

BRAIN-BE : METRO – Trajectoires des météores et leurs origines

RÉSUMÉ



Contexte :

La masse cumulée déposée chaque jour par les météoroïdes dans l'atmosphère terrestre est de l'ordre de 100 tonnes. Ces particules influencent la chimie de la haute atmosphère. Elles permettent de sonder les températures et les vents dans une région inaccessible par ballons ou satellites. Hors de l'atmosphère, elles représentent une menace pour les satellites et les astronautes en orbite. Elles permettent aussi d'étudier l'évolution des poussières interplanétaires et certaines comètes ou astéroïdes qui croisent l'orbite de la Terre. La physique de l'évaporation d'un météore durant son entrée à vitesse hypersonique dans l'atmosphère est également d'un grand intérêt pour l'étude de la rentrée des satellites ou de débris spatiaux. Le projet METRO a proposé l'étude des météoroïdes en utilisant les données radio collectées par BRAMS, un réseau belge de stations de réception radio qui utilisent des techniques de « réflexion oblique » pour détecter et caractériser les météoroïdes. Le réseau comprend un émetteur dédié et un grand nombre de stations de réceptions situées sur tout le territoire belge. Le projet prévoyait également le développement de modèles pour mieux appréhender le phénomène météore et confronter ces modèles aux données.

Objectifs :

Les objectifs principaux du projet étaient:

- Déterminer les trajectoires des météores à partir de données acquises de manière continue par le réseau BRAMS.
- Comparer les observations radio avec les observations optiques provenant de réseaux tels que CAMS-Benelux ou FRIPON qui couvrent le ciel au-dessus de la Belgique.
- Obtenir le profil de l'ionisation le long d'une trajectoire de météoroïde à partir d'observations multi-stations du même météore, comparer les résultats avec ceux obtenus à partir d'un modèle d'évaporation, et utiliser des méthodes d'optimisation pour obtenir une estimation de la masse initiale du météoroïde avant son entrée dans l'atmosphère.
- Développer des modèles physico-chimiques complets et des méthodologies pour la description du phénomène météore dans les régimes raréfié et continu, avec application à la détection radio. Le but est de réduire les incertitudes relatives à i) la déposition de métaux importante pour la chimie de la haute atmosphère, ii) les paramètres d'efficacité d'ionisation et les taux de dissipation du plasma, des quantités nécessaires pour une interprétation correcte des mesures de détection radio et radar.
- Calculer le flux de météoroïdes, ce qui est très important pour les satellites en orbite.

Méthodologie :

Afin de reconstruire les trajectoires des météoroïdes en utilisant uniquement les données BRAMS, la première étape est de développer des algorithmes pour détecter de manière automatique l'énorme quantité d'échos de météores dans les données BRAMS. Plusieurs méthodes utilisant des facteurs purement géométriques, du « timing » ou les données d'un interféromètre radio peuvent être considérées. Une comparaison des données radio BRAMS avec les observations optiques du réseau CAMS-Benelux permet aussi une analyse détaillée des profils de puissance des échos de

météore et une comparaison préliminaire avec les résultats obtenus avec, par exemple, les simulations réalisées au VKI. L'étude des profils de puissance des échos de météore dits « underdense » (la majorité des échos détectés par le réseau BRAMS) donne accès à plusieurs paramètres dont l'ionisation au point de réflexion spéculaire. A partir d'observations multi-stations du même météore, un profil d'ionisation peut être obtenu et comparé aux résultats d'un modèle d'évaporation, donnant au final une estimation de la masse initiale de l'objet.

En support des observations, des simulations d'un météore ont été réalisées en utilisant des outils de calcul développés au VKI : un code de simulation directe de Monte Carlo (DSMC) pour les météores à haute altitude où le gaz est raréfié, et un code fluide le long de la ligne de stagnation couplé avec un code de transfert de chaleur radiatif à basse altitude. Le développement des modèles d'interaction gaz-surface a été validé par des expériences de vaporisation réalisées dans les équipements du plasmatron au VKI et par une analyse multi-échelle du matériau dégradé.

La première étape pour obtenir des flux de météores est de calculer la fonction d'observabilité (OF) qui tient compte de la géométrie des observations pour transformer les comptages bruts de météores en nombre réels de météores tombant dans l'atmosphère. La sensibilité du système complet doit ensuite être incluse pour calculer les flux de météores.

Résultats principaux :

Un ensemble volumineux de données est désormais disponible et archivé à BIRA-IASB, avec environ 10 ans de données. Le réseau a été continuellement étendu et amélioré afin de produire des données de grande qualité. La génération future de stations utilisant de nouveaux types de récepteurs est prête.

Deux algorithmes pour la détection automatique des échos de météores ont été développés. Une première implémentation est prévue prochainement pour produire des courbes d'activité journalière pour chaque station BRAMS. Durant les essais de météores, le Radio Meteor Zoo, un projet citoyen lancé en 2016, a permis d'étudier l'activité des essais de météores principaux durant plusieurs années consécutives.

Le problème de la détermination des trajectoires par des observations multipoints s'est avéré plus difficile et est fortement couplé à l'organisation spatiale du réseau. Trois méthodes ont été développées. Prochainement, l'utilisation d'un radar à météores, actuellement en développement à Dourbes, permettra d'utiliser une quatrième méthode. La vérification des trajectoires BRAMS avec celles obtenues en utilisant les données des réseaux CAMS-Benelux et FRIPON sera facile car nous collaborons activement avec ces réseaux.

Une étude combinant les données optiques du réseau CAMS-Benelux et les données radio de BRAMS a été réalisée. Des techniques ont été développées pour obtenir les profils de puissance des échos de météores à partir des données BRAMS brutes. A partir des mesures des pics de puissance, l'ionisation aux points de réflexion spéculaires peut être obtenue.

Nous avons fourni une description détaillée des calculs décrivant les processus de dégradation du météoroïde et des phénomènes physico-chimiques liés à la dynamique de la vapeur autour de l'objet et de sa trainée de plasma. Les coefficients d'ionisation, de luminosité et les taux de dissipation de la trainée, obtenus avec cette approche, ont été comparés avec les données observationnelles de la littérature. Les données thermodynamiques, de transport et cinétiques ont été calculées pour toutes les espèces pertinentes à la vaporisation du météoroïde. Elles sont disponibles au sein de la librairie Mutation ++. Nous avons porté une attention particulière aux interactions gaz-surface. Cette recherche a été appuyée par des expériences dans la soufflerie du plasmatron au VKI et dans les installations de NASA Ames. La comparaison avec les expériences a permis la validation des modèles développés et une compréhension accrue des phénomènes impliqués.

La partie géométrique de l'OF est quasiment prête. Tous les paramètres techniques tels que les gains d'antenne, la sensibilité des chaînes de réception, etc., sont disponibles pour pouvoir calculer les flux de météores à partir des observations radio.

Conclusions :

Le projet METRO a aidé de manière significative au développement du réseau BRAMS pour en faire une installation de recherche reconnue internationalement. Le projet a notamment permis des avancées dans quatre domaines :

- Améliorations du matériel BRAMS : meilleure calibration, recommandations pour une meilleure localisation des nouveaux sites.
- Améliorations du traitement des données au moyen d'outils d'analyse automatisés.
- Améliorations dans l'interprétation scientifique des données.
- Renforcement des collaborations avec les réseaux optiques présents en Belgique (CAMS-Benelux, FRIPON).

En parallèle, les simulations et les expériences de laboratoire ont conduit à un renforcement de l'expertise belge dans le domaine de la rentrée hypersonique, un sujet particulièrement important pour les vols spatiaux.

Le projet METRO a aussi permis d'obtenir quelques résultats supplémentaires :

- Collaboration active Pro-Am, impliquant les observatoires publics et les astronomes amateurs dans le réseau BRAMS, eux-mêmes fortement impliqués dans la promotion de l'éducation scientifique (STIM).
- Stimuler le développement du Radio Meteor Zoo, un projet scientifique citoyen, qui a offert au citoyen intéressé et au contribuable d'être directement impliqué dans des activités de recherche.
- Offrir l'opportunité à 6 étudiants de travailler sur des sujets en relation avec BRAMS (dont 1 thèse de maîtrise et 2 thèses de doctorat).

Ce projet a permis de bâtir les fondations d'un effort plus large qui va permettre aux astronomes de réduire les incertitudes quant à l'interprétation des échos radio de météores et de développer des simulations plus sophistiquées dans le domaine de la science des météores.

Recommandations :

- Etendre et améliorer le réseau BRAMS de manière continue.
- Maintenir et renforcer la collaboration Pro-Am.
- Finaliser des techniques efficaces et fiables de reconstruction des trajectoires de météoroïdes.
- Appliquer l'OF aux essaims de météores. Calculer les flux de météores dans un projet à plus long terme.
- Utiliser l'information provenant des profils de puissance des échos de météore pour obtenir des mesures de températures et de vents mésosphériques au-dessus de la Belgique. Inclure ces résultats dans un contexte plus global (Européen).
- Continuer les comparaisons entre données de bolides obtenues avec FRIPON et BRAMS