
Dossier de recherche, Concours externe spécial de l'agrégation physique-chimie

Observation de météores à l'aide du réseau FRIPON

Simon JEANNE

17 juin 2021

Table des matières

1	Déroulement de ma thèse	3
1.1	L'observation des météores	3
1.2	Mon rôle au sein du réseau FRIPON	3
1.3	Mes activités d'enseignement	4
1.3.1	Mission d'enseignement	4
1.3.2	Pédagogie expérimentale avec le SCIRE	5
2	La physique des météores	5
2.1	Quelques ordres de grandeurs	6
2.2	Une modélisation simple	6
2.2.1	Écoulement autour du météoroïde	7
2.2.2	Destruction du météoroïde	7
2.2.3	Clore le système d'équation	7
2.2.4	Activité pédagogique	8
2.3	Du quantitatif au qualitatif	9
3	D'où proviennent les météoroïdes ?	10
3.1	Les météoroïdes originaires du Système Solaire	10
3.2	Météore interstellaire : le bigfoot de l'astronomie	11

Résumé

De 2016 à 2020, j'ai réalisé une thèse à L'Observatoire de Paris. Cette thèse portait sur l'étude des météores à l'aide d'un réseau de caméras.

Dans une première partie, je fais l'historique de l'observation des météores jusqu'à nos jours. Je présente ensuite plus particulièrement mes activités durant ma thèse, et pour finir mes activités d'enseignements.

Dans une seconde partie, j'expose la physique des météores telle qu'elle est comprise aujourd'hui. Je propose une activité pédagogique via une simulation de cette physique.

Enfin, dans une troisième partie, je reviendrai sur mes travaux personnels de recherche en vulgarisant un de mes résultats concernant les météores d'origine interstellaire.

Curriculum vitæ

- **Cursus :**

- CPGE MPSI/MP, lycée Montesquieu Le Mans
- Magistère de physique fondamentale d'Orsay
- M2 astronomie et astrophysique, Observatoire de Paris

- **Stages :**

- Production d'un jet d'électrons froids ; dirigé par Daniel Comparat, laboratoire Aimé Cotton (Orsay)
- Development of a neutron detector : Ni-GIRI ; dirigé par Nishimura-san, RIBF (Wako, Japon)
- Relationship between scattered light image and thermal emission for debris disks around low luminosity stars ; dirigé par François Lestrade, Lerma (Observatoire de Paris)

- **Formations :**

- Analyse de données : méthodes et applications (Institut d'Astrophysique Spatiale, 30h)
- Histoire des sciences : Les systèmes du monde des présocratiques à Kepler (Observatoire de Paris, 15h)
- Philosophie des sciences - La démarche scientifique (Observatoire de Paris, 15h)
- Le système solaire externe et sa relation avec le milieu interstellaire (Les Houches winter school, 30h)
- 61st Course Hypersonic Meteoroid Entry Physics (Ettore Majorana Center, 30h)

- **Thèse :**

- Intitulé :
Méthode d'analyse statistique appliquée au réseau d'observation européen des météores FRIPON
- Objectif :
Mettre en place le traitement des données provenant des 150 caméras surveillant les météores de l'Europe de l'Ouest

- Contributions :

- Développement d'algorithmes d'analyse "big data"
- Étude analytique de la propagation des incertitudes dans un système non linéaire
- Étude des forces et faiblesses de la modélisation classique de l'interaction météoroïde/atmosphère
- Développement d'outils numériques simulant et prédisant les zones de chute de météorites

- **Enseignement :**

- SCIRE : médiation scientifique en école primaire, CDD 19h
- Mission d'enseignement dans le cadre d'un contrat doctoral, 128h.

- **Publications :**

- Calibration of fish-eye lens and error estimation on fireball trajectories. Application to the FRIPON network ; S. Jeanne et al. – A&A 2019
- Méthode d'analyse statistique appliquée au réseau d'observation européen des météores FRIPON ; Manuscrit de thèse, 2020
- Cavezzo, the first Italian meteorite recovered by the PRISMA fireball network. Orbit, trajectory, and strewnfield ; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 501, Issue 1, pp.1215-1227, February 2021
- FRIPON : a worldwide network to track incoming meteoroids ; Astronomy & Astrophysics, Volume 644, id.A53, 23 pp., December 2020
- FRIPON first results : network efficiency and error estimation ; EPSC-DPS Joint Meeting 2019
- FRIPON and IMPACT projects to pinpoint interplanetary matter in the centimetre - hundred meter range ; European Planetary Science Congress 2018
- Fine-scale observations of Doppler frequency shifts affecting meteor head radio echoes ; International Meteor Conference 2017

1 Déroulement de ma thèse

1.1 L'observation des météores

Les "petits corps" (terme regroupant les corps allant des poussières jusqu'aux astéroïdes) sont des reliquats de la formation du Système Solaire. L'étude de leurs structures internes permet de comprendre les mécanismes de condensation et d'accrétion de la matière autour du jeune Soleil, et finalement la formation des planètes elles-mêmes. La répartition et la composition des astéroïdes dans le système solaire renseignent sur l'histoire de celui-ci : elles donnent des indices sur l'histoire des migrations planétaires, indispensables pour comprendre l'arrivée de l'eau sur des corps initialement arides comme la Terre. L'étude des petits corps est donc une des clés de la compréhension de l'origine des planètes et, en dernier lieu, de la vie sur Terre. Diverses missions spatiales ont été financées dans le but de les étudier, dont la récente mission Hayabusa 2 (200 millions d'euros) qui a ramené un échantillon de 5.4g de l'astéroïde Ryugu.

Plus proche de nous, les petits corps sont responsables d'un phénomène courant : les météores (communément appelés "étoiles filantes"). L'étude des étoiles filantes est donc directement liée à l'étude de l'histoire du Système Solaire. Elles sont par ailleurs la principale source de matière spatiale sur Terre : 100 tonnes par jour environ. On comprend l'intérêt qui leur est porté : la surveillance des météores permet de relier une météorite (donc un échantillon de matière interplanétaire) à un corps du système solaire (le "corps parent" de la météorite). Cela revient à un retour d'échantillon, comme pour la mission Hayabusa 2, mais en beaucoup moins cher (même si, dans le cas des météorites, on ne choisit pas la cible).

Pourtant, les météores sont encore aujourd'hui assez mal compris. Cela est dû à la difficulté d'observer rigoureusement ces phénomènes. Les météores sont des phénomènes fugaces, imprévisibles, et non reproductibles. Ainsi, l'origine spatiale des météores n'est proposée qu'en 1794 par Ernst Chladni. Il faut attendre 1803 et le météore du 6 floréal (26 avril), dit "de L'Aigle", pour que l'origine spatiale soit démontrée par Jean-Baptiste Biot. On pense alors que les météores proviennent soit de roches volcaniques expulsées dans l'espace puis retombant sur Terre, soit de la Lune. Au cours du XIX^{me} siècle, la découverte des astéroïdes permet enfin d'établir qu'il n'y a pas *que* les planètes et leurs satellites dans le Système Solaire, mais aussi une ribambelle d'objets plus petits, dont certains peuvent impacter la Terre. L'origine des météores est enfin trouvée.

Il faut ensuite attendre la deuxième moitié du XX^{me} siècle pour que de nouveaux progrès apparaissent, avec l'arrivée des toutes premières observations vidéos de météores. Pour la première fois, on peut réaliser des mesures quantitatives sur ces phénomènes. Ces premières mesures permettent d'établir l'évolution de la vitesse des météores dans l'atmosphère. Toutefois, les modèles utilisés sont dans un premier temps purement descriptifs (sous forme d'une combinaison d'exponentielles) afin d'obtenir des solutions analytiques. A partir des années 80, grâce à l'outil numérique, on commence à utiliser des modèles physiques de l'interaction météoroïde/atmosphère. Ces modèles sont encore largement utilisés aujourd'hui.

1.2 Mon rôle au sein du réseau FRIPON

Le projet FRIPON (Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network) est un projet de recherche lancé en 2014 par François Colas, de l'Observatoire de Paris. Le réseau est un méta-instrument dédié à l'observation optique des météores. Il est constitué d'environ 150 caméras fish-eyes réparties en France et en Europe de l'Ouest. Celles-ci sont toutes reliées via un réseau VPN à un serveur central, situé au LAM à Marseille. Sur ce serveur, les données provenant des différentes caméras sont combinées de manière à trianguler les météores.

Arrivé sur le projet FRIPON en octobre 2016, mon travail a consisté à développer des algorithmes capables de traiter la masse de données arrivant chaque nuit des 150 caméras sur le serveur de Marseille. De l'automatisation de la calibration des caméras jusqu'au calcul de l'orbite des météoroïdes avant leurs entrées dans l'atmosphère, en passant par la détermination des zones de chute des météorites, les problématiques liées à ce travail sont nombreuses et pluridisciplinaires.

De fait, j'ai travaillé avec des physiciens, des ingénieurs, des informaticiens, des statisticiens ; et il m'a fallu être le pont entre ces différentes disciplines. Un jour, il fallait vulgariser un problème lié à

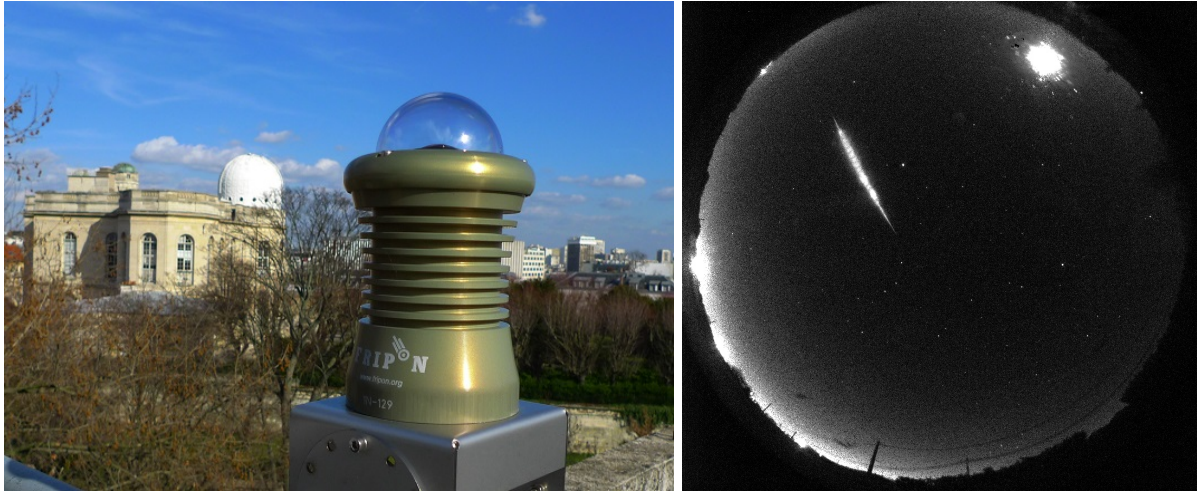


FIGURE 1 – Caméra FRIPON à L’Observatoire de Paris. Photo d’un météore observé par une de ces caméras.

la calibration pour les informaticiens, afin qu’ils adaptent le serveur. Le suivant, il fallait vulgariser le fonctionnement des dernières nouveautés informatiques pour l’équipe de scientifique, afin qu’ils s’en saisissent.

Par ailleurs, l’équipe scientifique de l’Observatoire de Paris travaille en étroite collaboration avec une équipe du Muséum d’Histoire Naturelle de Paris, en charge du projet de science collaborative [Vigie Ciel](#). Ce projet invite le public à fournir des témoignages de météores, ou encore à rechercher des traces d’impacts dans les cartes géologiques. De fait, il me fallait régulièrement fournir un travail pédagogique afin de rendre compte de mon travail à différentes audiences, allant de mes collègues jusqu’au grand public, en passant par des associations d’amateurs éclairés (chasseurs de météorites).

Le travail le plus intéressant que j’ai produit durant ma thèse (selon mon avis personnel ainsi que celui des rapporteurs de mon manuscrit) est justement un travail de liaison entre deux disciplines. J’ai rédigé un cours de statistiques appliquées, à destination des observateurs. Il fait le lien entre les statistiques abstraites, telles qu’elles sont enseignées en faculté, et les observations en condition réelle. Les théorèmes et méthodes d’analyse statistique sont souvent basés sur des hypothèses (grand nombre de mesures, erreurs suivant une loi normale, système linéaire) qui ne sont pas exactement respectées dans les cas réels. C’est particulièrement vrai dans le domaine des météores : les données concernant un événement ne sont pas forcément nombreuses, et la reproductibilité est évidemment impossible. Par ailleurs, la physique des météores est fortement non linéaire. Dans ce genre de situation, il n’y a pas toujours de méthode parfaite pour traiter les données et estimer les incertitudes. Il s’agit donc de connaître les limites des méthodes d’analyses classiques, et de savoir les interpréter correctement. A ces fins, j’ai développé des critères de validité permettant de savoir s’il est légitime d’utiliser ces méthodes ou non, et je discute des biais qu’une utilisation non-critique de ces méthodes peuvent entraîner sur l’interprétation de données. En particulier, je démontre dans ma thèse que de telles sur-interprétations ont entraîné une surestimation de la proportion de météoroïdes en provenance du milieu interstellaire dans de nombreuses études précédentes. Je reviendrais sur ce point à la section [3.2].

1.3 Mes activités d’enseignement

1.3.1 Mission d’enseignement

J’ai effectué une mission d’enseignement pour l’Observatoire de Paris, pour une durée de 128 heures équivalent TD réparties sur deux ans. Ces heures d’enseignement ont été principalement réparties en trois catégories distinctes.

- En premier lieu, le parrainage d’étudiants des masters et licences à distance de l’Observatoire de Paris. Si l’Observatoire de Paris, contrairement à une université, n’accueille pas beaucoup d’étudiants en présentiel, il propose en revanche des formations en ligne dont les niveaux vont de la L1 au M1. Ces formations abordent des sujets divers : dynamique gravitationnelle, planétologie, cosmologie, physique

stellaire, etc. Ces formations suivent le calendrier scolaire et finissent par la tenue d'un examen et la remise d'un diplôme d'université. Durant l'année scolaire, les étudiants suivent des cours en ligne et sont individuellement suivis par un parrain. Les élèves envoient régulièrement des exercices aux parrains, permettant à ceux-ci de suivre leurs progrès. Les parrains doivent repérer les faiblesses et aider à les corriger. Les parrains rédigent également les épreuves écrites et les corrigent.

- En second lieu, le parrainage de professeurs. L'Observatoire de Paris propose un service de parrainage pour les professeurs qui en font la demande. Il n'y avait pas de schéma typique pour ces demandes : il peut aussi bien s'agir d'un professeur de collège demandant une après-midi de médiation scientifique sur la formation du Système Solaire ; d'un professeur de classe préparatoire demandant de l'aider à monter un TD basé sur les travaux et données de mes recherches récentes ; où encore de professeurs d'arts plastiques et de français en lycée demandant une caution scientifique pour un projet arts & littérature de science fiction. J'ai particulièrement apprécié cette branche de ma mission d'enseignement, car elle m'a permis de présenter l'astronomie sous des angles et à des publics extrêmement diversifiés. Par exemple, vulgariser la naissance du Système Solaire à un public de collégiens, l'histoire de la conquête spatiale à des enfants de primaire ou bien des éléments de science des fusées à une classe de CPGE sont trois activités qui demandent non seulement une solide connaissance générale en astronomie, mais également de savoir adapter son discours à des publics très différents.

- Enfin, la troisième partie de mes heures d'enseignement a consisté en l'organisation de soirées d'observations astronomiques à destination des écoles (primaires jusqu'à CPGE). Après une visite du site historique de l'Observatoire de Paris (1667), nous les faisons observer la Lune et les planètes à travers la lunette historique d'Arago (1857, 38cm de diamètre, 9m de longueur), située dans la coupole visible sur la photo [1]. Cela m'a permis de développer les compétences nécessaires pour animer des soirées d'observations astronomiques pour des élèves de tout niveau.

1.3.2 Pédagogie expérimentale avec le SCIRE

J'ai participé à un programme de pédagogie expérimentale organisé par l'association SCIRE et la mairie de Gennevilliers. Avec deux animateurs, nous avons accompagné de jeunes élèves (CE1/CE2) dans une démarche d'auto-apprentissage à l'aide de l'outil numérique. Réunis par groupes de deux ou trois, ils devaient réunir et synthétiser des informations sur un sujet de leur choix, en rapport avec l'astronomie. Ces phases de recherche étaient mises en alternance avec des activités adaptées à leur âge (explication des éclipses et des saisons à l'aide de maquettes, cartographie de la surface de Venus, etc...) et la présentation du ciel nocturne via des outils numériques comme Stellarium ou SpaceEngine.

Le but était non seulement d'intéresser les élèves à l'astronomie, mais également de leur donner une formation à l'esprit critique vis à vis de ce qu'ils trouvent sur internet.

2 La physique des météores

Introduction

Quand on observe les corps célestes, on peut les classer en deux grandes catégories. D'un côté, le gaz et les poussières qui diffusent ou absorbent la lumière environnante. Il s'agit des nébuleuses ou, plus proche de nous, de la lumière zodiacale produite par les poussières interplanétaires (observable à l'œil nu par une nuit sans Lune et sans pollution lumineuse). De l'autre côté, les objets suffisamment lumineux pour être observables individuellement : les étoiles, les naines brunes, planètes et astéroïdes (dont le nom signifie littéralement "comme une étoile").

Entre les deux se trouve un point aveugle de l'astronomie : les météoroïdes. Ces derniers sont à la fois trop peu nombreux pour avoir un effet collectif notable, et trop petits pour être directement observables. De fait, on ne les détecte que lorsqu'ils percutent un autre corps, comme la Lune (les flashs lunaires), ou encore l'atmosphère terrestre. Ils produisent alors un phénomène lumineux dans l'atmosphère : un météore, d'où leur nom. La taille des météoroïdes (c'est-à-dire l'extension de cette zone aveugle) est comprise entre $30\mu\text{m}$ et 1m. Bien sûr, les bornes de cette définition ne sont pas absolues, comme le souligne l'Union Astronomique Internationale. Ainsi, si on arrive aujourd'hui à

détecter des astéroïdes de quelques mètres quand ceux-ci sont proches de la Terre, la limite pour les objets de la ceinture de Kuiper, située au-delà de Neptune, est bien plus haute.

2.1 Quelques ordres de grandeurs

La physique des météores est un exemple de physique non linéaire. Lorsqu'un météoroïde rentre dans l'atmosphère, sa vitesse par rapport à celle-ci sera comprise entre 11km/s (la vitesse de libération de la Terre) et 72km/s (la vitesse maximale à laquelle un objet provenant du système solaire peut croiser la Terre). Ces vitesses sont largement supérieures à la vitesse du son. Il se forme donc un front de choc à l'avant du météoroïde. L'air est ionisé et chauffé jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de kelvins au passage du front de choc.

Les énergies en jeu sont énormes : un météoroïde apporte entre 60 et 2600 MJ d'énergie cinétique par kilogramme de matière extra-terrestre. Par comparaison, l'énergie de vaporisation du silicium (élément principal des roches) n'est *que* de 13.7 MJ/kg.

Durant une rentrée atmosphérique, cette énergie cinétique va changer de forme via une multitude de processus. Il y a bien sur la ionisation et le chauffage de l'air qui se met alors à briller : c'est la partie visible du météore. Une autre partie de l'énergie cinétique se dissipe via la destruction du météoroïde lui-même. La matière le constituant est fondue, puis vaporisée et ionisée. Par ailleurs, le météoroïde se disloque : il va perdre des fragments. La taille de ces fragments peut aller d'un ensemble de quelques molécules, jusqu'à la dislocation du météoroïde en deux entités de tailles équivalentes.

Une fois que le météoroïde a dissipé toute son énergie cinétique initiale, les fragments ayant survécu à la rentrée atmosphérique (s'il y en a) tombent vers le sol sous l'effet de la gravité. Ces fragments survivants sont les météorites.

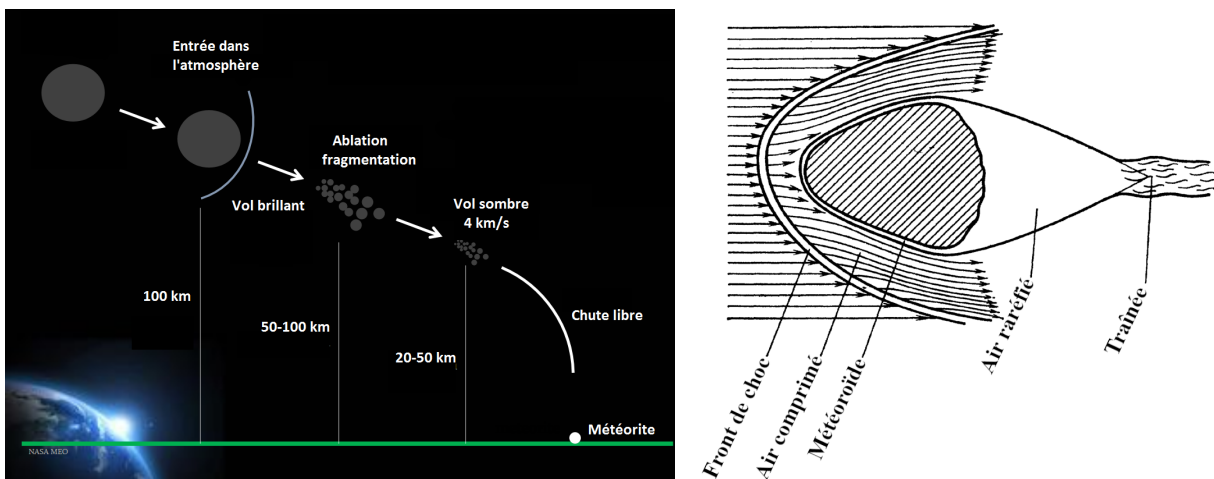


FIGURE 2 – Gauche : Représentation schématique d'un météore, de l'entrée dans l'atmosphère jusqu'à la météorite. Droite : écoulement de l'air autour d'un météoroïde.

2.2 Une modélisation simple

Une modélisation rigoureuse d'un météore est, en pratique, quasiment impossible. Pour décrire parfaitement l'interaction météoroïde/atmosphère, il faudrait connaître non seulement la taille exacte de l'objet, mais également sa forme à chaque instant, sa composition et sa structure interne (est-il d'un seul bloc, ou possède-t-il des faiblesses structurelles?).

La complexité du phénomène est à mettre en parallèle avec les conditions d'observation. Un météore est un phénomène rapide et imprévisible. Une lumière fugace dans la nuit, observée par des caméras situées à plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres de distance. Dans le cas de FRIPON, on parle de caméras grand angle ayant une précision angulaire de 1 à 2 minutes d'arcs et une fréquence de 30 images par seconde. Pour un météore situé à 100 km de distance, cela engendre une imprécision de l'ordre de 60 mètres. Par ailleurs, si le météore se déplace à 11 km/s, il parcourt 370 mètres en un trentième de seconde, le temps de prise d'une image. Cette distance monte à 2400 mètres s'il se déplace

à 72 km/s. Par conséquent, sur nos images, nous ne verrons pas une tâche circulaire, correspondant à une source ponctuelle, mais une tâche allongée : c'est le flou cinétique. Celui-ci est une des principales limitations à l'observation vidéo des météores.

Pour toute ces raisons, nous adoptons un modèle simpliste, qui ne pourra pas restituer toute la complexité du phénomène, mais qui nous permettra malgré tout de le comprendre et de fournir des prédictions.

2.2.1 Écoulement autour du météoroïde

Nous supposons que la quantité de mouvement perdu par le météoroïde durant un temps dt est proportionnelle à la quantité de mouvement du flux d'air rencontré pendant ce temps, c'est à dire la quantité de mouvement de l'air contenu dans un volume $S \times V dt$, la surface que le météoroïde présente au flux multipliée par la distance parcourue pendant le temps dt . Cela nous donne :

$$M d\vec{V} = -\frac{1}{2} c_d \times \rho_{atm} \vec{V} \times S V dt \quad (1)$$

Le coefficient de proportionnalité c_d est le coefficient de traînée. Pour de faibles nombres de Reynolds, il évolue comme l'inverse de la vitesse. On retrouve alors la force de frottement fluide proportionnelle à la vitesse que les élèves connaissent. Lorsque le nombre de Reynold augmente, le coefficient de traînée tend vers une constante, et la force devient proportionnelle au carré de la vitesse. Les météores ayant des vitesses de plusieurs dizaines (voir centaines) de fois la vitesse du son, on est dans la situation à haut nombre de Reynolds.

Remarque : La plupart du temps, la gravité peut être négligée. En effet, la décélération d'un météoroïde dans l'atmosphère est de l'ordre de quelques centaines de fois l'accélération gravitationnelle.

2.2.2 Destruction du météoroïde

La destruction du météoroïde via différents processus (fusion, vaporisation, dislocation) consomme de l'énergie (chaleur latente de changement d'état). Comme il n'est pas vraiment possible de distinguer les différents processus par l'observation, on les rassemble tous sous une seule enthalpie de destruction H . On modélise la perte de masse du météoroïde en supposant que l'énergie servant à sa destruction durant un temps dt est proportionnelle à l'énergie cinétique de l'air contenu dans le volume $S V dt$. On note c_h le coefficient de proportionnalité. On a alors :

$$H dM = -c_h \times \frac{1}{2} \rho_{atm} V^2 \times S V dt \quad (2)$$

Il n'existe actuellement pas de modèle capable de prédire l'évolution des coefficients c_h et H au cours de la chute. Par conséquent, ils sont la plupart du temps supposés constants. Cela revient à considérer une efficacité de destruction moyenne durant le vol.

Malgré cette hypothèse très simplificatrice, ce modèle permet d'expliquer relativement bien les observations, comme nous le verrons plus loin.

2.2.3 Clore le système d'équation

Pour résoudre ce système d'équations, il nous manque une troisième équation décrivant l'évolution de la surface S . On pose :

$$\frac{S}{S_0} = \left(\frac{M}{M_0} \right)^\mu \quad (3)$$

où S_0 et M_0 sont la surface et la masse initiale du météoroïde. μ est un coefficient de changement de forme, il vaut $2/3$ si le météoroïde conserve sa forme. Il sera inférieur si le météoroïde devient de moins en moins aérodynamique, et supérieur s'il l'est de plus en plus.

En combinant ces trois équations, on obtient une équation reliant la masse du météoroïde à sa vitesse (on note V_0 la vitesse initiale au sommet de l'atmosphère) :

$$\frac{M}{M_0} = \exp \left(\frac{c_h V_0^2}{2 c_d H} \left(\frac{V^2}{V_0^2} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

Ainsi qu'une équation d'évolution du système :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{2}\rho_{atm}\frac{c_d S_0}{M_0}V^2 \exp\left(\frac{c_h(1-\mu)V_0^2}{2c_d H}\left(1 - \frac{V^2}{V_0^2}\right)\right)\vec{u}_V \quad (5)$$

Grâce à ces équations, on peut simuler un météore dans l'atmosphère de son choix. Il suffit de connaître le profil de densité d'une atmosphère en fonction de l'altitude. L'atmosphère terrestre, en particulier, est très bien caractérisée à toutes les altitudes.

L'équation de la décélération [5] peut être ramenée à trois paramètres : la vitesse initiale V_0 , un facteur $A = \frac{c_d S_0}{M_0}$, et un facteur $Q = \frac{c_d H}{c_h(1-\mu)}$. Cela signifie que, en observant l'évolution de la vitesse d'un météore, ce sont à ces trois paramètres que nous pourrions remonter.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{2}\rho_{atm}AV^2 \exp\left(\frac{0.5V_0^2}{Q}\left(1 - \frac{V^2}{V_0^2}\right)\right)\vec{u}_V \quad (6)$$

Essayons de voir ce que représentent ces facteurs. Le paramètre A peut être ré-écrit $A = \frac{c_d F}{\rho D}$, où F est un facteur de forme (sans dimension), ρ la densité du météoroïde et D sa taille caractéristique (définie comme la racine cubique de son volume initial). A peut donc être interprété comme proportionnel à l'inverse de la taille caractéristique du météoroïde avant son entrée dans l'atmosphère. Le produit $c_d F$ est sans dimension et peut prendre des valeurs comprises entre 1.2 et 2.5. La densité ρ peut aller d'à peine plus que 1000 kg/m³ pour du matériel cométaire jusqu'à plus de 7000 kg/m³ pour des météoroïdes métalliques. Le paramètre Q est une énergie par unité de masse. Il est proportionnel à H , l'enthalpie massique de destruction météoroïde. Q peut donc être interprété comme proportionnel à la solidité du météoroïde. Les valeurs mesurées pour Q vont de quelques dizaines à quelques centaines de méga-joules par kilogramme. Le rapport $0.5V_0^2/Q$ est le rapport entre l'énergie cinétique apportée par le météoroïde et l'énergie nécessaire à sa destruction complète.

2.2.4 Activité pédagogique

Nous présentons aux élèves un [code python](#) permettant de simuler un météore selon ces trois paramètres, ainsi que l'angle d'entrée dans l'atmosphère. Pour plus de simplicité, le profil de densité de l'atmosphère terrestre est assimilé à une loi exponentielle de l'altitude $\rho_{atm}(h) = 1.29 \exp(-h/7160)$ kg/m³. La courbure de l'atmosphère est également négligée. Par cela nous privilégions un code lisible à un code précis. Le code renvoie un graphe représentant l'évolution de la vitesse et de la masse du météoroïde en fonction de l'altitude et des paramètres choisis.

Quel est l'influence du paramètre A ?

Plus A est faible (météoroïde large), plus il s'enfonce profondément dans l'atmosphère.

Quel est l'influence du ratio énergie cinétique sur enthalpie de destruction $0.5V_0^2/Q$?

Plus ce ratio est élevé, plus l'ablation du météore (en V^3/Q) est efficace devant son freinage (en V^2). Cela change l'ordre dans lequel l'ablation et la décélération se produisent. Pour un météore rapide et fragile, l'ablation démarre à plus haute altitude que la décélération. Pour un météore lent et solide, c'est l'inverse. Par conséquent, les météores les plus rapides auront une vitesse quasiment constante. Cette prévision est bien retrouvée expérimentalement (voir la figure [4]).

Le 15 février 2013, un météore traverse le ciel de Tcheliabinsk. Il avait un angle d'entrée de 18°, une vitesse initiale d'environ 19km/s, une densité de 3600kg/m³ et une masse de 11000 tonnes. Simulez ce météore (on prendra $Q = 55MJ/kg$, $c_d F = 2$ et $\mu = 2/3$). Dans les faits, le bolide de Tcheliabinsk a explosé au dessus de 20km d'altitude. Quelques météorites (la plus grosse atteignant 570kg) ont ensuite été retrouvées. **La simulation est-elle cohérente avec ces observations ? Quelles sont les limites du modèle que cet exemple met en évidence ?**

La simulation est globalement cohérente avec l'observation, mais elle reste limitée. Le modèle considère l'ablation comme un processus continu, là où en réalité la fragmentation peut être un phénomène discret, comme la déflagration du météore de Tcheliabinsk. Le modèle ne rend pas bien compte de ce type de phénomène. Malgré tout, la fourchette d'altitude à laquelle la perte de masse se produit est la bonne, ainsi que la masse des météorites.

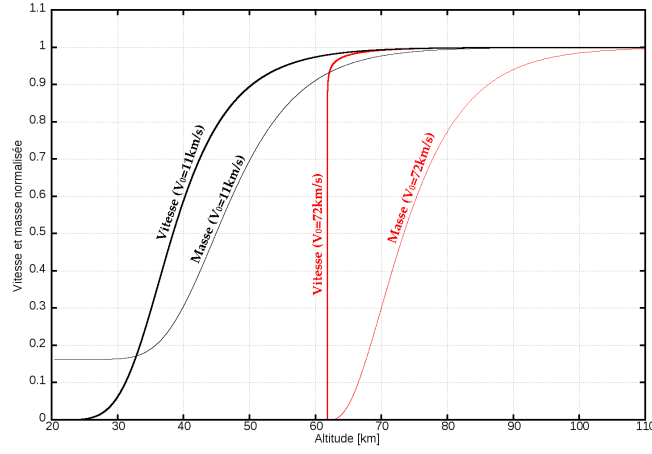


FIGURE 3 – Évolution de la vitesse et de la masse d'un météore de paramètre $A = 240 \text{ cm}^2/\text{kg}$ et d'enthalpie $Q = 100 \text{ MJ/kg}$ entrant verticalement dans l'atmosphère avec une vitesse de 11km/s (noir) et de 72km/s (rouge)

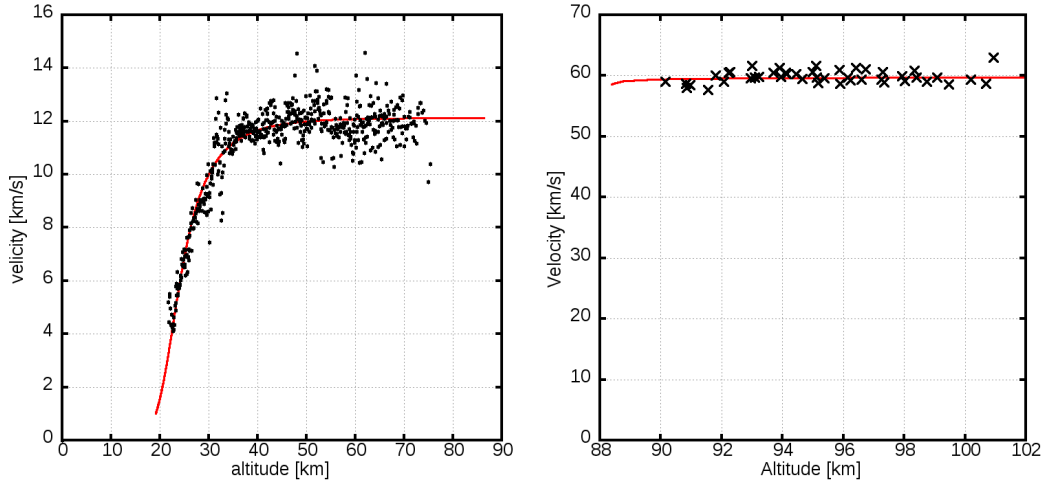


FIGURE 4 – Données provenant de deux météores réels : l'un lent (12km/s) et l'autre rapide (60km/s). Les lignes rouges correspondent à la modélisation.

Que se serait-il produit si le météoroïde était rentré dans l'atmosphère verticalement plutôt qu'avec un angle de 18° ?

En changeant l'angle de pénétration par 90° , le météoroïde ne perd plus toute sa masse et sa vitesse avant de toucher le sol. Avec les paramètres utilisés, il frappe le sol à 11.7 km/s et avec une masse restante de 25 tonnes, de quoi former un cratère d'une centaine de mètres de diamètre ! L'énergie libérée par un tel impact serait de 1.7 TJ, soit environ un tiers de l'explosion du port de Beyrouth en 2020.

2.3 Du quantitatif au qualitatif

Même s'ils font tous partie de la même catégorie de phénomènes, il existe une zoologie de météore : des simples poussières se désintégrant, formant les étoiles filantes que nous admirons les nuits d'août, jusqu'à l'astéroïde frappant la Terre, en passant par les météores produisant des météorites, ou encore les bolides produisant des déflagrations dans la haute atmosphère.

Le modèle simple que nous venons de développer permet de retrouver ces catégories. Sur la figure [5], nous avons tracé les frontières délimitant les météores produisant une météorite d'au moins 50g, et ceux impactant le sol à plus de 1km/s. Cela nous permet de délimiter différentes zones sur ce graphe. On constate ainsi que le bouclier que forme l'atmosphère autour de la Terre est extrêmement efficace, en particulier pour les objets les plus rapides. Au delà d'une certaine vitesse, les météores ne peuvent

plus produire de météorite. Ils vont soit se désintégrer dans l'atmosphère, soit impacter violemment le sol. Ce fait est vérifié expérimentalement : au delà de 25km/s, on estime qu'il n'y a quasiment aucune chance qu'un météore produise une météorite.

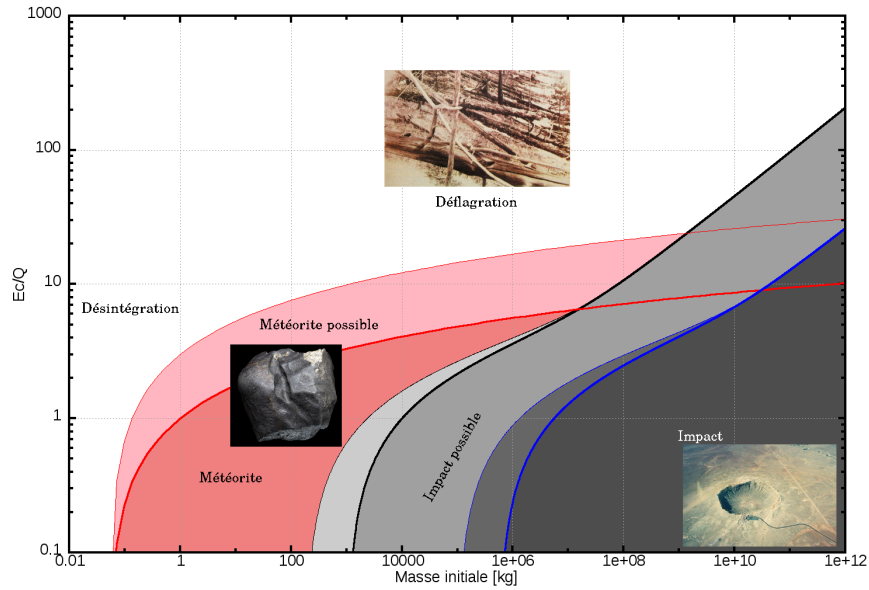


FIGURE 5 – Les lignes rouges représentent les frontières de survie d'une météorite de 50g pour un paramètre de changement de forme μ de 0.66 (ligne épaisse) et de 0 (ligne fine). Les lignes noires et bleues indiquent les limites d'un impact à plus de 1km/s pour un météoroïde entrant verticalement (noires) ou avec en angle de 7° (bleues), et une vitesse initiale de 11km/s (épaisses) et 72 km/s (fines)

3 D'où proviennent les météoroïdes ?

3.1 Les météoroïdes originaires du Système Solaire

Connaissant la trajectoire et la vitesse initiale d'un météore, il est facile de calculer l'orbite du météoroïde avant sa rencontre avec la Terre.

Pour savoir à quelle région de l'espace les météores sont rattachés, on aimerait comparer leurs demi-grands axes. Seulement, le demi-grand axe d'un objet orbitant autour du Soleil est proportionnel à l'inverse de son énergie mécanique. Ainsi, pour un météore dont la vitesse mesurée est proche de sa vitesse de libération du système solaire (ie une énergie mécanique proche de zéro), les estimateurs de son demi-grand axe n'ont plus de sens. A cause de cela, nous préférons trier les météoroïdes en fonction de l'inverse de leurs demi-grands axes, comme on le fait à la figure [6].

On repère tout de suite les deux principaux réservoirs de météoroïdes du Système Solaire. Le premier correspond à la ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter. Ce pic de météoroïdes est centré sur la résonance 3 :1 avec Jupiter (le météoroïde fait trois tours du Soleil quand Jupiter en fait un). Il s'agit d'une résonance instable : les objets entrant dans cette résonance voient leurs excentricités augmenter régulièrement, les faisant pénétrer de plus en plus profondément dans le Système Solaire interne. Cette résonance est la principale source de NEOs (Near Earth Objects), c'est donc logique que le pic de météoroïdes impactant la Terre soit centré sur lui. A l'inverse, la distribution des astéroïdes dans la ceinture principale présente une forte sous-densité au niveau de cette résonance instable.

Le deuxième pic correspond à des météoroïdes provenant du Système Solaire externe. Il comprend à la fois des centaures (nom donné aux populations de petits corps situés entre Jupiter et Neptune), et des objets transneptuniens. Les météoroïdes ayant de tels demi-grands axes ont également des excentricités très proches de 1 (sinon ils ne pourraient pas atteindre la Terre). Ce sont majoritairement des poussières et fragments de comètes.

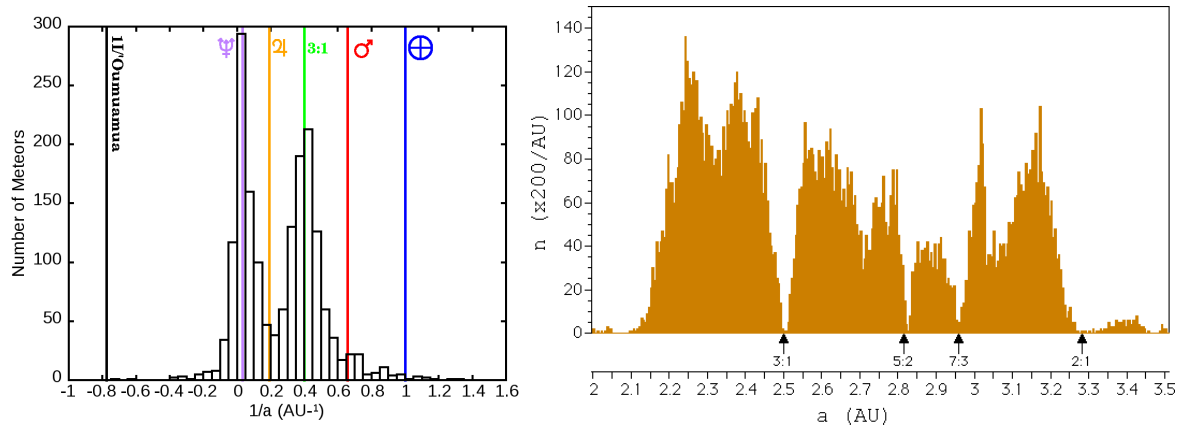


FIGURE 6 – Gauche : Histogramme de l'inverse des demi-grands axes des météores sporadiques observés par FRIPON. Les demi-grands axes de la Terre, de Mars, de Jupiter, de Neptune, de 'Oumuamua ainsi que la résonance 3 : 1 avec Jupiter sont indiqués. Droite : structure de la ceinture principale d'astéroïdes. La résonance 3 : 1 y est clairement visible.

3.2 Météore interstellaire : le bigfoot de l'astronomie

Avec les découvertes des deux petits corps interstellaires 1I/'Oumuamua le 19 octobre 2017 et 2I/Borisov le 30 août 2019, une nouvelle perspective sur l'environnement interstellaire s'ouvre. Pour la première fois, on a la preuve de l'existence de corps kilométriques voyageant dans le milieu interstellaire. Les découvertes de ces deux corps nous font nous poser une question : parmi les météores qu'on observe sur Terre, certains sont-ils issus du milieu interstellaire ? Et si oui, en quelle proportion ?

Certains météoroïdes semblent avoir des demi-grands axes négatifs, c'est-à-dire qu'ils ne semblent pas être liés gravitationnellement au Système Solaire. Ces météores représentent 10.4% du total, mais peut-on vraiment en déduire qu'une telle proportion des météoroïdes frappant la Terre sont d'origine interstellaire ?

La réponse est bien sûr négative. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette population de météoroïdes dont les demi-grands axes mesurés sont négatifs. Premièrement, il y a l'incertitude sur l'inverse du demi-grand axe. Si celui-ci vaut, par exemple, $-0.1 \pm 0.2 \text{ ua}^{-1}$, alors il n'y a pas manière de conclure.

Malgré tout, ces incertitudes ne suffisent pas à expliquer toute la population de météoroïdes dont le demi-grand axe mesuré est négatif. On pourrait en conclure qu'une certaine partie est effectivement d'origine interstellaire. Seulement, une chose paraît étrange : les demi-grands axes de ces météoroïdes restent proche de zéro, ils sont donc *proches* d'être gravitationnellement liés au Système Solaire. On se serait attendu à des objets nettement non liés au Système Solaire, comme le sont 1I/'Oumuamua (-0.78 ua^{-1}) et 2I/Borisov (-1.17 ua^{-1}). Cela donne l'impression que, plutôt qu'à des météoroïdes d'origine interstellaire, nous avons affaire à des météoroïdes dont les énergies mécaniques sont surestimées, et c'est effectivement le cas. Cela vient du fait que les vitesses mesurées sont surestimées pour les météores les plus rapides, ce qui entraîne une surestimation de leurs énergies mécaniques.

Le mécanisme de cette surestimation de la vitesse est directement relié à la physique des météores. En effet, pour les météores les plus rapides, nous avons vu que l'ablation se produit à plus haute altitude que la décélération. De cela découle que, pour ces météores rapides, l'observation ne permet pas de discerner la décélération : le météore semble avoir une vitesse constante (voir la figure [4]). Ainsi, au lieu de mesurer le paramètre de décélération A du météore, on ne peut qu'en donner une valeur maximale : A doit être inférieur à telle valeur, car sinon nous aurions détecté la décélération. Dans ces conditions, l'espérance de l'estimateur des moindres carrés \widehat{A}_{χ^2} est supérieure à la valeur réelle de A : l'estimateur est biaisé. Cela entraîne également la surestimation de l'estimateur de la vitesse : surestimer A signifie surestimer la vitesse perdue par le bolide avant que celui-ci ne devienne assez brillant pour être détecté par les caméras. Cette surestimation peut atteindre des valeurs de l'ordre du kilomètre par seconde, ce qui est loin d'être négligeable.

On peut se donner une meilleure vision du phénomène en prenant un autre estimateur de la vitesse initiale. Comme la décélération du météore n'est pas détectable, on peut considérer la vitesse comme

strictement constante (ce qui revient dans notre modèle à imposer $A = 0$). On obtient ainsi un nouvel estimateur de la vitesse $\widehat{V_{A=0}}$. Cet estimateur est sous-estimé : en effet la vitesse perdue par le bolide avant qu'il ne devienne visible à nos caméras est supposée strictement nulle, ce qu'elle n'est pas. Néanmoins, ces deux estimateurs, $\widehat{V_{\chi^2}}$ et $\widehat{V_{A=0}}$, l'un surestimé et l'autre sous-estimé, nous offrent une fourchette : ils nous donnent donc une clé d'interprétation de nos mesures.

Attention ici : ce sont les espérances de ces estimateurs qui encadrent la valeurs réelle de la vitesse initiale. Cela n'est pas forcément le cas des estimateurs eux-mêmes, qui peuvent être tous les deux supérieurs ou inférieurs à la valeur réelle.

Nous avons représenté sur la figure [7] ces deux estimateurs pour l'excentricité d'un échantillon de météores. L'estimateur $\widehat{e_{\chi^2}}$, surestimé, indique qu'une part non négligeable des météoroïdes ont des excentricités supérieures à 1 de plusieurs fois leurs écart-types (et donc seraient d'origine interstellaire). L'estimateur $\widehat{e_{A=0}}$ donne des résultats bien différents : en réalité la plupart de ces météores ne paraissent interstellaires qu'à cause de la surestimation de l'estimateur $\widehat{e_{\chi^2}}$.

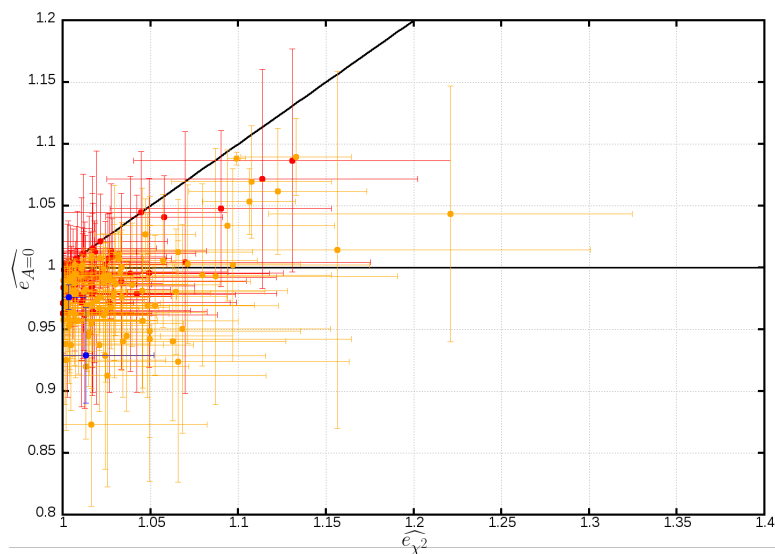


FIGURE 7 – Représentation des estimateurs de l'excentricité $\widehat{e_{\chi^2}}$ (surestimé) et $\widehat{e_{A=0}}$ (sous-estimé) d'un échantillon de météoroïdes potentiellement interstellaires. La couleur indique un degré de fiabilité de l'estimateur $\widehat{e_{\chi^2}}$ (de mauvais pour les points rouges à bon pour les points bleus). Moins la fiabilité est bonne, plus l'estimateur a des chances d'être surestimé.

Sur l'échantillon de 1486 météoroïdes que nous avons analysés, seuls une poignée ont des excentricités très supérieures à 1 pour les deux estimateurs. Ce sont par conséquent les candidats les plus sérieux de météoroïdes d'origine réellement interstellaire. Nous avons vérifié chacun d'entre eux individuellement. Il s'agit à chaque fois de faux météores : reflets des phares d'une voiture sur une caméra pour l'un, passage d'un nuage devant la Lune pour l'autre, etc. Comme pour les images d'extra-terrestres ou de cryptides, nos vidéos de météores interstellaires sont systématiquement floues !

Pourtant, les observations de deux astéroïdes interstellaires impliquent l'existence de météoroïdes interstellaires. Toutefois, aucune étude jusqu'à présent n'est parvenue à clairement démontrer leur observation. Dans l'état actuel des choses, nous ne pouvons que donner une valeur supérieure au flux de météoroïdes interstellaires tombant sur Terre.

Conclusion

De part mon expérience de recherche et d'enseignement, j'ai acquis à la fois une solide maîtrise des outils scientifiques, ainsi que la capacité de transmettre mes connaissances à des publics très diversifiés. Je peux créer et fournir des contenus pédagogiques originaux et adaptés au niveau des élèves. Pour ces raisons, je suis capable d'être à l'écoute et d'être flexible face aux diverses problématiques que pose l'enseignement en lycée ou en classe préparatoire.