dec. 2020.
- [4] S. Anghel, D. A. Nedelcu, M. Birlan, I. Boaca, F. Colas, A. Maltgoyre, Moroi, and Fripon Teams, "Phase Two of MOROI Network: Connection with FRIPON and Pipeline Development for Studying Meteoroids," in *84th Annual Meeting of the Meteoritical Society*, ser. LPI Contributions, vol. 84, Aug. 2021, p. 6027.
- [5] Y. Audureau, C. Marmo, S. Bouley, M.-K. Kwon, F. Colas, J. Vaubaillon,
- [6] M. Birlan, B. Zanda, P. Vernazza, S. Caminade, and J. Gattecaccia, "Free-Ture: A Free software to capTure meteors for FRIPON," in *Proceedings of the International Meteor Conference*, Giron, France, 18-21 September 2014, J. L. Rault and P. Roggemans, Eds., Feb. 2014, pp. 39-41.
- [7] S. Anghel, I. S. Szucs-Csillik, D.-A. Nedelcu, I. Boaca, and M. Birlan, "Meteoroid's orbit determination," *Romanian Astronomical Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 153-170, 2021.
- [8] I. Boaca, A. Nedelcu, M. Birlan, T. Boaca, and S. Anghel, "Mathematical algorithm for the dark-flight trajectory of a meteoroid," *Romanian Astronomical Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 171182, Sep. 2021.
- [9] S. Anghel, E. Drolshagen, T. Ott, M. Birlan, F. Colas, D. A. Nedelcu et al., "Energy signature of ton TNT-class impacts: analysis of the 2018 December 22 fireball over Western Pyrenees," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 508, no. 4, pp. 57165733, Dec. 2021.
- [10] S. Anghel, M. Voiculescu, D.-A. Nedelcu, and M. Birlan, "Cloud coverage estimation via deep learning applied to all-sky data in Romania : First Results," in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, ser. EGU General Assembly Conference Abstracts, May 2022, pp. EGU22-415.