
Observation de météores à l'aide du réseau FRIPON

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

Simon JEANNE

15 mai 2021

Table des matières

1	Déroulement de ma thèse	3
1.1	Le réseau FRIPON	3
1.2	Mon rôle dans ce projet	3
1.3	Mes activités d'enseignement	4
1.3.1	Mission d'enseignement	4
1.3.2	Pédagogie expérimentale avec le SCIRE	4
2	La physique des météores	4
2.1	Quelques ordres de grandeurs	5
2.2	Une modélisation simple	6
2.2.1	Activité pédagogique	7
2.3	Du quantitatif au qualitatif	8
3	D'où proviennent les météoroïdes ?	9
3.1	Carte des radiants	9
3.2	Origine dans le Système Solaire	9
3.3	Météore interstellaire : le bigfoot de l'astronomie	10

Parcours

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
- 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 strewn-field ; 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 Le 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 cartographier l'activité des météores.

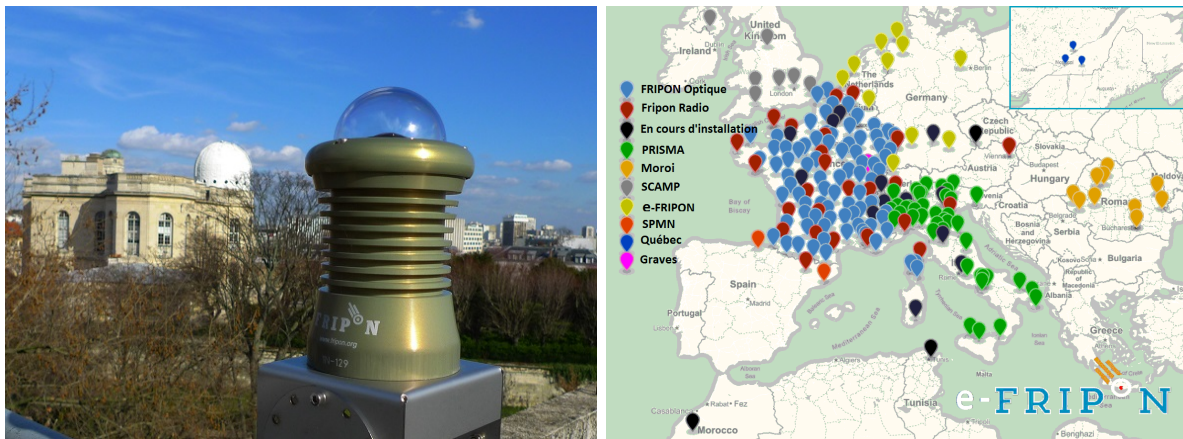


FIGURE 1 – Caméra FRIPON à L'Observatoire de Paris. Carte des stations en France et en Europe.

1.2 Mon rôle dans ce projet

Arrivé sur le projet FRIPON en octobre 2016, mon travail a consisté en le développement d'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 liés 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 la calibration aux informaticiens, afin qu'ils adaptent le serveur. Le suivant, il fallait vulgariser le fonctionnement des dernières nouveautés informatiques à l'équipe 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 Museum d'Histoire Naturelle de Paris, en charge du projet de science collaborative [Vigie Ciel](#). Ce projet invite le publique à fournir des témoignages de météores. 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 publique, 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 tels qu'elles sont enseignée en faculté et le concret des 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. Il s'agit donc de connaître les limites des méthodes d'analyses classiques, et comment 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. 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.

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.

D’un côté le parrainage d’étudiants des masters et licences à distance de l’Observatoire de Paris. Il s’agissait répondre aux demandes et interrogations des étudiants, ainsi que de vérifier les exercices qu’ils renvoyaient et de les orienter sur les bonnes réponses en cas d’erreurs. J’ai également participé à la rédaction d’une épreuve de physique (niveau L3) ainsi qu’à sa correction.

Une deuxième catégorie a consisté en le parrainage de professeur. 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 pouvait aussi bien s’agir d’un professeur d’école de collège de la région parisienne demandant une après-midi de médiation scientifique ; d’un professeur de classe préparatoire demandant de l’aider à monter un TD basé sur des travaux et données de recherche récentes ; ou encore de professeurs d’art plastique et français en lycée demandant une caution scientifique pour un projet art&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.

Enfin, la troisième partie de mes heures d’activités ont consisté en l’organisation de soirées d’observation astronomique à destination des écoles (primaire jusqu’à des CPGE). Après une visite du site historique de l’Observatoire de Paris (1667), on les faisait observer la Lune et les planètes à travers la lunette historique d’Arago (1857, 38cm de diamètre, 9m de longueur), situé dans la coupole visible sur la photo [1]. Si je n’aurais pas toujours accès à des instruments aussi prestigieux, il est clair que j’ai les compétences pour animer des soirées d’astronomie avec des instruments plus modestes pour des élèves de tout niveau.

1.3.2 Pédagogie expérimentale avec le SCIRE

J’ai participé à un programme de pédagogie expérimentale organisée l’association SCIRE et la mairie de Gennevilliers. Avec deux animateurs, nous avons accompagné de jeune élève (CE1/CE2) dans une démarche d’auto-apprentissage à l’aide de l’outil numérique. Réunis par groupe 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 leurs âges (explication des éclipses et des saisons à l’aide de maquette, 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 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 bloquent 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 par une nuit noire et sans Lune). De l’autre, 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 flashes lunaires) ou encore l'atmosphère terrestre (il produit alors un phénomène lumineux dans l'atmosphère : un météore, d'où leur nom). L'ordre de grandeur la taille des météoroïdes (c'est à dire l'extension de cette zone aveugle) est comprise entre $30\mu\text{m}$ et 1m . Bien sur, 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 si ceci sont proches de la Terre, la limite pour les objets de la ceinture de Kuiper, située au delà de Neptune, est bien plus haute.

Avec les découvertes de 1I/'Oumuamua le 19 octobre 2017 et de 2I/Borissov 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 a remis en lumière un vieux dossier de la physique des météores : parmi les météores qu'on observe sur Terre, certains sont-ils issus du milieu interstellaire ? Et si oui, en quelle proportion ?

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 (vitesse de libération de la Terre) et 72km/s (vitesse maximale à laquelle un objet provenant du système solaire peut croiser la Terre).

Les énergies en jeu sont énorme : 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 principale des roches) n'est *que* de 13.7 MJ/kg .

Durant une rentrée atmosphérique, cette énergie va changer de forme via une multitude de processus. Il y a bien sur la ionisation et 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 vaporisée et ionisée. Par ailleurs, le météoroïde se disloque : il va perdre des fragments. La taille de ses 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 survécus à la rentrée atmosphérique (s'il y en a) tombent alors vers le sol sous l'effet de la gravité.

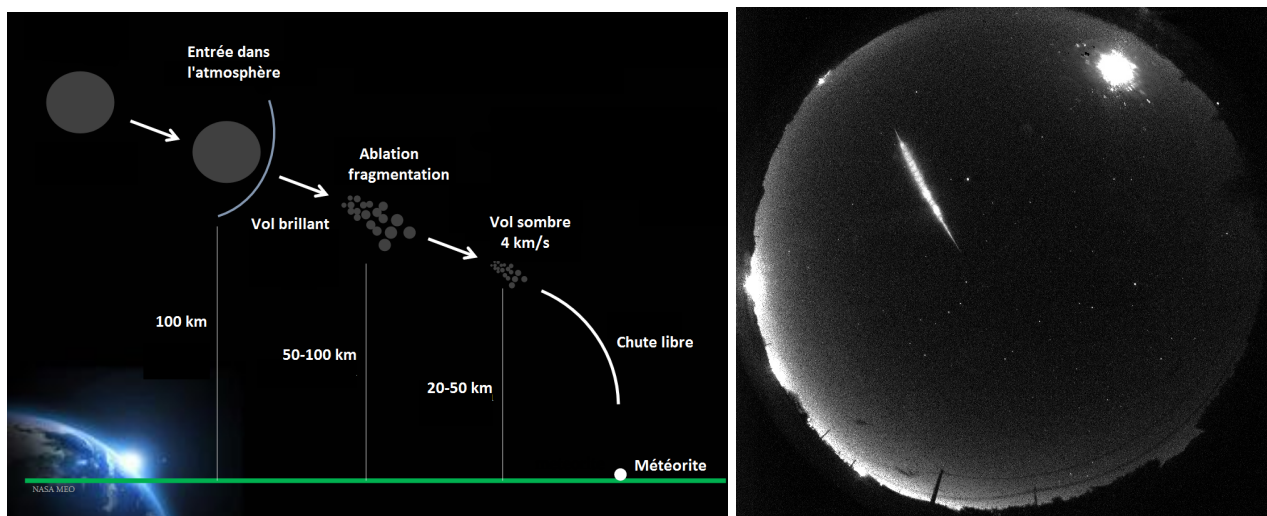


FIGURE 2 – Gauche : Représentation schématique d'un météore, de l'entrée dans l'atmosphère du météoroïde jusqu'à la météorite. Droite : météore observé par une caméra FRIPON

2.2 Une modélisation simple

Une modélisation réaliste d'un météore est 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, sa structure interne (est-il d'un seul bloc, ou possède-t-il des faiblesses structurelles?), etc.

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 située à plusieurs dizaines voir centaines de kilomètres de distance. Dans le cas de FRIPON, on parle de caméra grand angle ayant une précision angulaire de l'ordre de 2.5 minutes d'arcs et une fréquence de 30 images par seconde. Pour un météore situé à 100 km de distance, cela nous engendre une imprécision de l'ordre de 60 mètres. Par ailleurs, si le météore se déplace à 11 km/s, il parcourt 370 mètres entre deux images. Cette distance monte à 2400 mètres s'il se déplace à 72 km/s : le flou cinétique est donc une des principale limitation à l'observation vidéo des météores.

Pour toute ses 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. 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 rendant ce temps :

$$M \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_{atm} c_d S V^2 \quad (1)$$

On suppose également que la quantité de matière perdue par le météoroïde est proportionnelle à l'énergie cinétique de l'air incident :

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_{atm} \frac{c_h}{H} S V^3 \quad (2)$$

Où H est l'enthalpie de destruction du météoroïde (en J/kg), c_d et c_h des coefficient d'efficacité, et S la surface que le météoroïde présente au flux d'air incident. Pour résoudre ce système, 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 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 :

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

Ainsi qu'une équation d'évolution du système :

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

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} A \rho_{atm} V^2 \exp \left(\frac{0.5 V_0^2}{Q} \left(1 - \frac{V^2}{V_0^2} \right) \right) \quad (6)$$

Ce modèle dynamique peut être ramené à trois paramètre : la vitesse initiale V_0 , un facteur $A = \frac{c_d S_0}{M_0}$, et un facteur $Q = \frac{c_d H}{c_h (1 - \mu)}$.

Essayons de voir ce que représente ces facteurs. Le paramètre A peut être ré-écrit $A = \frac{c_d F}{\rho \mathcal{V}_0^{1/3}}$, où F est un facteur de forme (sans dimension), ρ la densité du météoroïde et \mathcal{V}_0 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/m^3 pour du matériel cométaire jusqu'à plus de 7000 kg/m^3 pour des météoroïdes métalliques.

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.

2.2.1 Activité pédagogique

Nous présentons aux élèves un [code python](#) permettant de simuler un météore selon ces paramètres. Le code renvoie un graphe présentant l'évolution de la vitesse et de la masse du météoroïde en fonction de l'altitude.

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 rapport 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.

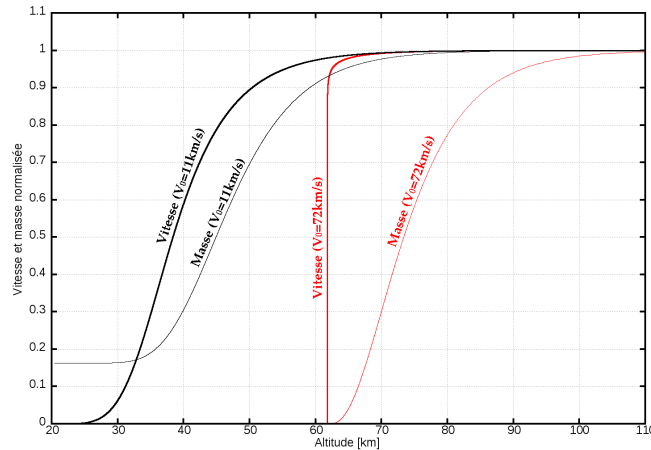


FIGURE 3 – Evolution de la vitesse et de la masse d'un météore de paramètre $A = 240 \text{ cm}^2/\text{kg}$ et d'enthalpie $Q = 100 \text{ MJ/kg}$ entrant verticalement dans l'atmosphère.

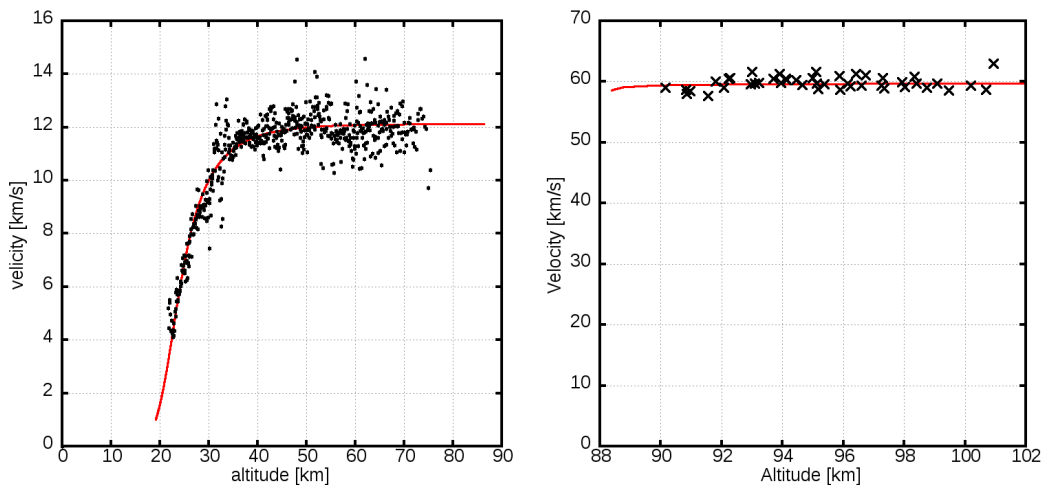


FIGURE 4 – Données provenant de deux météores réels : l'un lent (12 km/s) et l'autre rapide (60 km/s). Les lignes rouges correspondent à la modélisation.

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/m^3 et une masse de 11000 tonnes. Simulez ce météore (on prendra $Q = 55\text{MJ/kg}$, $c_d F = 2$ 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 ? Que ce serait-il produit si le météoroïde était rentré dans l'atmosphère verticalement plutôt qu'avec un angle de 18° ?**

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.

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 filante que nous admirons les nuits août, jusqu'à l'astéroïde frappant la Terre, en passant par les météores produisant des météorites ou 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 tracés sur 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.

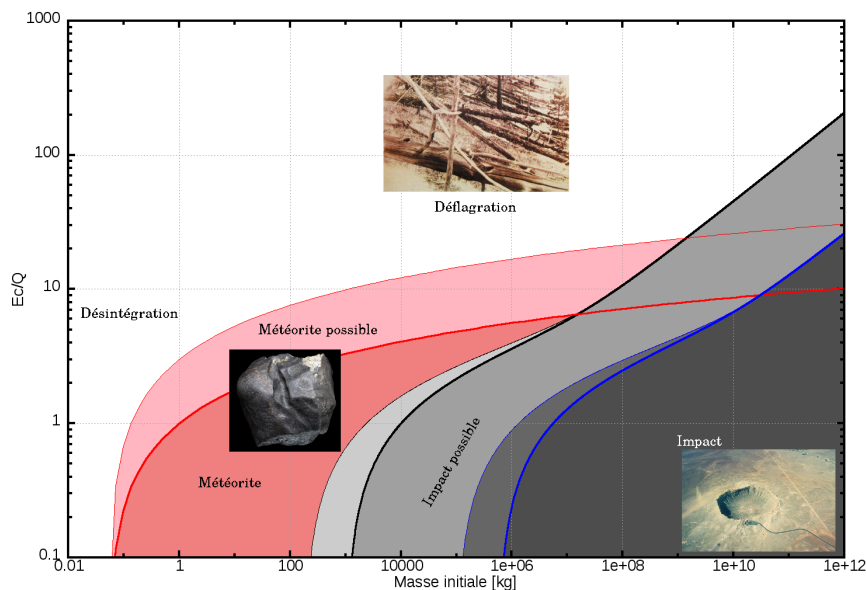


FIGURE 5 – Les ligne rouge représente les frontières de survit d'une météorite de 50g pour un paramètre de changement de forme μ de 0.66 (ligne épaisse) et de 0 (ligne fine). Les lignes noirs et bleus indiquent les limites d'un impact à plus d'1km/s pour un météore entrant verticalement (noir) ou avec en angle de 7° (bleu), et une vitesse initiale de 11km/s (épais) et 72 km/s (fin)

3 D'où proviennent les météoroïdes ?

3.1 Carte des radiants

Un météore dessine une ligne quasiment droite dans l'atmosphère. Par effet de perspective, prolonger cette droite pointe une direction dans ciel. Il est donc possible de dessiner une carte des météores, du la même manière que nous dessinons une carte du ciel.

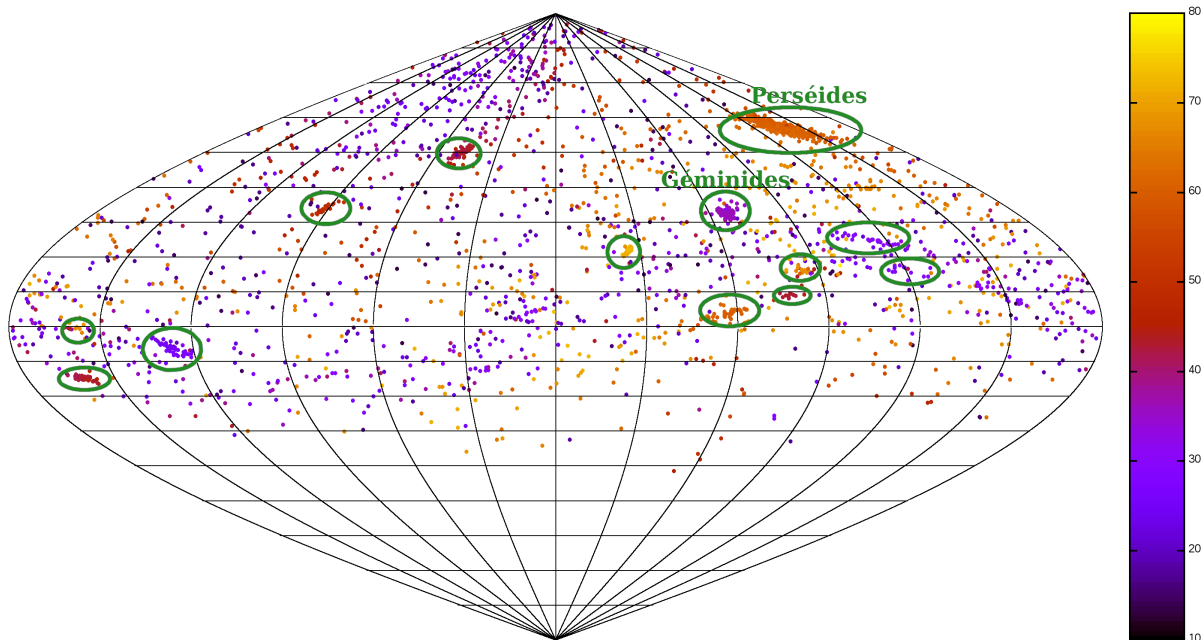


FIGURE 6 – Carte des radiants de météores observés par FRIPON sur une période de 3 ans (projection équatoriale). La couleur désigne la vitesse des météores. Les pluies de météores sont entourées.

La première chose remarquable sur ce type de carte, c'est que les météores ne sont pas répartis uniformément. Certains forment des "paquets" de météores dont les radiants et les vitesses sont proches. Il s'agit des pluies d'étoiles filantes, dont les plus importantes sont les géminides, visibles le soir en décembre, et les perséides, visibles tôt le matin en août.

Les autres météores semblent à première vue se répartir uniformément sur la voute céleste. On remarque tout de même un certain motif. Des météores lents semblent provenir de d'une bande légèrement inclinée par rapport à l'équateur : il s'agit du plan l'écliptique. Un autre groupe de météore lent semble provenir du pôle nord écliptique : il s'agit de la source toroïdale Nord. Ces météores lents sont reliés à la ceinture d'astéroïde entre Mars et Jupiter. Les météores plus rapides semblent se répartir à peu près uniformément. Ils sont liés aux centaures et à la ceinture de Kuiper.

3.2 Origine dans le Système Solaire

Connaissant la trajectoire et la vitesse initiale d'un météore, il est facile de calculer l'orbite du météoroïde avant son entrée dans l'atmosphère.

Pour connaître à quelle région de l'espace les météores sont rattachés, on a envie de 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 (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 montré en figure [7].

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. Il s'agit d'une résonance instable : les objets entrant dans cette résonance voit leurs excentricités augmenter régulièrement, les faisant pénétrer de plus en plus

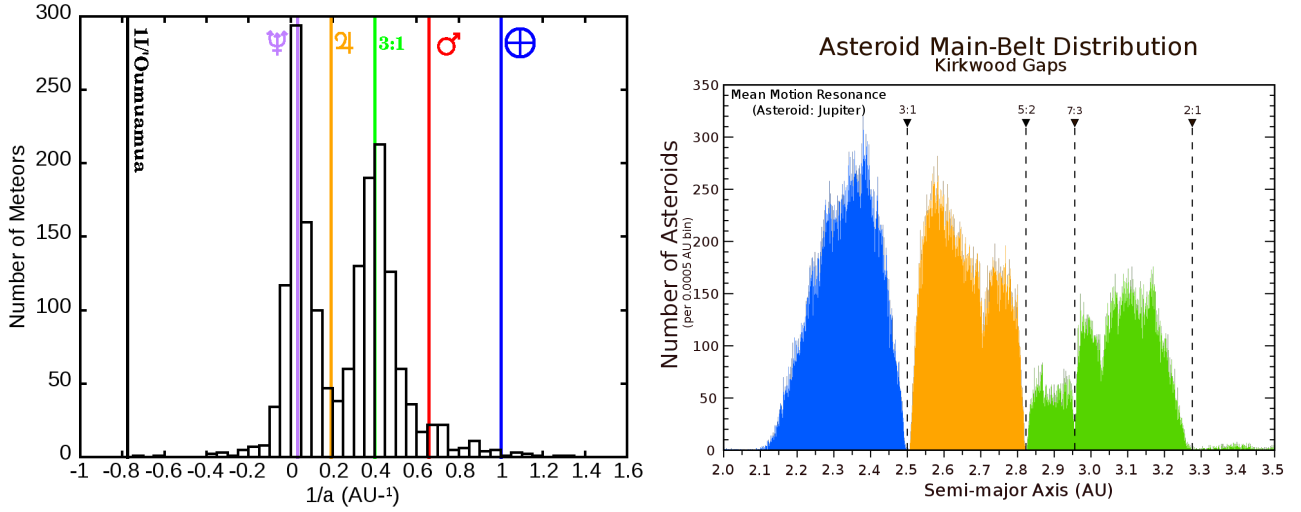


FIGURE 7 – Gauche : Histogramme de l'inverse des demi-grands axes des météorites sporadiques observés par FRIPON. Les demi-grand axe de la Terre, de Mars, de Jupiter, de Neptune, ainsi que la résonance 3 :1 avec Jupiter sont indiqués. Droite : structure de la ceinture principale d'astéroïde.

profondément dans le Système Solaire interne. Cette résonance est la principale source de NEOs (Near Earth Objects).

Le deuxième pic correspond à des météoroïdes provenant du système Solaire externe. Il comprend à la fois des centaures (nom donnée 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.

3.3 Météore interstellaire : le bigfoot de l'astronomie

Certains météoroïdes semblent avoir des demi-grand axe négatifs, c'est à dire qu'ils ne semblent pas être reliés 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 sur négative. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette population de météoroïdes dont les demi-grand mesurés sont négatif. Premièrement, il y a l'incertitude sur l'inverse du demi-grand axe. Si celui-ci vaut, par exemple, -0.1 ± 0.2 , 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 *proche* 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 (-0.78ua^{-1}) et 2I/Borisov (-1.17ua^{-1}). Cela donne l'impression que, plutôt qu'à des météoroïdes d'origine interstellaire, nous avons affaire à des météoroïdes dont les demi-grands axes sont sous-estimés. Et c'est effectivement le cas. Cela vient du fait que la vitesse mesurée est sur-estimée pour les météores les plus rapides, ce qui entraîne une sous-estimation de leurs demi-grands axes. 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 les météores les plus 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 qu'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 \widehat{A}_{χ^2} est supérieur à la valeur réel de A : l'estimateur est biaisé. Cela entraîne également la sur-estimation de l'estimateur de la vitesse : surestimer A signifie surestimer la vitesse

perdu 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}_{χ^2} et $\widehat{V}_{A=0}$, l'un surestimé et l'autre sous-estimé, nous offre une fourchette : ils nous donnent donc une clé d'interprétation de nos mesures.

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

Nous avons représenté sur la figure [8] ces deux estimateurs pour l'excentricité d'un échantillon de météores. Si l'estimateur \widehat{e}_{χ^2} , surestimé, indique qu'une part non négligeable des météoroïdes ont des excentricités supérieures à 1 de plusieurs fois leurs écart-types. 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}_{χ^2} .

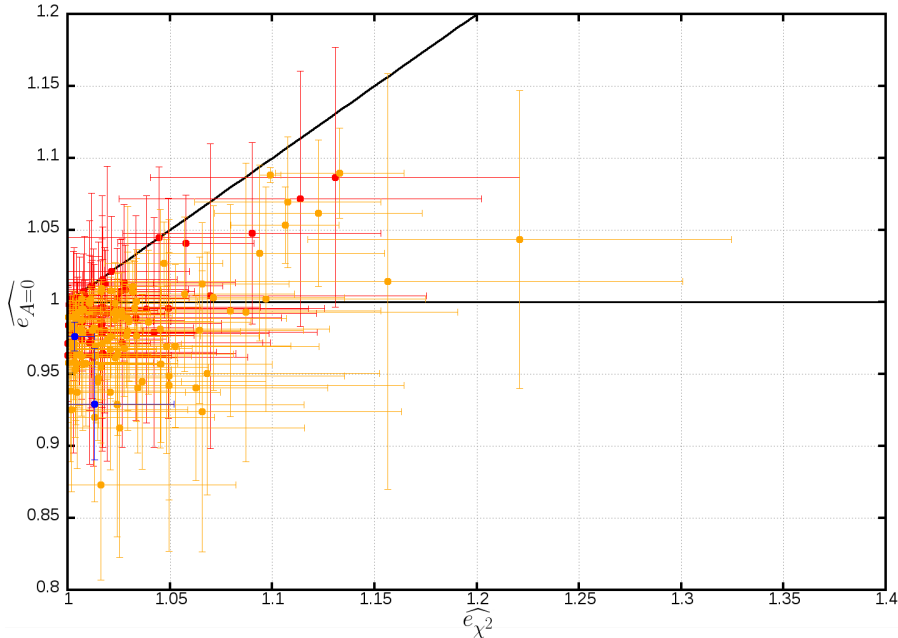


FIGURE 8 – Représentation des estimateurs de l'excentricité \widehat{e}_{χ^2} (surestimé) et $\widehat{e}_{A=0}$ (sous-estimé) d'un échantillon de météoroïdes potentiellement interstellaires. La couleur indique un degré de fiabilité de l'estimateur \widehat{e}_{χ^2} (de mauvais pour les points rouges 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 sporadiques analysés ici, seuls une poignée ont des excentricité très supérieure à 1 pour les deux estimateurs. Ce sont par conséquent les candidats les plus sérieux de météoroïdes d'origine réellement interstellaire. Nous avons vérifié chaque uns d'entre eux individuellement. Ils 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-terrestre ou de cryptides, nos vidéos de météore interstellaires sont systématiquement flous !

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 leurs observations. Dans l'état actuel des choses, nous ne pouvons que donner une valeur supérieur à la quantité de météoroïdes interstellaires tombant sur Terre.