

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES MATHÉMATIQUES À FINALITÉ DIDACTIQUE

Un nouvel objet interstellaire, 2I/Borisov

MATHOT, Cécile

Award date:
2022

Awarding institution:
Universite de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



UNIVERSITE DE NAMUR

Faculté des Sciences

UN NOUVEL OBJET INTERSTELLAIRE, 2I/BORISOV

**Mémoire présenté pour l'obtention
du grade académique de master en « Sciences Mathématiques à finalité didactique »**

Cécile MATHOT
Promotrice : Anne LEMAITRE

Juin 2022

Remerciements

« Les gens réussissent rarement s'ils n'ont pas de plaisir dans ce qu'ils font. » – Dale Carnegie

Tout d'abord, je tiens à remercier Madame Anne Lemaitre, promotrice de ce mémoire, pour sa disponibilité, ses conseils, sa patience, ses encouragements multiples et surtout pour sa bienveillance. Merci à elle de m'avoir acceptée comme dernière mémorante, d'avoir acceptée d'adapter ce mémoire à la finalité didactique de mon master et d'avoir su me guider, me conseiller et me corriger tout au long de ce mémoire.

Ensuite j'aimerais remercier Madame Valérie Henry, Messieurs André Fuzfa et Alexis Coyette, d'avoir accepté de faire partie de ce jury ainsi que pour le temps consacré à la lecture de ce mémoire.

« Tous nos rêves peuvent devenir réalité si nous avons le courage de les poursuivre. » - Walt Disney

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du corps enseignant que j'ai pu rencontrer tout au long de mon parcours universitaire et tout particulièrement ;

- Monsieur Joseph Winkin pour avoir cru en moi tout au long de mes études ;
- Monsieur André Fuzfa pour m'avoir donné le goût de l'astronomie durant ce stage d'astronomie à la ferme des étoiles à Toulouse ;
- Madame Valérie Henry pour m'avoir aidée et conseillée tout au long de ma formation en didactique ;
- Madame Annick Sartenaer pour m'avoir écoutée, aidée et soutenue lorsque j'en avais le plus besoin.

« Pour moi la plus grande richesse est d'avoir une bonne santé et une famille unie. » - Lume

Je remercie également ma famille de m'avoir soutenue du début de mes études jusqu'à la fin. Merci d'avoir toujours cru en moi et en mes capacités. Merci pour l'ensemble des sacrifices que vous avez faits afin de me permettre d'en arriver là où je suis maintenant.

« Un ami, c'est quelqu'un qui te connaît tel que tu es, qui comprend qui tu as été, qui accepte ce que tu es devenu, et encore, qui te permet de te développer. » - William Shakespeare

J'en viens maintenant à vous, Anthony, Céline et Rachel, mes amis, vous qui avez été présents pendant les périodes les plus sombres. Je ne vous remercierai jamais assez pour tout ce que vous avez fait pour moi. Une oreille pour écouter, une épaule pour pleurer, une main tendue pour me relever, vous avez été tout cela en même temps. Je pense que la vie est faite de rencontres qui vous changent à tout jamais et c'est pour cela que je peux dire que j'ai de vrais amis !

Je remercie également Tim, Valérie, Marie V., Mathilde et Marie A. pour ces années de kot et ces parties de plaisirs passées ensemble.

Je remercie également Mr Blanquet et Mathilde, son âme damnée (pour reprendre ses mots), pour le soutien qu'ils ont su m'apporter ces derniers mois.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui auront relu ce mémoire que ce soit pour l'orthographe, la pertinence ou encore l'aspect didactique.

Résumé

2I/Borisov a été découverte le 30 août 2019 par l'astronome Guennadi Borisov. L'objet a rapidement été classifié de première comète interstellaire de par son comportement à l'approche du Soleil (apparition d'une queue de poussière orientée dans le sens opposé au Soleil) et à sa trajectoire. Cette comète est une opportunité pour le monde scientifique d'en apprendre davantage sur l'Univers qui nous entoure. Le but de ce mémoire est de vulgariser les différentes notions permettant de comprendre les similitudes et les différences entre 2I/Borisov et les comètes du Système solaire.

Dans ce travail, nous allons détailler ce qu'est une comète avant de décortiquer quatre articles scientifiques différents permettant ainsi de faire les liens entre la théorie sur les comètes du Système solaire et les observations faites sur la comète interstellaire.

Le premier reprendra l'ensemble des observations et informations relatives à 2I/Borisov en 2019 comme son origine, sa composition, sa trajectoire ou encore sa morphologie. Le second portera sur la photométrie de 2I/Borisov qui nous donne des indices sur la composition cette dernière. Le troisième nous donne la taille de la queue ainsi que la position de l'axe de rotation. Enfin, le dernier nous parle de l'explosion subie par la comète lors de son passage dans notre Système solaire et de ses conséquences sur le noyau.

Mots-clés : comète, interstellaire, 2I/Borisov, origine, trajectoire, composition, explosion, chevelure, morphologie.

Abstract

2I/Borisov was discovered on August 30, 2019 by the astronomer Gennady Borisov. The object was quickly classified as the first interstellar comet due to its behavior when approaching the Sun (appearance of a dust tail facing away from the Sun) and its trajectory. This comet is an opportunity for the scientific world to learn more about the Universe that surrounds us. The goal of this Master thesis is to popularize the various concepts allowing to understand the similarities and the differences between 2I/Borisov and the comets of the Solar System.

In this work, we are going to detail what a comet is before dissecting four different scientific articles allowing to make the links between the theory on the comets of the Solar System and the observations made on the interstellar comet.

The first one will resume all the observations and information related to 2I/Borisov in 2019 like its origin, its composition, its trajectory or its morphology. The second one will deal with the photometry of 2I/Borisov which gives us clues on its composition. The third one gives us the size of the tail and the position of the rotation axis. Finally, the last one tells us about the explosion undergone by the comet during its passage in our Solar System and its consequences on the nucleus.

Keywords : comet, interstellar, 2I/Borisov, origin, trajectory, composition, outburst, coma, morphology.

Table des matières

1	Introduction	7
2	Les comètes du Système solaire	10
2.1	Un petit peu d'histoire...	10
2.2	Les orbites	13
2.3	Origine des comètes	13
2.3.1	La ceinture de Kuiper	14
2.3.2	Nuage de Oort	16
2.4	Les différentes familles de comètes	17
2.5	Morphologie des comètes	19
2.5.1	Le noyau des comètes	19
2.5.2	La chevelure de la comète	19
2.5.3	Les queues	21
3	2I/Borisov - De sa découverte à Juin 2020	25
3.1	Nature	25
3.2	Origine et trajectoire	26
3.3	Éléments orbitaux	26
3.4	Taille et masse	26
3.5	Composition et origine	29
3.6	Liste des rencontres les plus proches de 2I/Borisov	31
3.7	Éphémérides	31
4	De juin 2020 à maintenant	35
4.1	Un portrait couleur de la chevelure de 2I/Borisov	35
4.2	Morphologie de la queue de poussière de 2I/Borisov	40
4.3	Explosion et fragmentation de la comète interstellaire	42
5	Conclusion	44
A	Lexique	47

Chapitre 1

Introduction

Face à l'immensité de l'univers qui l'entoure, l'être humain n'est que curiosité. En effet, l'homme est à la fois intrigué et fasciné par ce qui l'entoure depuis la nuit des temps. Il est toujours dans le besoin de comprendre et de trouver une certaine logique à chaque événement ou phénomène qui se produit. C'est d'autant plus vrai pour tout ce qui se passe juste au-dessus de sa tête, dans le ciel ou encore dans l'espace. Cela s'est d'abord traduit par des dessins retrouvés sur les murs de certaines grottes et dans des archives retrouvées dans des sépultures. Encore aujourd'hui, nous ne pouvons pas dire que l'ensemble des corps, petits ou grands, sont répertoriés dans nos bases de données. Il existe une telle infinité d'astres, dans le Système solaire ou non, qu'il serait impossible de tous les répertorier.

Nous savons que l'univers ne s'arrête pas au Système solaire ou à la Voie Lactée ou encore à ce qui a déjà été étudié. Il s'avère qu'il nous reste encore beaucoup à apprendre sur celui-ci. Une manière de le faire est d'étudier les astres, qui ont une autre origine que le Système solaire, qui ont pu, peuvent et pourront traverser ce dernier.

En 2017, un premier objet interstellaire a été détecté dans notre Système solaire. D'abord caractérisé de comète, ensuite d'astéroïde, les scientifiques le nommeront 1I/Oumuamua (FIGURE 1.1). Les scientifiques savaient qu'1I/Oumuamua avait une origine interstellaire de par sa vitesse impressionnante au périhélie (87,3 km/s) et sa trajectoire. Étant donné qu'il a été découvert le 19 octobre 2017, après son passage au périhélie (le 9 septembre 2017), les scientifiques n'ont eu que peu de temps pour en déceler toutes les informations permettant d'en apprendre davantage sur son origine.



FIGURE 1.1 – Vue d'artiste de 1I/Oumuamua.

Ce n'est que deux ans plus tard, le 30 août 2019 qu'un deuxième objet inconnu des bases de données est détecté. En effet, c'est ce jour-là que l'astronome amateur ukrainien Guennadi Borisov a observé pour la première fois l'objet céleste, qui sera nommé 2I/Borisov. Il utilisait un télescope de 0.65 mètre d'ouverture qu'il avait construit de ses mains pour scruter le ciel quand il fut intrigué par un étrange point lumineux. Il décrivit alors sa découverte comme suit :

« Je l'ai observé le 29 août, mais c'était le 30 août GMT. J'ai vu un objet qui bougeait dans le champ, il se déplaçait dans une direction qui était légèrement différente de celle des astéroïdes principaux. J'ai mesuré ses coordonnées et consulté la base de données du Centre des Planètes Mineures (MPC). Il s'avéra qu'il s'agissait d'un nouvel objet. J'ai alors mesuré la probabilité que ce soit un objet proche de la Terre, calculée à partir de plusieurs paramètres, et il s'avéra qu'elle était de 100 % — autrement dit, cet objet était dangereux. Dans ce genre de cas, je dois immédiatement publier les paramètres sur la page web mondiale de confirmation des astéroïdes dangereux. Je les ai publiés et ai écrit que l'objet était diffus et qu'il n'était pas un astéroïde, mais une comète. »¹

Après sa découverte, il se mit à calculer la trajectoire de cet étrange objet, et après avoir refait de nombreuses fois ses calculs, il conclut que celui-ci n'était pas originaire de notre Système solaire. Après quelques jours, il fit part de sa découverte ainsi que de ses calculs à l'Union Astronomique Internationale (IAU). Ce n'est que le 11 septembre 2019 que l'annonce d'un nouvel objet interstellaire a été publiée.

Comme 2I/Borisov a été détectée bien avant son périhélie, le monde scientifique a eu plus de temps pour récolter un maximum de données afin d'en comprendre à la fois son origine, sa composition et bien d'autres caractéristiques. Grâce à cela, nous pourrions en apprendre davantage sur la composition ou son lieu d'origine et pouvoir comparer avec ce que nous connaissons déjà, c'est-à-dire notre Système solaire.

Dans la continuité de ma formation en didactique, nous avons décidé, d'un commun accord avec ma promotrice Madame Lemaitre, que le but de ce mémoire serait de vulgariser le sujet de 2I/Borisov. Autrement dit, de rendre l'ensemble des notions autour de cette comète interstellaire compréhensible au grand public ayant des bases de physique.

Dans cette optique, nous allons commencer par comprendre ce qu'est une comète dans le premier chapitre afin d'avoir en mémoire toutes les informations requises pour pouvoir comparer, par la suite, 2I/Borisov avec les comètes connues et répertoriées de notre Système solaire.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons un premier article *Early observations of the Interstellar Comet 2I/Borisov* [19], écrit par Lee Chien-Hsiu. Dans celui-ci, nous pourrions avoir une approche des premières observations obtenues sur 2I/Borisov comme sa nature, son origine, sa trajectoire, son origine, sa composition, sa taille et sa masse.

1. Traduction provenant du site [33]

Dans le dernier chapitre, nous décortiquerons trois autres articles ; *A colour portrait of the interstellar comet 2I/Borisov* [23] de E. Mazzotta, *Interstellar comet 2I/Borisov exhibits a structure similar to native Solar system comets* [21] de F. Manzini et *Outburst and splitting of Interstellar Comet 2I/Borisov* [13] de David Jewitt portant, respectivement, sur l'étude photométrique de la comète interstellaire, sur l'étude de la morphologie de la queue de poussière de cette dernière et d'un phénomène d'explosion qui s'est produit en son sein durant son voyage dans notre Système solaire.

Chapitre 2

Les comètes du Système solaire

Dans ce chapitre, nous allons parcourir l'ensemble des caractéristiques des comètes. Nous commencerons par rappeler l'histoire de ces petits corps lumineux avant de nous intéresser à leur trajectoire, à leur origine, aux différents types de comètes et à leur structure bien particulière. Ces notions seront indispensables pour la compréhension des chapitres suivants, dans lesquels nous tenterons d'en savoir plus sur 2I/Borisov et surtout en quoi celle-ci diffère ou non des comètes de notre Système solaire.

2.1 Un petit peu d'histoire...

Commençons par retracer les premières apparitions des comètes¹. Lors des fouilles archéologiques du site de Mawangdui, en Chine, entre 1972 et 1974, un tombeau datant du IV^{ème} siècle av. J.-C a été découvert comportant trois tombes ainsi qu'à peu près 3000 objets. Parmi ces tombes se trouvait la sépulture de la non moins connue marquise de Dai (marquis : titre donné aux guerriers de l'époque de la dynastie de Han) pour son très bon état de conservation malgré son grand âge. Dans cette collection d'objets se trouvait notamment un livre de soie (FIGURE 2.1) où sont représentées 29 catégories de comètes, premières traces écrites sur les apparitions de ces astres lumineux dans le ciel.

Au cours du VII^{ème} siècle, les Chinois avaient déjà compris que les comètes ne brillaient pas grâce à une lumière qui leur était propre, mais plutôt grâce au fait que les rayons du Soleil viennent se réfléchir sur celles-ci, les rendant ainsi lumineuses. Ce qui constituait, pour eux, le premier lien entre le Soleil et les comètes. Par la suite, ils constatèrent un autre lien, la queue. En effet, la queue des comètes, contrairement à ce que nous pourrions croire est dirigée dans le sens opposé au soleil, comme illustrée par la FIGURE 2.2, et non dans le sens opposé du mouvement, le long de l'orbite.

Auparavant, les comètes étaient le signe de présages, bons ou mauvais. Par exemple, les Anglais ont vu le passage, en 1066, de la comète de Halley comme le présage de la défaite du roi Harold II (roi d'Angleterre de l'époque) face à Guillaume le Conquérant durant la bataille de Hastings. La tapisserie de Bayeux présentée à la FIGURE 2.1 représente la scène de l'apparition de la comète de Halley juste avant la bataille. Cette comète est sans doute la comète la plus célèbre. Elle est périodique d'une période de 76 ans.

1. À l'aide des sources suivantes : [22], [31], [5]



FIGURE 2.1 – À gauche se trouve un morceau du livre de soie, découvert en 1974, contenant les annales chinoises. Cette représentation reprend notamment les plus anciennes traces du passage des comètes. Il daterait du IV^{ème} siècle av. J.-C.. À droite se trouve une tapisserie de Bayeux représentant le passage de la comète de Halley, présage de la victoire de Guillaume le Conquérant durant la bataille de Hastings en 1066. | Sources : [2], [7]

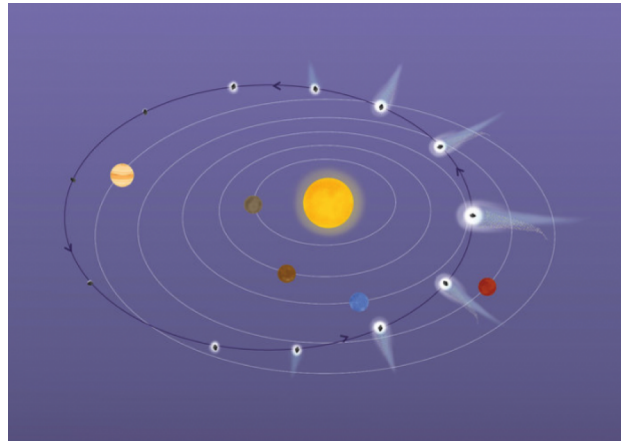


FIGURE 2.2 – Les queues des comètes, connues à ce jour, sont toujours dirigées dans le sens contraire au soleil. | Source : [16].

Les premières interprétations des comètes sont apparues chez les Grecs avec Démocrite (460-370 av. J.-C). Pour lui, il est possible de comparer les comètes à de petites planètes et leur chevelure à une erreur de perception. Puis vint le tour d'Aristote. Compte tenu du fait qu'à cette époque, le modèle géocentriste était prôné et que le monde pensait que la Terre était fixe et que les autres astres tournaient autour de celle-ci, ce dernier pensait que les comètes étaient plutôt des phénomènes météorologiques qui se produisaient dans l'atmosphère. Il est à noter que jadis, on pensait que le monde qui se trouvait au-dessus de la Terre était parfait. Ce dernier était aussi appelé monde sublunaire. Étant donné que, pour eux, les comètes n'étaient pas parfaites, en raison de leur forme et durée de vie non prévisible, il soutenait l'idée que celles-ci devaient forcément être des phénomènes liés à la Terre.

Cette pensée persistera à travers les époques et ce jusqu'au $XVI^{ième}$ siècle, au moment de la Renaissance, où l'étude scientifique des comètes prendra une tout autre ampleur. En 1472, Regiomontanus (1436 - 1553) fut le premier scientifique à mesurer le diamètre angulaire de plusieurs comètes. Le diamètre angulaire (FIGURE 2.3) est utilisé dans l'étude soit pour de petits objets (de l'ordre de moins de quelques centaines de microns), soit pour de très grands objets. Par exemple : les comètes. Il est différent du diamètre classique d'un objet puisque c'est l'angle représentant le rapport entre le diamètre de l'objet et la distance observateur-objet. En 1531, les chercheurs allemands Fracastor (1483 - 1553) et Bienewitz (1495 - 1552) ont émis l'hypothèse que les queues des comètes étaient composées d'une matière nébuleuse sublimée sous l'effet du Soleil. Cela explique que les Chinois avaient remarqué, 700 ans auparavant, que celles-ci étaient dirigées dans le sens opposé non pas à la trajectoire du mouvement de la comète, mais bien au Soleil.

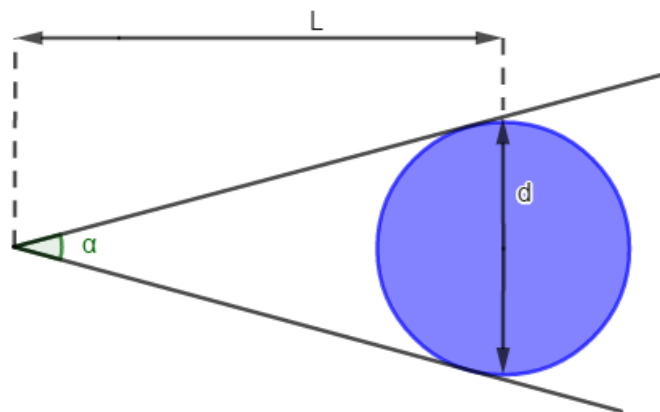


FIGURE 2.3 – Le diamètre angulaire est différent du diamètre classique. Nous pouvons le calculer (en radian) à l'aide la formule suivante $\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{d}{2L}\right) \approx \frac{d}{L}$ si l'angle est petit, où d est le diamètre de l'objet et L la distance entre l'observateur et l'objet. | Figure réalisée sur GEOGEBRA.

En 1577, le célèbre astronome danois Tycho Brahé (1546 - 1601) a mesuré la distance entre la Terre et une comète. Ceci a permis de se rendre compte que les comètes n'étaient pas des phénomènes terrestres. En effet, ces mesures montrent que les comètes se situent à une distance quatre fois plus grande que la distance Terre-Lune. Par la suite, l'astronome Johannes Kepler (1571 - 1630) reprit les travaux de Brahé dans son ouvrage "*De cometis*", mais rajouta ses hypothèses sur les trajectoires des comètes. Il présuma que celles-ci étaient rectilignes, mais avec des vitesses non constantes.

Le non moins célèbre physicien, mathématicien et astronome Isaac Newton (1642 - 1727) admit dans son traité "*philosophiae Naturalis*" que les comètes possédaient une masse. Par conséquent, au même titre que les planètes géantes, celles-ci devaient donc obéir aux lois de la mécanique. Grâce aux lois de Newton, l'astronome Edmund Halley (1656 - 1742) démontra que les comètes respectaient une certaine périodicité. En effet, il fit le calcul de la trajectoire de 24 comètes. Ces travaux lui ont permis de mettre en évidence leur périodicité, mais également leur orbite elliptique. Ceux-ci expliquaient le

fait que la comète revenait toutes les dizaines, centaines et milliers d'années aux alentours du Soleil.

2.2 Les orbites

Autour du Soleil se trouvent des milliers d'orbites différentes. Pour distinguer chacune de celles-ci, nous les avons caractérisées par 6 paramètres² (représentés à la FIGURE 2.4) :

- T le moment du passage au périhélie ;
- ω angle (en degré) entre la direction du nœud ascendant et celle du périhélie ;
- Ω angle compris entre la ligne des nœuds et la direction du point vernal ;
- i inclinaison du plan orbital par rapport au plan éclipstique ;
- a demi-grand axe (en ua) ;
- e excentricité.

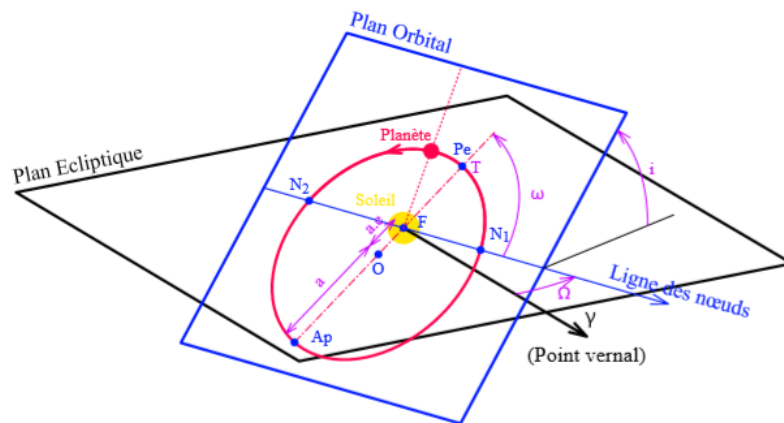


FIGURE 2.4 – Cette représentation reprend chacun des 6 éléments orbitaux. De plus, nous retrouvons les notions de périhélie P_e , aphélie A_p , nœud ascendant N_1 et nœud descendant N_2 .| Source : [26].

L'excentricité nous donne une information sur la forme de l'orbite de l'astre comme le montre la FIGURE 2.5.

Comme nous pouvons le constater à la FIGURE 2.6, il est donc difficile de distinguer une orbite elliptique d'une orbite hyperbolique ou encore d'une orbite parabolique lorsqu'elles sont dans le voisinage de leur périhélie. Ce qui permet vraiment de faire la distinction, c'est leur vitesse quand elles sont au périhélie.

2.3 Origine des comètes

Afin d'introduire les deux grands "réservoirs" de comètes se trouvant autour de notre Système solaire nous utiliserons principalement la source [22]. Tous deux se comportent

2. Dans cette section, nous allons utiliser les sources suivantes : [22], [26]. L'ensemble des termes scientifiques se trouve dans le lexique de l'annexe A.

Orbite	Excentricité
Circulaire	0
Elliptique	$0 < \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} < 1$
Parabole	1
Hyperbole	$1 < \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}}$

FIGURE 2.5 – Formules pour calculer l'excentricité en fonction de la conique considérée où a est la longueur du demi-grand axe et b la longueur du demi-petit axe.

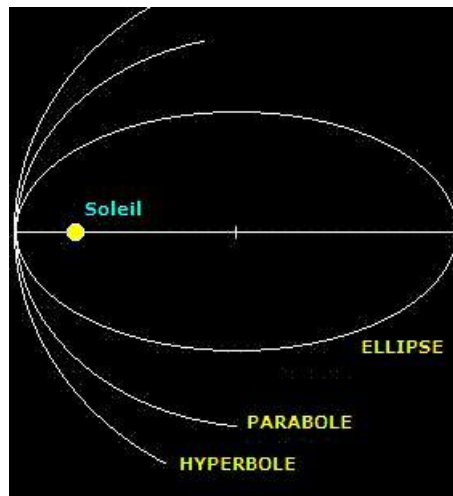


FIGURE 2.6 – Le passage au périhélie des différentes orbites que peut avoir une comète. | Source : [32]

comme sur la vue d'artiste de la FIGURE 2.7. La ceinture de Kuiper forme une sorte d'anneau et se situe au-delà de l'orbite de Neptune. Alors que le nuage de Oort forme une sphère autour de notre Système solaire.

2.3.1 La ceinture de Kuiper

D'après l'article de David Jewitt et de son étudiante Jane Luu [20], les comètes actives présentes dans notre Système solaire sont jeunes. Depuis leur naissance, elles attendent dans le réservoir cométaire, appelé nuage de Oort. La théorie de l'existence de cette sphère d'environ 100 000 ua proposée par Jan Oort, un astronome hollandais en 1950, expliquait le phénomène de comète à longue période (nous y reviendrons dans la section sur le nuage de Oort) mais pas celui des comètes à courte période. La première réflexion sur ces dernières était que celles-ci étaient à la base des comètes à longue période auxquelles les perturbations gravitationnelles des planètes géantes auraient réduit et aplati leur orbite. Comme cette théorie ne satisfaisait pas l'ensemble des scientifiques de l'époque, d'autres théories ont été proposées. En effet, dans un premier temps, en 1949, Edgeworth proposa une théorie prônant l'existence d'une ceinture aplatie à l'extrémité du Système solaire. Deux ans plus tard, Gérard Kuiper (1905 - 1973), un astronome hollandais, envisageait

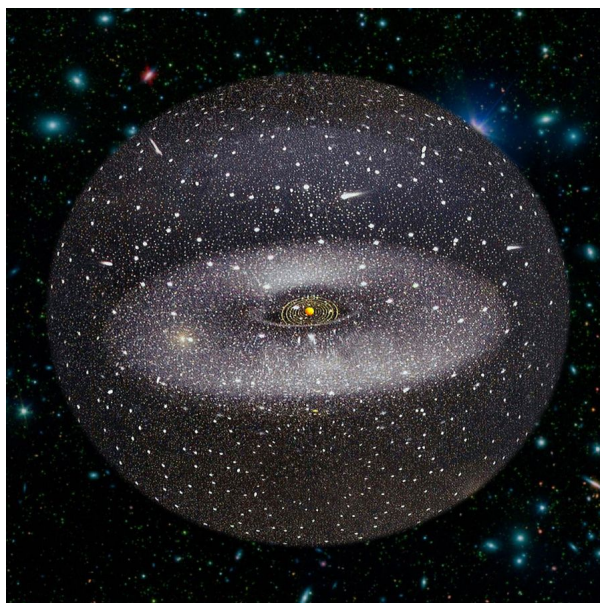


FIGURE 2.7 – Vue d’artiste représentant la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort. | Source : [18].

la même théorie que son prédécesseur, mais rajouta que cette ceinture ne devait pas s’arrêter subitement à l’orbite de Neptune. En effet, il proposa que cette ceinture, faite de matière cométaire datant de la formation des planètes, se situe après l’orbite de Neptune. Il affirma également que la densité de matière de cette ceinture n’était pas assez forte pour pouvoir agglomérer les planètes géantes à l’intérieur de celle-ci. En 1992, la découverte de QB1 (comète se situant dans la ceinture) par Jewitt et son étudiante Luu ainsi que les découvertes qui suivront, prouveront l’existence de cette ceinture portant le nom de ceinture de Edgeworth-Kuiper ou encore de ceinture de Kuiper.

Origine

La ceinture de Kuiper est formée de morceaux du disque protoplanétaire qui enveloppait anciennement le Soleil. Ces morceaux n’ont pas été agglomérés lors de la formation des planètes et ont simplement formé de petits corps célestes non lumineux. L’origine de cette ceinture reste encore aujourd’hui, malgré les modèles de formation des planètes, assez mal comprise. En effet, selon ces modèles la ceinture devrait avoir une masse jusqu’à 30 fois plus grosse que la Terre, or il a été observé que celle-ci ne fait qu’à peine $\frac{3}{1000}$ de la masse terrestre, ce qui représente une densité trop petite pour expliquer l’existence de ces petits corps célestes non lumineux.

Structure et résonances orbitales

La ceinture de Kuiper se situe entre 30 ua et 55 ua du Soleil. Les planètes géantes proches ont de l’influence sur celle-ci. En effet, la planète Neptune influence les orbites des objets se trouvant entre 40 et 42 ua, les rendant ainsi instables. Alors qu’entre 42 et 48 ua les orbites des corps célestes sont stables puisqu’elles ne ressentent plus l’influence de Neptune. On appellera cette zone ceinture classique de Kuiper, et les objets qui s’y trouvent cubwanos (représentation à la FIGURE 2.8). Parmi ceux-ci se trouve QB1 dé-

couvert en 1992 par Jewitt et son étudiante. La ceinture de Kuiper classique abrite deux types d'objets différents :

- les objets dynamiquement froids, reconnaissables par leur couleur très rouge, se seraient formés à leur position actuelle ;
- les objets dynamiquement chauds possèdent une couleur moins rouge que les objets dynamiquement froids, se seraient formés aux alentours de Jupiter et auraient été expulsés par les planètes géantes.

Ici froid et chaud ne font pas référence à la température, mais plutôt à sa vitesse relative.

La résonance permet, dans le cas de la ceinture de Kuiper, de stabiliser l'orbite et de protéger les objets célestes s'y trouvant des perturbations gravitationnelles causées par les planètes géantes. Par exemple, à la résonance 2 : 3, les objets célestes parcourent 3 révolutions autour du Soleil alors que Neptune n'en fait que 2. Elle se trouve à 47.7 ua et stabilise et protège les plutinos, ainsi que Pluton et ses lunes, de l'influence de Neptune (voir la FIGURE 2.8). Les plutinos possèdent un demi-grand axe $a \approx 39.4$ ua et ont des orbites qui croisent l'orbite de Neptune. Les objets se trouvant au niveau de la résonance 1 : 2 sont appelés twotinos. Il semblerait que la limite de la ceinture de Kuiper classique, aussi appelée falaise de Kuiper, se trouve juste après cette résonance, mais rien n'est confirmé, car cela pourrait être aussi le début d'une lacune. Il existe d'autres résonances comme 3 : 4, 3 : 5, 4 : 7 et 2 : 5. Ce sont les interactions gravitationnelles avec les planètes qui vont déterminer si une comète va soit rester dans la ceinture, soit être éjectée vers l'intérieur, vers le Soleil ou encore éjectée vers l'extérieur, vers le nuage de Oort.

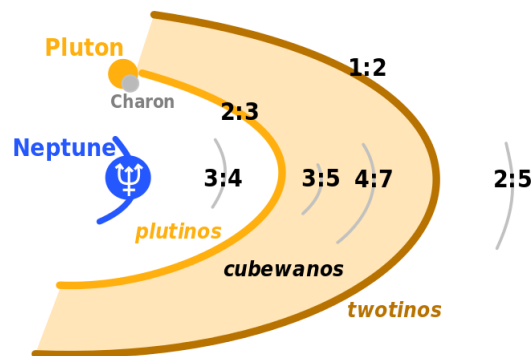


FIGURE 2.8 – Résonances orbitales entre la ceinture de Kuiper et Neptune. | Source : [17].

2.3.2 Nuage de Oort

Comme dit plus haut, en 1950, Jan Hendrik Oort³ (1900-1992) développa une théorie selon laquelle il existerait un nuage de petits corps situés au fin fond du Système solaire, aux alentours de 100 000 ua du Soleil (voir FIGURE 2.9). La vue d'artiste située à la FIGURE 2.7 nous donne une idée de la manière dont se comporte ce nuage. En effet, le nuage

3. Source : [3]

de Oort est de forme sphérique et englobe notre Système solaire, mais aussi la ceinture de Kuiper dont nous avons discuté juste avant.

Le nuage de Oort n'a jamais été observé. De ce fait, nous ne pouvons donner qu'une approximation du nombre d'objets qui le compose, notamment grâce à la fréquence d'apparition de "nouvelles" comètes. Les comètes de ce nuage se situent à la limite gravitationnelle de notre Système solaire, ce qui explique qu'elles ne sont que faiblement liées. Si elles se trouvaient un peu plus loin, alors elles ne subiraient plus forcément les effets du Soleil, mais ceux d'une autre étoile plus proche. Comme les comètes ne sont que peu liées, à la moindre perturbation, elles peuvent soit être éjectées vers l'extérieur de notre Système solaire soit être envoyées vers le Soleil. Dans ce cas, elles nous apparaîtront comme de "nouvelles" comètes.

Étant donné que les comètes sont des objets composés d'eau glacée ayant une température de l'ordre de -250°C (dans le nuage de Oort), lorsqu'elles sont proches du Soleil, elles perdent presque quelques dizaines de tonnes d'eau par seconde. Mais comme les comètes du nuage de Oort, elles ont un demi-grand axe a très grand et donc une période très longue. Ce qui implique qu'elles vont passer plus de temps loin du Soleil plutôt que proche.

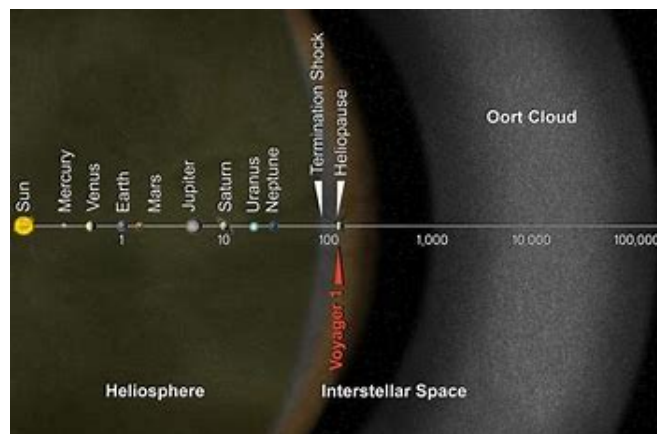


FIGURE 2.9 – Situation du nuage de Oort par rapport à notre Système solaire. | Source : [12].

2.4 Les différentes familles de comètes

Dans cette section, nous allons parler des différentes familles de comètes grâce aux sources [25], [8]. Mais tout d'abord, il faut définir un nouveau paramètre qui est le paramètre de Tisserand.

L'astronome français Félix Tisserand (1845 - 1896) consacrait une grande partie de son travail au domaine de la mécanique céleste. L'un de ses travaux était de trouver un moyen de relier les propriétés dynamiques avant qu'un corps céleste n'entre en contact avec une planète géante et celles d'après leur rencontre. Il pensait que même si les six éléments orbitaux étaient modifiés lors de perturbations, il devait y avoir une quantité

qui serait conservée, cette quantité sera appelée paramètre de Tisserand.

Le paramètre de Tisserand relatif à Jupiter, pour une comète, est défini par

$$T_{Jupiter} = \frac{a_{Jupiter}}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_{Jupiter}} \right]^{\frac{1}{2}} \cos(i).$$

où

- $a_{Jupiter}$ est le demi-grand axe de l'orbite de Jupiter ;
- a est le demi-grand axe de l'orbite de la comète ;
- e est l'excentricité de l'orbite de la comète ;
- i est l'inclinaison de l'orbite de la comète ;

Le tout premier classement des comètes séparait ces dernières en deux familles distinctes : la famille des comètes à longue période et la famille des comètes à courte période. La distinction se faisait par leur période et leur origine. En effet, les comètes ayant une période T supérieure à 200 ans étaient considérées comme des comètes à longue période et viennent du nuage de Oort. Alors que les comètes ayant une période T inférieure à 200 ans sont considérées comme des comètes à courte période et trouvent leur origine dans la ceinture de Kuiper.

Par la suite, d'autres classements ont vu le jour comme le classement proposé à la FIGURE 2.10. Celui-ci dépend de plusieurs autres paramètres comme le paramètre de Tisserand défini plus tôt. Parmi ces familles, nous retrouvons :

- Les comètes ayant une orbite hyperbolique. Ce type d'orbite possède une excentricité e supérieure à 1. Ce sont des comètes que l'on ne peut observer qu'une seule fois avant qu'elles ne sortent du Système solaire. Il existe deux origines possibles pour une comète de ce genre : soit elle vient de l'extérieur du Système solaire, soit elle vient de celui-ci, mais a vu son orbite modifiée par de nombreuses perturbations des planètes géantes qui l'entouraient ;
- Les comètes ayant une orbite parabolique. L'excentricité e de cette orbite est égale à 1. Les comètes ayant ce genre d'orbite ont un comportement et une origine proches de celles ayant une orbite hyperbolique ;
- Les comètes ayant une orbite elliptique. Leur excentricité e est strictement comprise entre 0 et 1. Nous pouvons diviser cette famille en deux, suivant le paramètre de Tisserand : les comètes presque isotropes ayant un paramètre de Tisserand relatif à Jupiter $T_{Jupiter}$ strictement inférieur à 2 et les comètes écliptiques qui ont un paramètre de Tisserand relatif à Jupiter $T_{Jupiter}$ strictement supérieur à 2. Parmi les comètes presque isotropes, nous retrouvons trois autres familles : la famille des comètes de Jupiter classique ; la famille des comètes de type Halley , qui sont des comètes à courte période ; et la famille des comètes à longue période. La famille des comètes de Jupiter classique se distingue par une période très courte, de moins de 20 ans, alors que les comètes de type Halley ont une période un peu plus longue, située strictement entre 20 et 200 ans. Parmi les comètes écliptiques se trouvent quatre autres familles : la famille des comètes de Jupiter ayant un paramètre de Tisserand strictement compris entre 2 et 3 ; la famille des comètes de type Encke ayant un paramètre de Tisserand strictement supérieur à 3 ainsi qu'un demi-grand axe strictement inférieur au demi-grand axe de l'orbite de Jupiter ; la famille de

comètes se situant dans la ceinture principale ayant un paramètre de Tisserand strictement supérieur à 3 ainsi qu'un demi-grand axe strictement compris entre 2 ua et 3.2 ua et une distance au périhélie strictement supérieure à 1.666 ua ; enfin la famille des comètes de type Chiron ayant un paramètre de Tisserand strictement supérieur à 3 ainsi qu'un demi-grand axe strictement supérieur au demi-grand axe de l'orbite de Jupiter ;

L'ensemble de ces familles et leurs caractéristiques sont reprises dans le graphique situé à la FIGURE 2.10.

2.5 Morphologie des comètes

Dans cette partie, nous allons détailler l'ensemble des traits caractéristiques d'une comète, à l'aide des sources [22], [9]. Tout d'abord, nous allons décrire sa tête, dans laquelle nous retrouvons le noyau cométaire ainsi que le coma, la chevelure de taille impressionnante entourant le noyau. Par la suite, nous verrons les différentes queues visibles et invisibles qui émanent de la comète.

2.5.1 Le noyau des comètes

Il faut savoir que le noyau mesure entre 1 et 100 km de diamètre et possède une forme variable selon la comète (comme illustré sur la FIGURE 2.11). C'est la partie la moins facile à observer de la comète puisqu'elle est entourée du coma (ou chevelure de la comète). Aucun télescope n'a jamais donné d'image nette de cette partie de la comète. Les seules informations que nous possédons à leur sujet nous viennent des sondes spatiales envoyées aux alentours. Par exemple, la non moins connue sonde de Rosetta. En effet, après le lancement de cette sonde dans l'espace le 2 mars 2004, il lui aura fallu à peu près 10 ans pour arriver à se satelliser autour de son objectif, à savoir la comète 67P/Churyumov Gerasimenko. Lors de son voyage, elle a pu récolter un nombre incalculable d'informations sur les objets avoisinant sa trajectoire. Par exemple, elle a pu collecter des informations sur l'astéroïde Steins qui se trouve à une distance de 800 km de la Terre.

Les observations à distance à l'aide des sondes ont permis de collecter des informations indirectes quant à la composition du noyau des comètes. Nous savons que les comètes sont des objets relativement compacts et principalement composés d'eau. Cependant, lorsque les comètes atteignent une distance inférieure à 3 ua du Soleil, nous pouvons observer une réaction appelée sublimation. Cette réaction va transformer les molécules d'eau glacée en gaz, libérant ainsi les grains de poussière. Cette réaction est à l'origine des jets de poussières et de gaz dans la zone entourant le noyau, appelée coma ou chevelure.

2.5.2 La chevelure de la comète

Cette nébulosité entourant la comète a un rayon mesurant entre 50 000 km et 250 000 km. C'est dans cette zone que les sondes spatiales ont pu détecter les molécules se trouvant dans le noyau. En effet, grâce à la sublimation que subit la comète en approchant du Soleil, toutes les molécules n'étant plus liées grâce à l'eau glacée sont expulsées sous forme de jets, comme expliqué plus haut. Les molécules de gaz soumises à la partie ultraviolette des rayonnements solaires sont cassées en de petites molécules appelées molécules-filles. Celles-ci sont éjectées hors du noyau à une vitesse d'environ 1 km/s lorsque l'activité

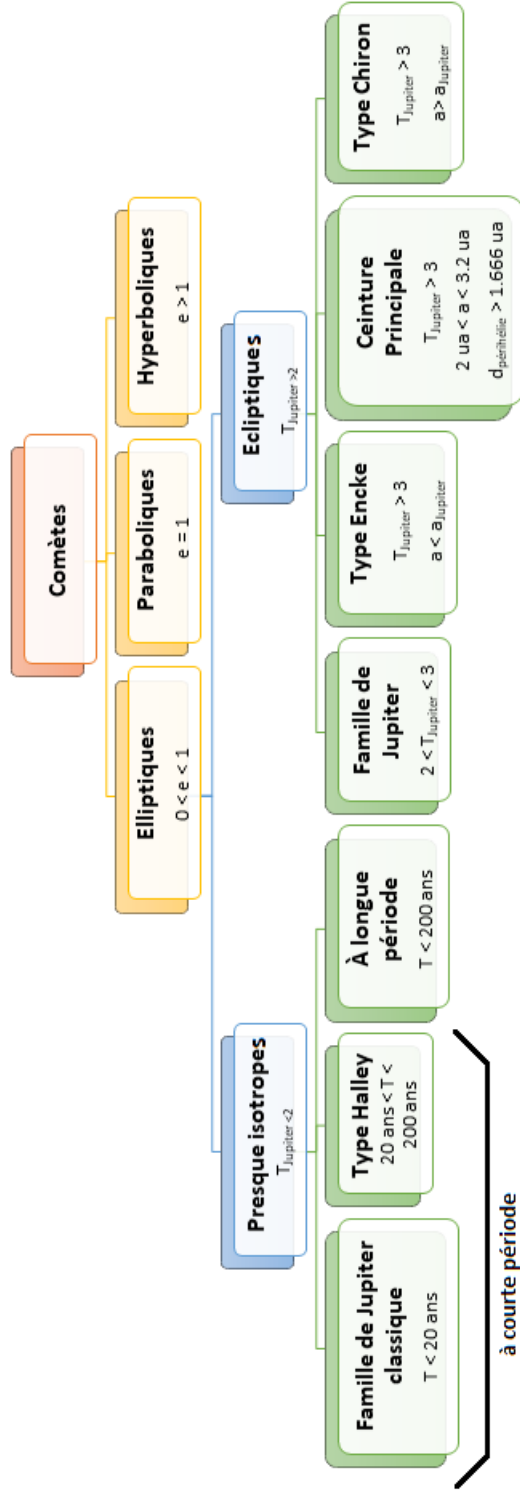


FIGURE 2.10 – Les différentes familles de comètes | schéma réalisé à l'aide de la source : [25]

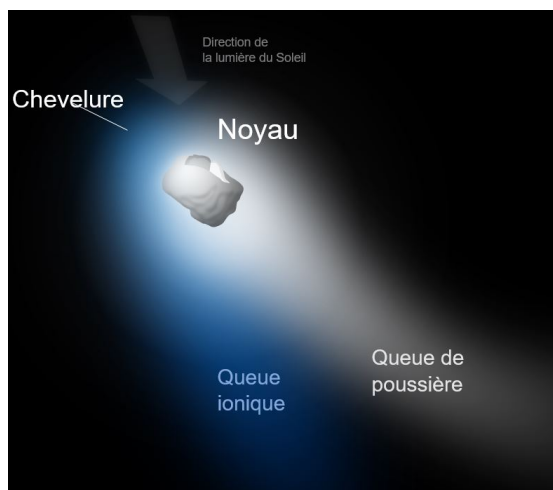


FIGURE 2.11 – Vue d’artiste de la morphologie d’une comète. | Source : [1].

cométaire est forte. Ces molécules-filles sont composées de molécules-mères reprises dans le tableau de la FIGURE 2.12

Le tableau, à la FIGURE 2.12, nous vient de la SOURCE [27] et reprend l’ensemble des molécules détectées dans le coma des comètes.

Le noyau porte une sorte de chevelure appelée une coma. Celle-ci n’est rien d’autre qu’une nébulosité de forme plutôt sphérique, centrée en son noyau. Son rayon est compris entre 50 000 km et 250 000 km à 1 hua du Soleil. Celui-ci varie comme le carré de la distance au Soleil. La coma est essentiellement composée d’atomes, de gaz et de poussières. Ces dernières sont le résultat de la sublimation subie par le noyau en approche du Soleil ou d’une planète. Ces composantes sont expulsées du noyau sous forme de jets relativement puissants formant ainsi une sorte de chevelure autour de celui-ci.

2.5.3 Les queues

Il en existe deux types : celles qui sont visibles et celles qui ne le sont pas. Parmi les queues visibles, il y a la queue ionisée (de type I), l’anti-queue et la queue de poussière (de type II).

La *queue de type I* ou queue ionisée est reconnaissable par sa couleur bleutée ainsi que sa forme plutôt rectiligne. Elle forme un angle relativement faible par rapport à la droite reliant la comète au Soleil. Lorsque les molécules sont éjectées en dehors du noyau en molécules-filles, il est possible que celles-ci perdent des électrons à cause du rayonnement solaire. Nous les appellerons alors ions. Ces ions sont des particules chargées positivement. En effet, puisque les molécules-filles perdent des électrons, elles perdent leurs charges négatives et sont alors chargées positivement. Les ions les plus répandus dans les comètes sont les ions H_2O^+ et CO^+ . Les ions vont être chassés avec une vitesse allant jusqu’à 500 km/s par l’effet du vent solaire (voir définition dans le lexique) dans le sens opposé à ce dernier. Le vent solaire peut provoquer des irrégularités dans cette queue, mais celles-ci s’atténuent en quelques heures.

Molécules	Abondance relative par rapport à l'eau en pourcentage
H ₂ O	100
CO	0.2 - 23
CO ₂	2.5 - 30
CH ₄	0.12 - 1.5
C ₂ H ₂	0.04 - 0.5
C ₂ H ₆	0.14 - 2
CH ₃ OH	0.6 - 6.2
H ₂ CO	0.13 - 1.4
HCOOH	0.028 - 0.18
HCOOCH ₃	0.07 - 0.08
CH ₃ CHO	0.047 - 0.08
HOCH ₂ CH ₂ OH	0.07 - 0.35
C ₂ H ₅ OH	0.12
CH ₂ OHCHO	0.016
NH ₂ CHO	0.008 - 0.021
NH ₃	0.3 - 0.7
HNC	0.085 - 0.25
HNCO	0.009 - 0.08
HNC	0.002 - 0.035
CH ₃ CN	0.008 - 0.035
HC ₃ N	0.002 - 0.068
H ₂ S	0.13 - 1.5
OCS	0.03 - 0.4
SO	0.04 - 0.3
SO ₂	0.2
H ₂ CS	0.009 - 0.09
S ₂	0.001 - 0.25

FIGURE 2.12 – Ensemble des molécules détectées dans le coma des comètes. | Source : [27]

La *queue de type II* ou de poussière est reconnaissable par sa couleur jaunâtre. Comme les Chinois l'avaient observé (sans savoir de quelle queue il s'agissait), la queue de poussière est orientée dans le sens opposé à la position du Soleil tout en restant dans le même plan orbital que la trajectoire de la comète. Étant donné que la vitesse des poussières est bien inférieure à celle du noyau, la taille de cette queue peut atteindre plusieurs millions de kilomètres.

Il est aujourd'hui possible de modéliser la dynamique des grains de poussière grâce à la théorie de Michael Finson et Ronald Probstein établie en 1968. Cette théorie, ils ne l'ont pas découverte seuls. En effet, les hypothèses de celle-ci avaient d'abord été établies par Fiedrich Bessel puis reprises et améliorées par Fiodor Bredikhine en 1985.

Cette théorie nous explique que la sublimation des glaces, survenue à la surface du noyau de la comète, va insuffler une cinétique aux molécules de poussières. En effet, celles-ci vont atteindre une vitesse proche de 500 m/s et vont donc être rejetées dans l'espace avec cette même vitesse. Celles-ci n'agissent plus sous l'emprise de la force gravitationnelle, mais sous une force répulsive appelée pression de radiation. Cette dernière est engendrée par le rayonnement solaire; autrement dit, ce sont les photons qui vont influencer la direction (opposée au Soleil) des grains de poussière. Cette influence est plutôt vue comme une impulsion. La FIGURE 2.2 illustre parfaitement ce phénomène. L'impulsion transmise par le photon est donnée par la formule suivante

$$I = \frac{hf}{c},$$

où f est la fréquence de la lumière, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ j.s est la constante de Planck et $c = 3 \times 10^8$ km/s est la vitesse de la lumière. Supposons que les forces de gravitation et de radiation soient appliquées sur une particule sphérique de rayon x en cm et de masse volumique μ en g/cm³,

$$\begin{cases} F_G = \frac{\frac{4\pi}{3}\mu x^2 GM}{r^2} & \text{(force de gravitation)} \\ F_R = \frac{\pi x^2 \sigma_R(x) F}{cr^2} & \text{(pression de radiation)} \end{cases}$$

où M est la masse solaire, $F = 1.4\text{kW}/\text{m}^2$ est le flux de rayonnement à 1 ua et $\sigma_R(x)$ est le coefficient (nombre pur) déterminant la performance de la pression de radiation sur la molécule de poussière.

Celle-ci va alors décrire une trajectoire hyperbolique dont le Soleil habite le foyer. Cette trajectoire est engendrée principalement par la pression de radiation ainsi que la vitesse de la molécule de poussière lorsqu'elle est éjectée du noyau vers le coma. Elle est alors définie de manière indépendante de r par la formule

$$\frac{F_R}{F_G} = \frac{\sigma_R(x)}{\mu x} (0.6 \times 10^{-4}).$$

Cette dernière équation suggère donc que la trajectoire des particules dépend directement de la taille de celles-ci, mais aussi de leur nature. En effet, les particules de petite taille

seront moins influencées par la pression de radiation et les plus grosses ne sont que faiblement accélérées. Ceci a pour conséquence que la queue de type II n'est constituée que de poussières dont le diamètre est compris entre quelques centièmes de μm (micromètre) et quelques μm .

Un troisième type de queue existe, mais celle-ci est relativement rare à observer, car il faut que la Terre se trouve dans le même plan orbital que la comète. Contrairement aux autres queues, elle est dirigée vers le Soleil, d'où son nom anti-queue.

Il reste un type de queue à décrire. Celle-ci contrairement aux autres est invisible pour des instruments optiques. En effet, elle n'est détectable qu'avec des instruments de radio-astronomie. Elle est composée d'hydrogène et de sodium et se répand sur d'importantes distances.

Chapitre 3

2I/Borisov - De sa découverte à Juin 2020

Cette découverte n'est pas anodine, car ce genre d'objet est très rare. En effet, nous n'en recensons que deux jusqu'à présent. Tout d'abord, il y a eu 1I/ Oumuamua découvert le 19 octobre 2017. Dans un premier temps, cet objet a été qualifié de comète, mais rapidement les chercheurs l'ont requalifié comme étant un astéroïde notamment à cause de sa taille. Donc 1I/Oumuamua a été le premier objet interstellaire, mais c'est 2I/Borisov qui obtient le titre de première comète interstellaire.

La découverte de 2I/Borisov est une avancée majeure dans l'étude du monde qui nous entoure. En étudiant sa trajectoire, nous pouvons en déduire son origine et en étudiant sa composition et son comportement, nous pouvons faire des analogies entre les comètes dites "classiques" de notre Système solaire et les comètes ayant la même origine que 2I/Borisov.

3.1 Nature

Contrairement à Oumuamua, la découverte de 2I/Borisov s'est faite assez rapidement après le début de son activité, ce qui a laissé aux chercheurs plus de temps pour l'analyser. En effet, elle a été repérée alors qu'elle se trouvait approximativement à 3 ua du Soleil, distance à laquelle l'activité d'une comète du Système solaire se met en route. À cette distance, le phénomène de sublimation donne naissance aux différentes queues de 2I/Borisov.

La FIGURE 3.1 En haut à gauche de cette même figure, nous pouvons retrouver la direction opposée au déplacement de la comète, la direction opposée au Soleil ainsi que les directions du nord et de l'est. Cette figure, provenant de la source [19], met en évidence l'activité de 2I/Borisov. En effet, nous pouvons y observer l'extension du coma ou encore de la chevelure ainsi que les queues de cette dernière. Notons que sa queue de poussière est relativement petite ≈ 15 arcsec (avec un angle de position d'environ 300 degrés) et se comporte comme celle des comètes du Système solaire. En effet, elle est dirigée dans le sens opposé au Soleil, comme le montre la FIGURE 3.1, autant d'indices qui prouvent que 2I/Borisov appartient à la famille des comètes.

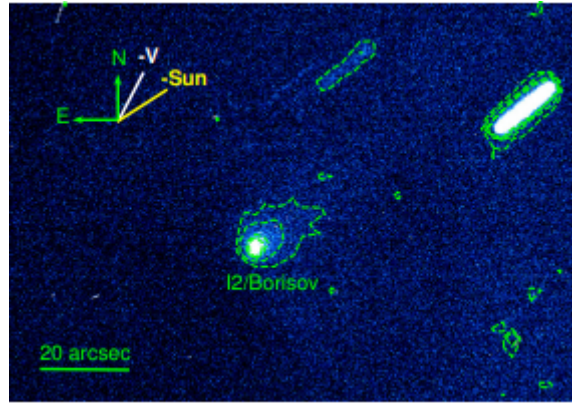


FIGURE 3.1 – Image obtenue à l’aide d’un filtre de la bande V (cfr. lexique), munie des directions de la vitesse, du Soleil et du nord et l’est, mettant en évidence le coma de 2I/Borisov.

3.2 Origine et trajectoire

2I/Borisov a été classifiée comme comète interstellaire car son excentricité est pour le moins impressionnante. En effet, celle-ci est de 3.10 ± 0.13 , ce qui signifie que 2I/Borisov possède une orbite hyperbolique. Dans la section des éléments orbitaux du chapitre 1, nous avons vu que les comètes appartenant au Système solaire, ayant une orbite hyperbolique (FIGURE 3.2) sont rares, mais existent. Celles-ci viennent du nuage d’Oort, c’est pourquoi, à ce stade, nous pourrions penser qu’il en est de même pour 2I/Borisov. Ces comètes ont une excentricité légèrement supérieure à 1 mais jamais une excentricité de 3, ce qui rend 2I/Borisov assez unique, sans néanmoins prouver que 2I/Borisov possède une origine située hors du Système solaire.

3.3 Éléments orbitaux

Les 6 éléments orbitaux de 2I/Borisov, qui sont donnés par le tableau de la FIGURE 3.3, démontrent également que cette comète est interstellaire. Parmi ces éléments, sont repris q la distance au périhélie (en ua), e l’excentricité, i l’inclinaison (en degrés), Ω l’angle compris entre la ligne des nœuds et la direction du point vernal (en degrés), T le moment du passage au périhélie et ω l’angle (en degrés) entre la direction du nœud ascendant et celle du périhélie.

3.4 Taille et masse

Lorsque le Soleil éclaire un objet du Système solaire, l’éclat observé par un observateur terrestre est ce qu’on appelle la luminosité apparente dont la valeur numérique est appelée magnitude apparente. Afin de comparer des objets du Système solaire entre eux, suivant leur luminosité, il faudrait donc les ramener à une même distance de la Terre et à une même distance du Soleil et à un même angle d’ensoleillement. Si la magnitude absolue H_V ne dépend que des propriétés de l’objet, la magnitude apparente, elle, dépend en plus de trois paramètres : la distance par rapport à la Terre, la distance par rapport au Soleil, et l’angle avec lequel le Soleil éclaire l’objet.

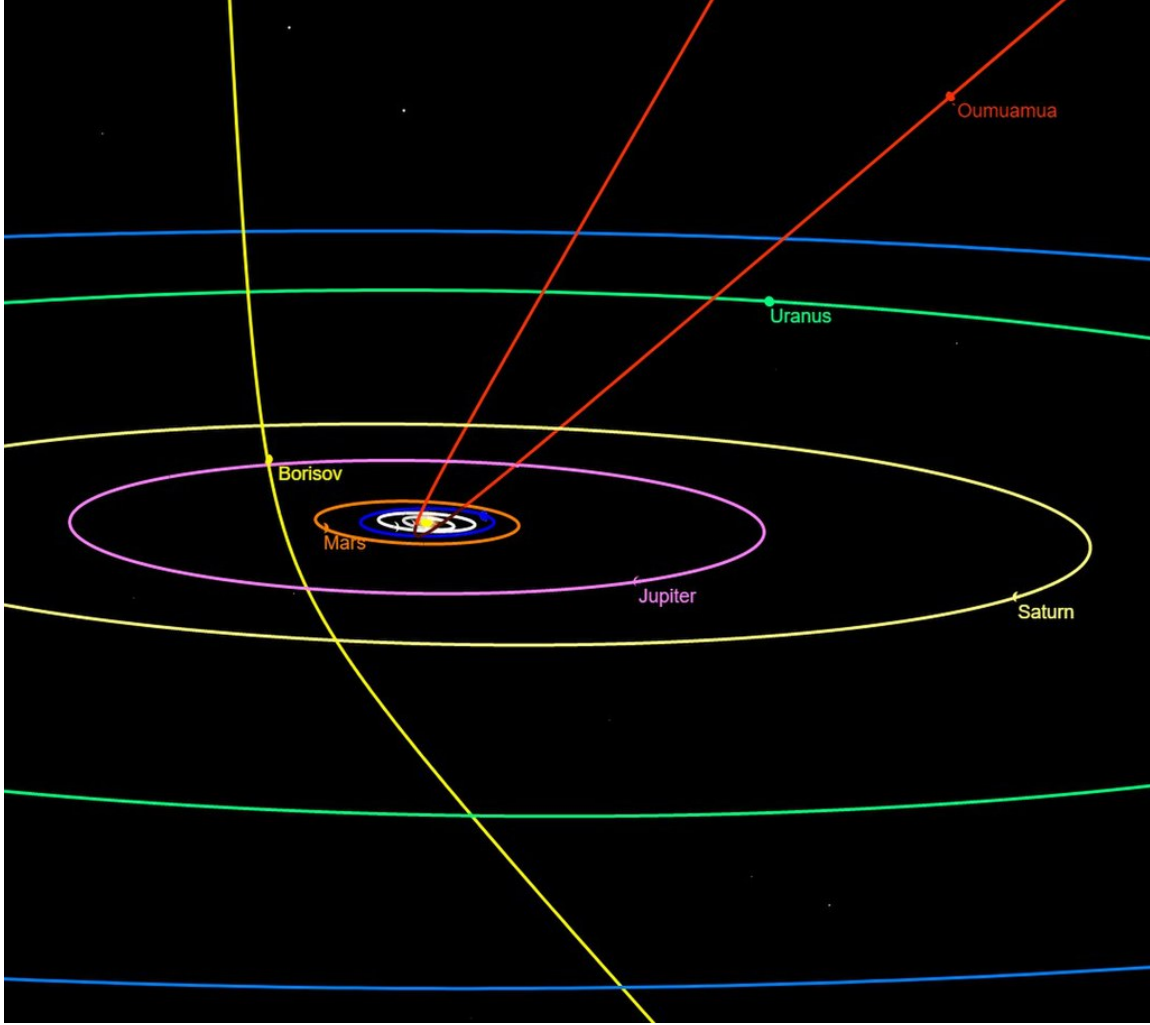


FIGURE 3.2 – Représentation de la trajectoire de 2I/Borisov par rapport aux orbites des planètes géantes du Système solaire. | Source : [30].

En comparant et observant de nombreux objets, on représente actuellement la magnitude absolue H_V comme une fonction affine (une droite) décroissante, de pente -2.5, du logarithme en base 10 d'une fonction de L (la luminosité), $\frac{1}{4\pi}$ et $\frac{1}{\Delta^2 r_H^2}$. Autrement dit, lorsque la magnitude croît d'une unité, la luminosité est divisée par 2.5.

La formule de la magnitude apparente m_V est donnée par

$$m_V = -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi \Delta^2 r_H^2} \right) + C(\alpha), \quad (3.1)$$

où $C(\alpha) = \alpha\beta$ est la fonction de phase, α représente l'angle de phase et β représente le coefficient de phase.

La magnitude absolue est équivalente à la magnitude apparente avec comme distance à la Terre ($\Delta = 1$ ua), comme distance au Soleil ($r_H = 1$ ua) et avec un angle d'ensoleillement ($\alpha = 0^\circ$). Tout ceci n'est que théorique et n'est pas possible dans la réalité. En effet, l'angle n'est jamais de 0° dans cette configuration. La magnitude absolue est alors donnée

Élément orbital	valeur
T	8 décembre 2019
ω	$209.12445 \pm 0.00050^\circ$
Ω	$308.14998 \pm 0.00033^\circ$
i	$44.05352 \pm 0.00018^\circ$
q	2.006616 ± 0.000022
e	3.35706 ± 0.00025

FIGURE 3.3 – Tableau reprenant les éléments orbitaux de 2I/Borisov où q la distance au périhélie (en ua), e l'excentricité, i l'inclinaison (en degrés), Ω l'angle compris entre la ligne des nœuds et la direction du point vernal (en degrés), T le moment du passage au périhélie et ω l'angle (en degrés) entre la direction du nœud ascendant et celle du périhélie. | Source : [14].

par la relation

$$\begin{aligned} H_V &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi \times 1 \times 1} \right) + C(0) \\ &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi} \right). \end{aligned}$$

Repartons de la relation 3.1,

$$\begin{aligned} m_V &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi \Delta^2 r_H^2} \right) + C(\alpha), \\ &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi} \right) - 2.5 \log_{10} \left(\frac{1}{r_H^2} \right) - 2.5 \log_{10} \left(\frac{1}{\Delta^2} \right) + C(\alpha), \\ &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi} \right) + 2.5 \log_{10} (r_H^2) + 2.5 \log_{10} (\Delta^2) + C(\alpha), \\ &= \underbrace{-2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{4\pi} \right)}_{:=H_V} + 5 \log_{10} (r_H) + 5 \log_{10} (\Delta) + C(\alpha), \\ &= H_V + 5 \log_{10} (r_H \Delta) + C(\alpha). \end{aligned}$$

Le lien entre les deux magnitudes est donné par la relation

$$H_V = m_V - 5 \log_{10}(r_H \Delta) - C(\alpha) \quad (3.2)$$

où $C(\alpha)$ est la fonction de phase.

En utilisant les bons télescopes et en se servant des champs d'étoiles répertoriées dans l'APASS (relevé photométrique de tout le ciel), les auteurs de l'article [19] ont pu estimer l'éclat de 2I/Borisov à $V = 18.93 \pm 0.03$ mag. En sachant cela, il est alors possible d'estimer la taille de 2I/Borisov en se servant de la formule 3.2. Nous reprenons la fonction de phase

$\Phi(\alpha) = \beta\alpha$ où α représente l'angle de phase et β , le coefficient de phase est arbitrairement fixé à 0.04 mag/deg. Grâce à cela, nous pouvons alors calculer la cross-section effective de 2I/Borisov. La cross-section effective d'un objet du Système solaire est la surface éclairée par le Soleil et donc visible par un observateur terrestre. Nous pouvons obtenir celle-ci en utilisant la formule

$$C_l = \frac{1.5 \times 10^6}{p_V} \times 10^{-0.4H_V}$$

où p_V correspond à l'albédo géométrique dans la bande V (cfr. lexicque). Comme en 2019, l'albédo géométrique de 2I/Borisov n'est pas encore connu, les auteurs ont décidé de prendre un albédo $p_V = 0.05$ qui se trouve être un albédo similaire à l'albédo des astéroïdes de classe primitive. Suivant les paramètres journaliers utilisés par les auteurs dans les équations ci-dessus, ils ont obtenu la cross-section effective de 2I/Borisov $C_l = 108 \text{ km}^2$. Pour obtenir le rayon de 2I/Borisov, il faut utiliser la formule de l'aire d'un cercle

$$C_l = \pi r^2.$$

En manipulant cette formule, nous obtenons facilement le rayon

$$r = \sqrt{\frac{C_l}{\pi}} = \sqrt{\frac{108}{\pi}} = 5.8632 \text{ km} \approx 5.9 \text{ km} = 5900 \text{ m}.$$

Il est maintenant possible d'estimer la masse de 2I/Borisov grâce à son rayon ainsi qu'à une masse volumique. Dans l'article [19], les auteurs ont pris le parti de prendre la masse volumique de la comète Churyumov-Gerasimenko $\rho = 0.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, provenant des observations établies par la sonde spatiale Rosetta sur cette dernière. Afin d'obtenir la masse de 2I/Borisov, nous aurons besoin de deux formules : celle du volume d'une sphère $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ et celle de la masse volumique $\rho = \frac{m}{V}$ ou encore $m = \rho V$. La masse est alors obtenue par la formule suivante

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \times \rho.$$

En faisant bien attention aux différentes unités de mesure, nous obtenons une masse proche de $4 \times 10^{14} \text{ kg}$. Cette valeur est très grande par rapport à celle qui sera estimée par la suite.

3.5 Composition et origine

Comme dit plus haut, 2I/Borisov possède de nombreuses ressemblances avec les comètes de notre Système solaire. En effet, concernant la composition, nous retrouvons des molécules avec un taux d'abondance relative (par rapport à l'eau) similaire aux comètes du Système solaire.

Martin Cordiner et Stefanie Milam, respectivement astrochimiste et planétologue au Goddard Space Flight Center de la Nasa, à Greenbelt (Maryland) ont participé à l'article de Nature Astronomy concernant une étude de la composition de 2I/Borisov. Ils ont utilisé le réseau de radiotélescopes géant au Chili nommé ALMA (Atacama Large Millimeter / submillimeter Array). Grâce à ce dernier, ils ont pu constater un taux de monoxyde de carbone beaucoup plus abondant que pour n'importe quelle comète du système solaire : le taux de monoxyde de carbone est 26 fois plus élevé dans le coma de 2I/Borisov que

pour une comète de Système solaire. La FIGURE 3.4 nous donne les résultats obtenus par ALMA.

Stefanie Milam a alors affirmé que la comète avait dû se former dans un milieu extrêmement froid ($\approx -250^\circ\text{C}$) où le monoxyde de carbone était très abondant. De plus, elle a tenu à ajouter que « 2I/Borisov nous a donné un premier aperçu de la chimie qui a façonné un autre système planétaire. Mais ce n'est que lorsque nous pourrons comparer l'objet à d'autres comètes interstellaires que nous apprendrons si 2I/Borisov est un cas spécial ou si chaque objet interstellaire a des niveaux de CO inhabituellement élevés » [28].

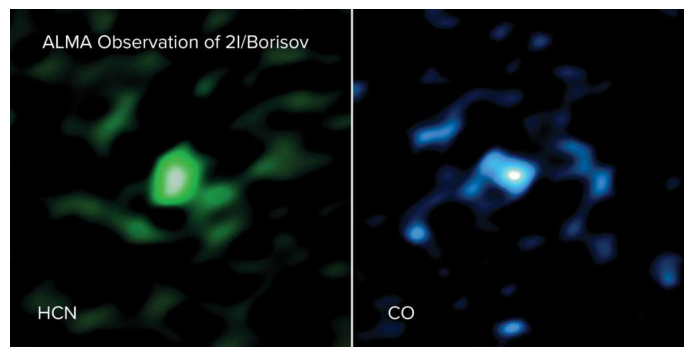


FIGURE 3.4 – Le réseau de radiotélescopes géant ALMA (Atacama Large Millimeter / submillimeter Array) a découvert du cyanogène (CN) et du monoxyde carbone (CO) dans la chevelure de 2I/Borisov. | Source : [28]

Les auteurs de l'article [19] mettent également en évidence les similitudes entre le spectre de 2I/Borisov et ceux des comètes ou encore des astéroïdes de type D. Les astéroïdes de type D ont un albédo géométrique (cfr. lexique) très faible. Une petite différence les interpella quand même, l'absence des raies C_2 . Les raies C_2 sont plus communément appelées "raies de Swan", visibles et repérables entre 4700 et 6000 angströms. Elles permettent de mettre en évidence la présence de carbone diatomique (C_2) ou encore de certaines molécules comme l'acétylène (C_2H_2). Nous pouvons constater sur la FIGURE 3.5, reprenant le spectre de 2I/Borisov, qu'il n'y a aucun pic laissant penser à la présence de ces molécules chimiques, contrairement, par exemple, au spectre de la comète Atlas (FIGURE 3.6) où l'on peut constater très distinctement les pics liés aux raies de Swan.

Au vu des résultats, les auteurs en concluent que l'absence de détection de ces pics est probablement due à un mauvais choix de filtre ou encore au fait que les observations ont été réalisées à un moment où l'activité de 2I/Borisov était trop faible. Enfin, ils souligneront le fait qu'ils auront davantage d'informations lorsque la comète interstellaire aura atteint son périhélie.

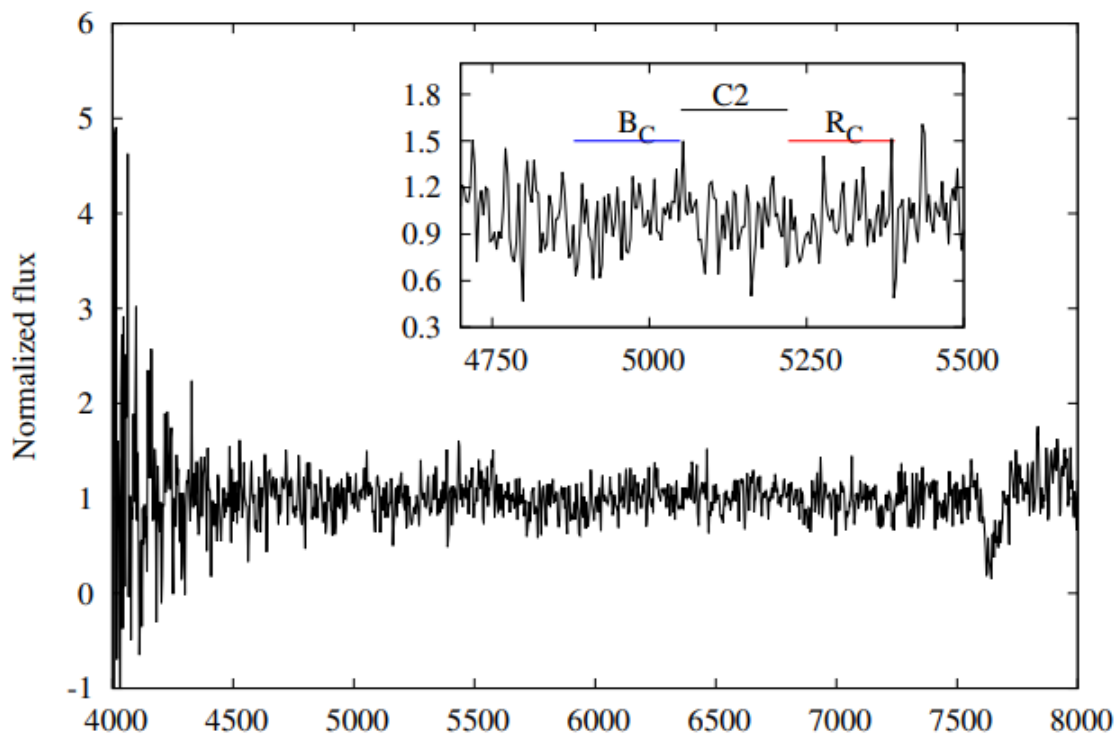


FIGURE 3.5 – Spectre optique de 2I/Borisov. Il n’y a aucun pic dans le spectre permettant de mettre en évidence la présence des raies de Swan. | Source : [19]

3.6 Liste des rencontres les plus proches de 2I/Borisov

Sur son chemin, la comète interstellaire 2I/ Borisov a croisé de nombreux astres. Le tableau de la FIGURE 3.7, nous donne la liste des astres qu’elle a rencontrés à une distance de moins d’un pc. La distance par rapport à l’objet rencontré est donnée en pc qui est le symbole pour parsec. Un parsec est équivalent à $\frac{648000}{\pi} \approx 3.26$ années-lumière. Or une année-lumière est équivalente à 9 461 milliards de kilomètres. Donc 1 pc \approx 30.842,86 milliards de kilomètres.

Par ce tableau, nous pouvons constater que Ross 573 est l’étoile qui se trouvait au plus près (0.098 pc) de 2I/Borisov il y a 909 000 ans.

3.7 Éphémérides

Dans cette section, nous allons reprendre les éphémérides ainsi que les prédictions concernant la trajectoire de 2I/Borisov dans la FIGURE 3.8. Il est à noter que les distances au Soleil et à la Terre sont données en ua. Nous pouvons voir qu’avant sa découverte, 2I/Borisov avait déjà été photographié. En effet, suite à sa découverte et au calcul de ses éléments orbitaux, des chercheurs ont tenté de retrouver l’astre dans les clichés précédents des bases de données. Ils ont pu remonter jusqu’en décembre 2018, mais pas avant. Ils en ont conclu que la taille du noyau ne devait pas excéder 7 km de diamètre, sinon l’astre aurait été visible sur le cliché du mois de novembre.

C/2019 Y4 ATLAS - 6x6000s. - 2020/04/01T20:26:539 - RMS=0,124 - Alpy6000 - R: 513,1 - Stellartrip

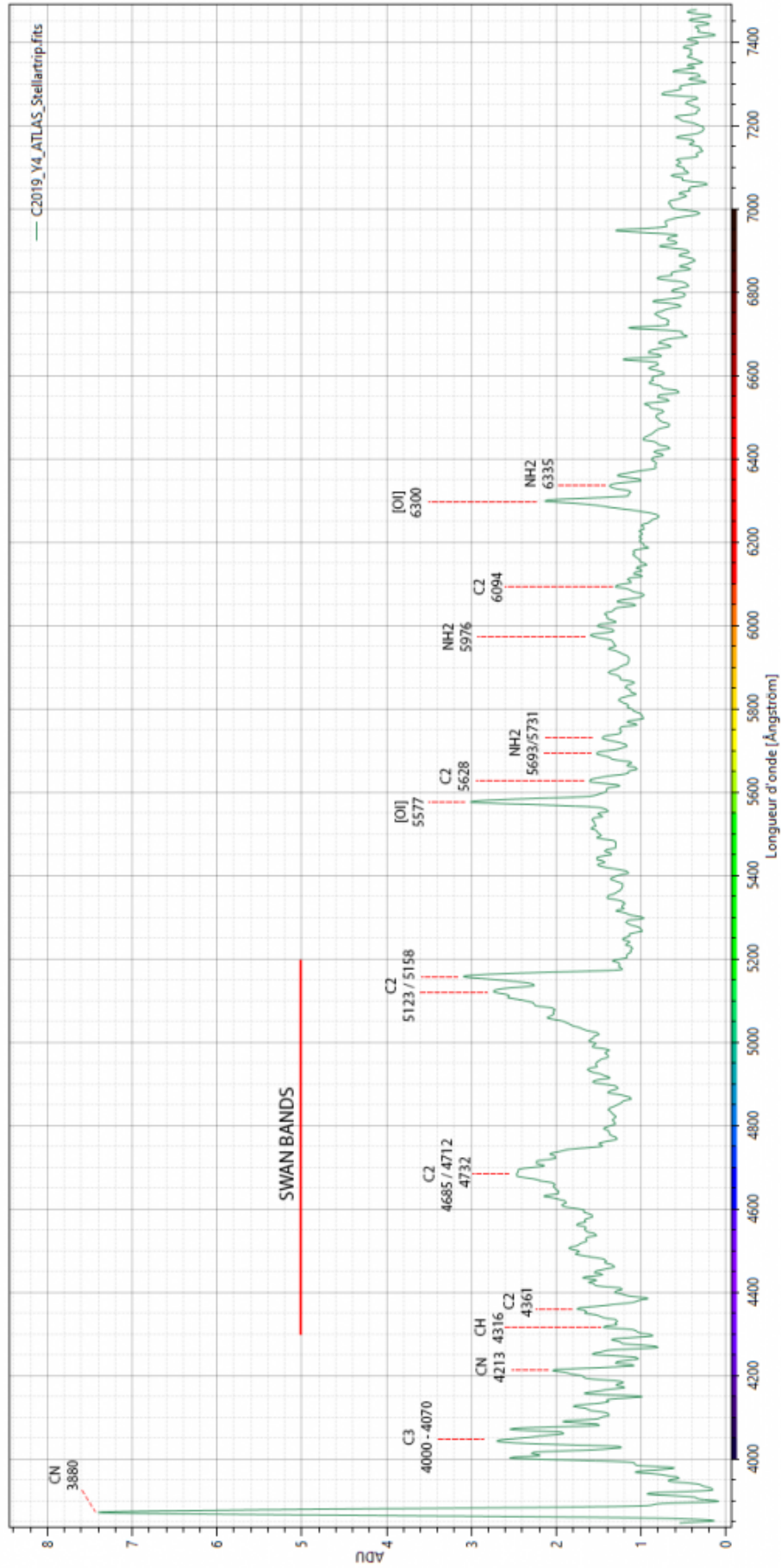


FIGURE 3.6 – Spectre optique de la comète Y4 Atlas donné à titre de comparaison. | Source : [29]

Nom	Gaia DR2 source ID	Moment de la rencontre	Distance de la rencontre	Vitesse lors de la rencontre
Ross 573	5162123155863791744	il y a 909 000 ans	0.098 pc	22.6 km.s ⁻¹
GJ 4384	2875096978193873024	il y a 1 523 000 ans	0.250 pc	19.1 km.s ⁻¹
GJ 3270	3299381442858615936	il y a 444 000 ans	0.459 pc	32.1 km.s ⁻¹
HD 44867	3368960531532018816	il y a 1 424 000 ans	0.572 pc	85.9 km.s ⁻¹
	3338543951096093696	il y a 2 876 000 ans	0.588 pc	36.9 km.s ⁻¹
Wolf 28	2552928187080872832	il y a 14.7 000 ans	0.647 pc	284.0 km.s ⁻¹
	4828141619844398464	il y a 2 401 000 ans	0.675 pc	64.5 km.s ⁻¹
GJ 1103A	3085716990368639744	il y a 95 000 ans	0.698 pc	95.7 km.s ⁻¹
GJ 2070	3073508528645520000	il y a 402 000 ans	0.809 pc	32.5 km.s ⁻¹
GJ 873	1934263333784036736	il y a 177 000 ans	0.818 pc	27.6 km.s ⁻¹
	6743117625594496512	il y a 1 750 000 ans	0.835 pc	69.8 km.s ⁻¹
HD 277756	207166446152692736	il y a 1 283 000 ans	0.859 pc	35.3 km.s ⁻¹
HIP 34498	978301126629450368	il y a 5 283 000 ans	0.944 pc	25.1 km.s ⁻¹
HD 22781	217334764042444288	il y a 889 000 ans	0.969 pc	35.8 km.s ⁻¹

FIGURE 3.7 – Les 14 rencontres de 2I/borisov avec des astres se trouvant à une distance inférieure à 1 parsec. | tableau réalisé à l'aide de la source : [6]

Date	Distance au Soleil	Distance à la Terre	Description de l'événement
01-01-2013	49.497	48.963	
01-01-2014	42.576	42.034	
01-01-2015	35.637	35.085	
01-01-2016	28.674	28.109	
01-01-2017	21.658	21.080	
01-01-2018	14.611	13.996	
13-12-2018	7.870	7.104	premiers clichés
30-04-2019	5.193	5.812	croisement avec l'orbite de Jupiter
30-08-2019	2.986	3.772	découverte
01-10-2019	2.515	3.021	
01-11-2019	2.173	2.429	
01-12-2019	2.014	2.049	
08-12-2019	2.007	1.998	périhélie
20-12-2019	2.023	1.946	
28-12-2019	2.053	1.937	au plus proche de la Terre
01-01-2020	2.073	1.939	
01-02-2020	2.341	2.076	
01-03-2020	2.723	2.326	
01-04-2020	3.214	2.668	
01-05-2020	3.735	3.091	
01-06-2020	4.302	3.665	
01-07-2020	4.865	4.371	
01-08-2020	5.208	4.856	croisement avec l'orbite de Jupiter
01-08-2020	5.457	5.230	
01-09-2020	6.055	6.163	
01-10-2020	6.637	7.066	
01-11-2020	7.241	7.924	
01-12-2020	7.826	8.620	
01-01-2021	8.431	9.160	
01-01-2022	15.532	16.326	
01-01-2025	36.522	37.354	
01-01-2030	71.070	71.915	
01-01-2035	105.418	106.268	
01-01-2040	139.686	140.539	
01-01-2045	173.929	174.781	
01-01-2050	208.108	208.962	

FIGURE 3.8 – Tableau reprenant les éphémérides et les prédictions sur la trajectoire de 2I/Borisov. Les distances sont données en ua. | Source : [14]

Chapitre 4

De juin 2020 à maintenant

Ce mémoire a été réalisé de juin 2020 à juin 2022. Afin d'être pertinent, il ne s'appuiera que sur des articles parus après juin 2020. Les recherches sur cette comète interstellaire, 2I/Borisov, ont été de plus en plus nombreuses et approfondies grâce aux données récoltées pendant son court voyage à travers notre système solaire. Pour débiter ce chapitre, nous allons nous intéresser à la photométrie de la comète 2I/Borisov et nous enchaînerons ensuite avec l'étude d'autres articles. Certains aspects liés à la photométrie, comme les méthodes d'améliorations d'image ne seront pas explicités.

4.1 Un portrait couleur de la chevelure de 2I/Borisov

Les auteurs de l'article vont utiliser la photométrie dans le but de rechercher des similitudes entre 2I/Borisov et les comètes connues et observées du Système solaire. L'objectif premier de la photométrie est d'obtenir une mesure de la luminosité d'un objet. Pour obtenir des mesures plus précises, ils vont utiliser des télescopes munis de filtres à larges bandes UBVRI (terme défini dans le lexique) ainsi que tout le matériel approprié à ce type de recherche.

La comète interstellaire 2I/Borisov a été observée par le télescope appelé Large Binocular Telescope (LBT) situé sur le Mont Graham, dans l'Arizona, aux États Unis. Les auteurs se sont basés sur les données récoltées par LBT durant les nuits du 19 octobre 2019, 20 octobre 2019 et le 2 décembre 2019.

Pour rappel, le 19 octobre 2019 et le 20 octobre 2019, 2I/Borisov se situait à une distance de 2.29 ua du Soleil. Il est intéressant de prendre deux nuits proches afin de constater les différences présentes sur les images en seulement un jour et donc d'avoir une idée de l'évolution de cette comète sur une courte période. La troisième nuit, le 2 décembre 2019, est intéressante, car elle permet aux chercheurs d'avoir une idée de l'activité de 2I/Borisov juste avant qu'elle n'atteigne son périhélie (distance la plus proche du Soleil), le 8 décembre 2019. La FIGURE 4.1 montre la position de 2I/Borisov sur sa trajectoire ainsi que ses distances hélio- et géo-centriques pour les nuits du 19 octobre 2019, 20 octobre 2019 et 2 décembre 2019 respectivement.

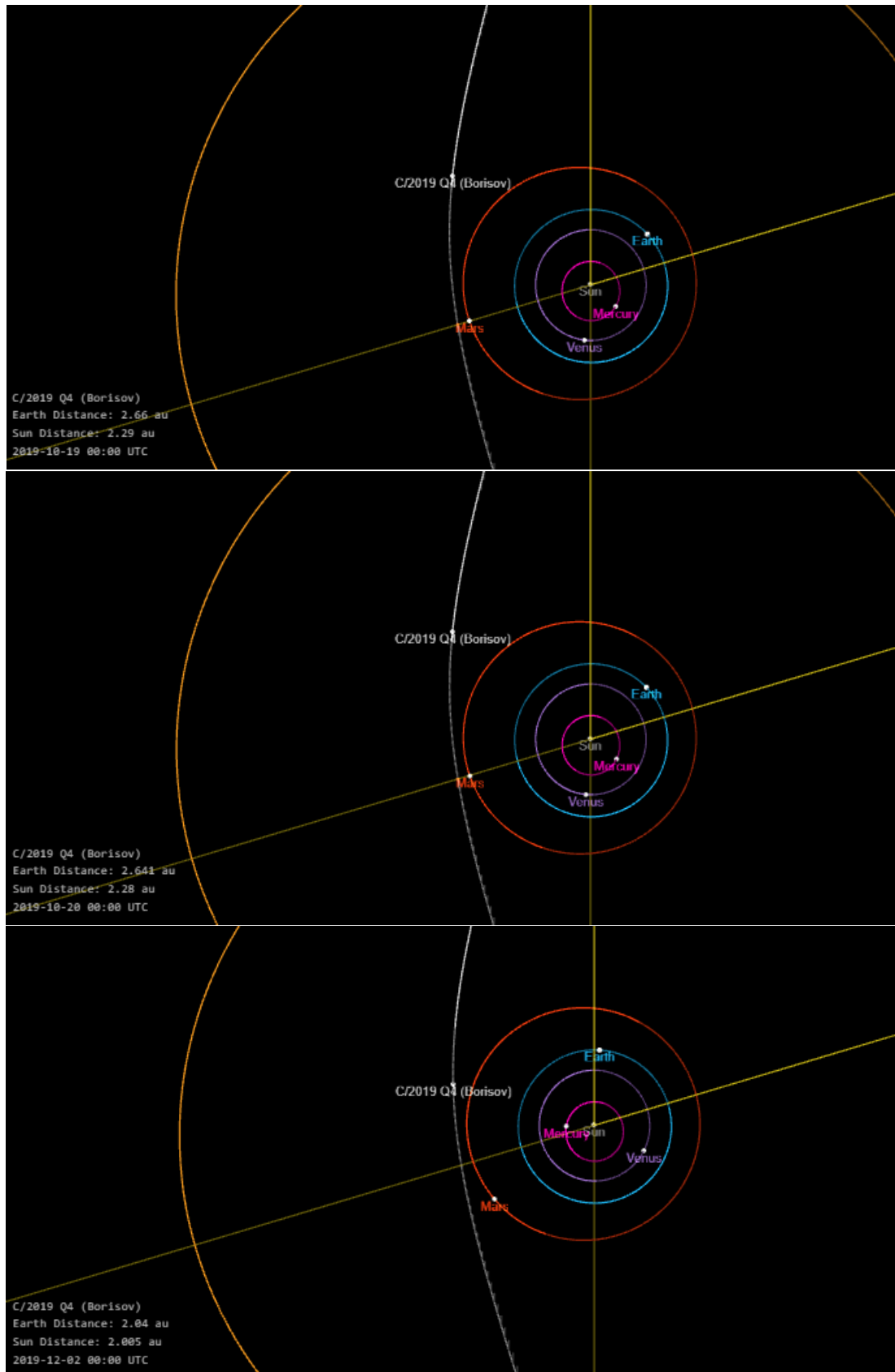


FIGURE 4.1 – Position de 2I Borisov sur sa trajectoire pour les nuits du 19 octobre 2019, 20 octobre 2019 et 2 décembre 2019 respectivement. Ces images ont été obtenues grâce à la base de données de la Nasa. | Source : [24]

Tout d'abord, les auteurs vont s'intéresser aux images obtenues par le télescope LBT avec le filtre R. Le filtre R est le filtre rouge. Celui-ci est très intéressant, car il n'est que très peu affecté par les perturbations dues aux émissions de gaz. Cela permet donc d'obtenir une meilleure imagerie et donc des mesures plus précises de la luminosité de 2I/Borisov.

La FIGURE 4.2 montre les observations obtenues concernant la chevelure de 2I/Borisov, avec le filtre R, lors des trois nuits considérées par les auteurs. Celles-ci sont réparties par lignes pour le 19 octobre 2019, le 20 octobre 2019 et le 2 décembre 2019 respectivement.

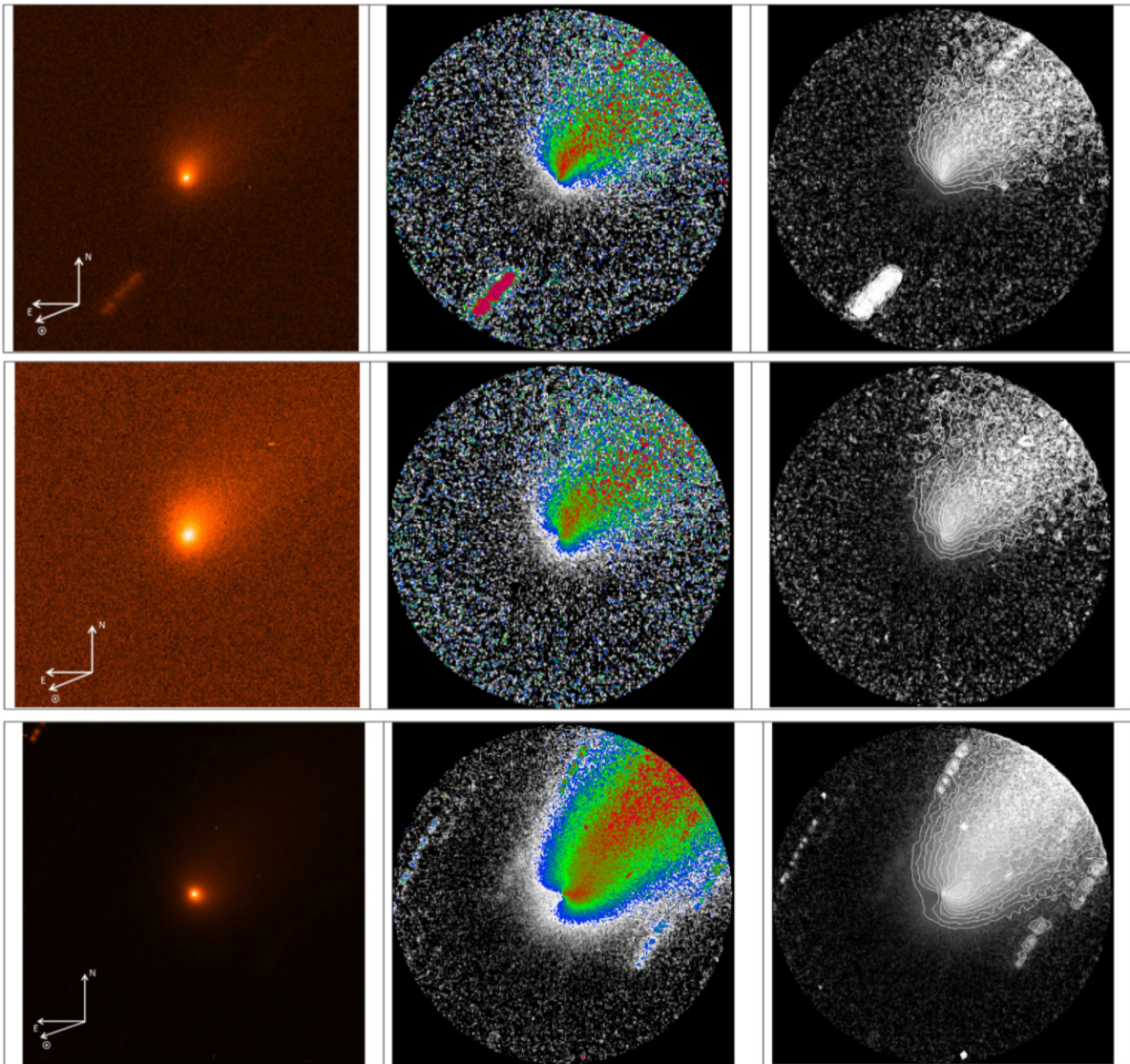


FIGURE 4.2 – Colonne de gauche : Images de 2I/Borisov obtenues avec la bande à large spectre R pour le 19 octobre 2019, 20 octobre 2019 et 2 décembre 2019 respectivement. Colonne du milieu et de droite : Images obtenues grâce à différentes méthodes d'amélioration d'image. | Source [23]

Les auteurs constatent, dans les deux premières lignes de la FIGURE 4.2, qu’outre la queue de 2I/Borisov qui s’étend dans la direction antisolaire, il y a une structure intrigante qui, elle, est dirigée dans la direction antisolaire. Les auteurs ont alors repris les observations du 12 octobre 2019 d’une autre étude menée par Bollin et Lisse en 2020 avec le télescope Hubble Space Telescope (HST). Ils ont alors constaté cette même structure dirigée vers la direction antisolaire et l’ont alors interprétée comme un jet localisé qui peut être considéré comme l’émission de la molécule CN (cyanogène). Il n’est pas rare de retrouver ce même phénomène pour des comètes du Système solaire.

Sur l’image en bas à droite de la FIGURE 4.2 (obtenue le 2 décembre 2019), les auteurs de l’article constatent que la morphologie de la chevelure de la comète interstellaire est particulière. En effet, on dirait que celle-ci est divisée en deux lobes. Ce type de structure est qualifié de bilobé (pour deux lobes). Cette morphologie bilobée est, selon les auteurs, certainement due à la présence d’une aire active sur la surface du noyau combinée aux propriétés de rotation de la comète. En effet, cette surface active entraîne une modification des trajectoires des jets de poussière qui sont alors tordues (à cause de la rotation du noyau) provoquant ainsi cette structure particulière.

Pour la suite, les auteurs ont utilisé l’ensemble des filtres UBVR_I et ont obtenu les résultats se trouvant dans les tableaux de la figure 4.3 pour les nuits du 19 octobre 2019, 20 octobre 2019 et 2 décembre 2019. Les auteurs n’ont pas jugé pertinent de prendre les mesures de la luminosité de 2I/Borisov avec le filtre I pour la nuit du 20 décembre 2019 mais ne donnent aucune explication dans l’article.

Les ouvertures de référence, données en kilomètres, correspondent aux ouvertures du télescope répertoriées à la distance de la comète à la date. Elles ont été ajustées pour comparer les images aux trois dates considérées de manière pertinente.

Dans le dernier tableau de la FIGURE 4.3, les auteurs ont décidé de se fixer arbitrairement l’ouverture de référence à $r_2 \sim 10^4$ km. Il existe une décroissance monotone des magnitudes en fonction du temps pour le filtre $U - B$ et la présence d’une soudaine augmentation de la magnitude pour le filtre $B - V$ à l’approche du périhélie. Cela peut s’expliquer par la présence de composants sur la comète qui perturbent les mesures à l’approche du périhélie.

Ce tableau met en évidence une décroissance de la valeur $U - B$ qui est la différence des magnitudes observées avec le filtre U et le filtre B respectivement. En effet, plus la comète interstellaire se rapproche du périhélie, le 2 décembre 2019, plus la valeur de $U - B$ décroît (de 0.35 ± 0.05 pour le 19 octobre 2019 à -0.07 ± 0.05 pour le 2 décembre 2019).

La colonne $B - V$ du tableau de la FIGURE 4.3 met en évidence que la valeur $B - V$, obtenue en faisant la différence entre la valeur de la magnitude observée avec le filtre B et celle observée avec le filtre V , est constante et proche de la valeur obtenue pour le Soleil. Alors que, lorsque la comète 2I/Borisov est proche de son périhélie (2 décembre 2019) la valeur pour $B - V$ augmente significativement de 0.12 mag. Les auteurs ont émis l’hypothèse que cela pouvait être causé par une augmentation du flux de B (émission de CN) combinée avec une augmentation du flux de V (émission de C_2). En effet, ces deux molécules font partie intégrante de la composition de 2I/Borisov, ainsi que des comètes

r	U	B	V	R	I
r ₁	18.52 ± 0.03	18.11 ± 0.03	17.45 ± 0.07	16.98 ± 0.05	16.48 ± 0.08
r ₂	18.15 ± 0.03	17.80 ± 0.03	17.16 ± 0.07	16.69 ± 0.05	16.20 ± 0.08
r ₃	17.69 ± 0.03	17.40 ± 0.03	16.80 ± 0.07	16.36 ± 0.05	15.86 ± 0.08

r	U	B	V	R
r ₁	18.35 ± 0.07	18.13 ± 0.11	17.45 ± 0.05	16.94 ± 0.04
r ₂	17.98 ± 0.07	17.78 ± 0.11	17.14 ± 0.05	16.63 ± 0.04
r ₃	17.46 ± 0.07	17.37 ± 0.11	16.77 ± 0.05	16.27 ± 0.04

r	U	B	V	R	I
r ₁	17.74 ± 0.04	17.75 ± 0.03	16.98 ± 0.02	16.50 ± 0.02	16.07 ± 0.05
r ₂	17.37 ± 0.04	17.44 ± 0.03	16.68 ± 0.02	16.20 ± 0.02	15.79 ± 0.05
r ₃	16.91 ± 0.04	17.07 ± 0.03	16.30 ± 0.02	15.84 ± 0.02	15.44 ± 0.05

	U - B	B - V	V - R	R - I
2019-Oct-19	0.35 ± 0.05	0.64 ± 0.07	0.46 ± 0.08	0.49 ± 0.10
2019-Oct-20	0.20 ± 0.13	0.65 ± 0.12	0.51 ± 0.06	-
2019-Dec-02	-0.07 ± 0.05	0.76 ± 0.04	0.47 ± 0.03	0.42 ± 0.05
Solar colours ^(a)	0.173 ± 0.064	0.642 ± 0.016	0.354 ± 0.010	0.332 ± 0.008
1I/Oumuamua ^(b)	-	0.70 ± 0.06	0.45 ± 0.05	-
Mean LPC ^(c)	-	0.78 ± 0.02	0.47 ± 0.02	0.42 ± 0.03

FIGURE 4.3 – Les trois premiers tableaux reprennent les différentes mesures de luminosité obtenues par le télescope équipé de chaque filtre UBVR_I séparément pour les nuits du 19 octobre 2019, 20 octobre 2019 et 2 décembre 2019 respectivement et pour des ouvertures de référence $r_1 \sim 7 \times 10^3$ km, $r_2 \sim 10^4$ km et $r_3 \sim 1.5 \times 10^4$ km. Le dernier tableau reprend les différentes magnitudes pour les filtres $U - B$, $B - V$, $V - R$ et $R - I$ pour les trois nuits étudiées (ouverture de 10^4 km) ainsi que pour le Soleil et 1I/Oumuamua. | Source [23]

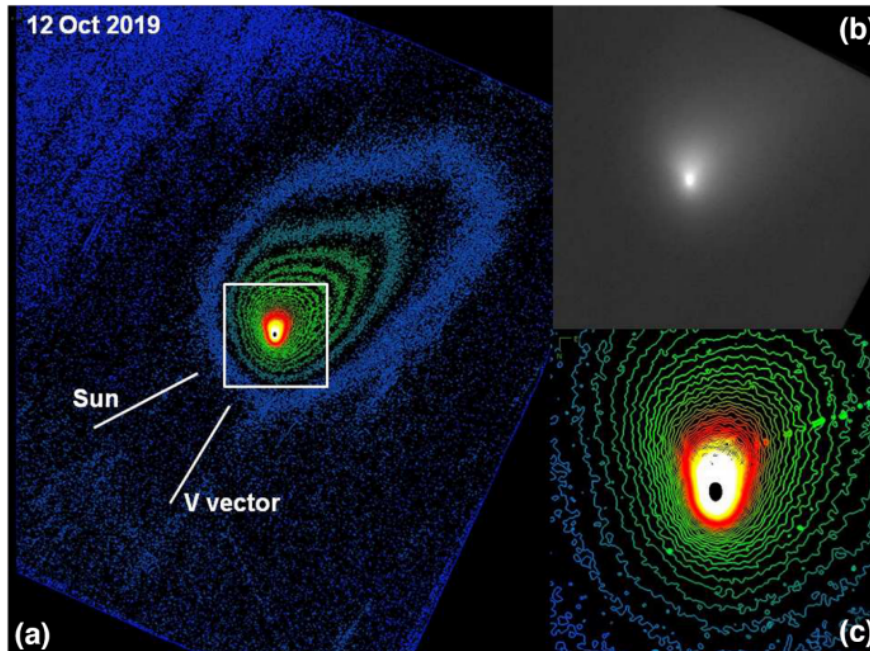


FIGURE 4.4 – Image de 2I/Borisov obtenue à l’aide du télescope HST (Hubble) le 12 octobre 2019. (a) Image qui met en évidence les différentes courbes de luminosité, aussi appelée isophote (voir lexique). (b) Cliché original de la comète 2I/Borisov. (c) Agrandissement de la photo (a) permettant d’avoir une meilleure vue sur le noyau de 2I/Borisov. | Source [21]

du Système solaire (cfr. section 2.5 sur la composition et origine de 2I/Borisov). Si ces deux composantes augmentent à l’approche du périhélie, alors les valeurs pour les filtres B et V sont respectivement perturbées et la valeur $B - V$ est également perturbée (et, dans ce cas-ci, elle augmente).

Les auteurs de l’article *A colour portrait of the interstellar comet 2I/Borisov* [23] ont conclu de tous ces résultats que la chevelure de 2I/Borisov présentait des caractéristiques similaires à celles des chevelures des comètes à courtes périodes (comètes de la famille des comètes de Jupiter) présentes dans le Système solaire.

4.2 Morphologie de la queue de poussière de 2I/Borisov

Dans l’article *Interstellar comet 2I/Borisov exhibits a structure similar to native Solar system comets*, F. Manzini et ses collaborateurs ont pu compléter les données connues de la comète interstellaire 2I/Borisov en calculant notamment la taille de la queue de poussière de cette dernière. Pour ce faire, ils ont utilisé les images obtenues par le télescope HST, plus communément appelé le télescope Hubble, datant du 12 octobre 2019 (FIGURE 4.4). La figure comprend trois images différentes ; L’image (a) met en évidence les différentes isophotes (courbes de luminosité) de la comète interstellaire. L’image (b) est le cliché original obtenu par le télescope Hubble et l’image (c) est une image agrandie de l’image (a) pour avoir une meilleure vue sur le noyau de 2I/Borisov.

Tout d’abord, la FIGURE 4.4 permet de mettre en évidence le fait que la queue de poussières est dirigée dans la direction anti-solaire, comme pour les comètes de notre sys-

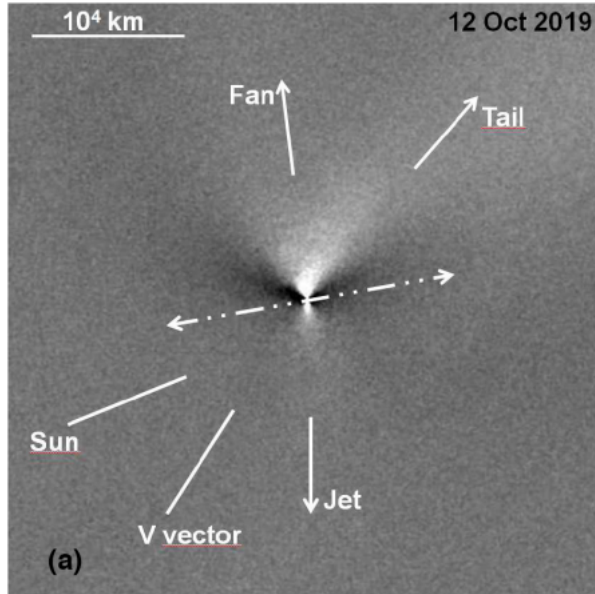


FIGURE 4.5 – Image prise par le télescope Hubble mettant en évidence les jets à $PA \sim 180^\circ$ et l’axe de rotation de la comète interstellaire. | Source [21]

tème solaire. Elle permet aussi d’avoir une idée précise de la taille de la queue de poussière de la comète interstellaire, qui a une longueur correspondant à 8.1×10^4 km.

De plus, les auteurs estiment le rayon des grains de poussière présents dans la queue de poussière de 2I/Borisov entre 30 et $100 \mu\text{m}$ ce qui se rapproche des tailles que l’on peut retrouver dans les queues de poussières des comètes du Système solaire (cfr. section queue de poussières chapitre 1).

Les auteurs des articles [23] et [21] s’accordent sur l’existence d’une aire active située à $PA \sim 180^\circ$ et que son homologue à $PA \sim 10^\circ$ expliquant le fait que les jets de poussières sont tordus et donnent ainsi une structure bilobée à 2I/Borisov. Pour rappel, l’angle de position (en anglais position angle, abrégé en PA) est une mesure d’angle utilisée pour décrire les étoiles binaires visuelles. Il est défini comme l’écart angulaire (habituellement exprimé en degrés) de l’étoile secondaire à la primaire par rapport au pôle nord céleste. Cela permet de se rendre compte que l’aire active se trouve proche de la position équatoriale de la comète interstellaire. Grâce à cette structure bilobée, il est alors possible de trouver l’axe de rotation de la comète interstellaire.

À la FIGURE 4.5, les auteurs mettent en évidence la direction du Soleil, la direction de la trajectoire de la comète interstellaire, la direction des jets de poussière de cette dernière (situé à $PA \sim 10^\circ$ et à $PA \sim 180^\circ$), la structure bilobée ainsi que l’axe de rotation de 2I/Borisov (en pointillés). Grâce à cette configuration, il est alors possible de se rendre compte que l’axe de rotation se trouve approximativement à $PA \sim 100^\circ$ et $PA \sim 100^\circ + 180^\circ = 280^\circ$.

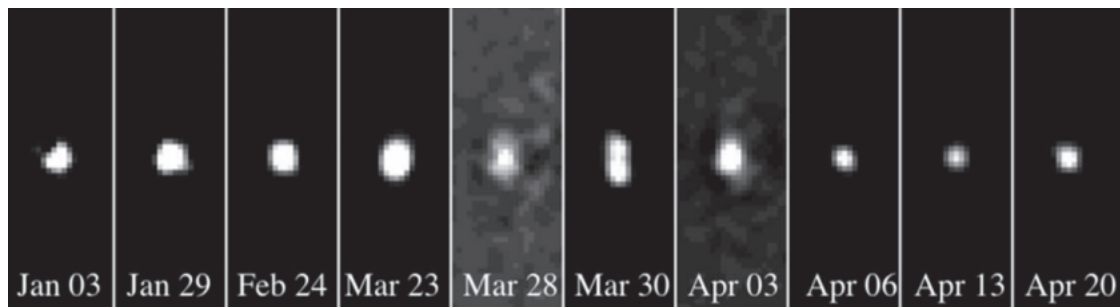


FIGURE 4.6 – Comportement du noyau de la comète interstellaire du 3 janvier 2020 au 20 avril 2020.

4.3 Explosion et fragmentation de la comète interstellaire

Depuis sa découverte, 2I/Borisov a suscité un intérêt majeur notamment en vue d'obtenir des informations sur le monde qui nous entoure en comparant ses caractéristiques et son comportement à ceux des comètes de notre Système solaire. Dans cette optique, les auteurs de l'article *Outburst and Splitting of Interstellar Comet 2I/Borisov* [13] se sont intéressés à un événement particulier que la comète interstellaire a subi lors de sa traversée de notre Système solaire.

Pour rappel, la comète interstellaire a atteint son périhélie le 8 décembre 2019 (distance de 2.007 ua du Soleil). À ce moment-là, il a été noté que le rayon du noyau de la comète était compris entre 0.2 et 0.5 km suivant les observations faites sur les images du télescope Hubble (HST). Pour la suite, les auteurs de l'article [13] ont décidé de prendre 0,5 km comme rayon de référence du noyau de 2I/Borisov.

Pendant la période du 4 au 9 mars 2020, les chercheurs ont remarqué comme une explosion d'une ampleur lumineuse d'environ 0.7 mag. La FIGURE 4.6, montre l'évolution du noyau de 2I/Borisov entre le 3 janvier 2020 et le 20 avril 2020. Sur le cliché du 28 mars 2020, on constate que le noyau se comporte différemment par rapport aux clichés des périodes précédentes. En effet, il semblerait que le noyau se soit fragmenté en deux et cela se confirme sur l'image du 20 mars 2020. Ce qui est intrigant, c'est qu'à partir de l'image du 3 avril 2020, nous n'observons à nouveau qu'un seul corps comme si les deux parties du noyau fragmenté s'étaient ressoudées.

La vitesse d'éjection des particules de 2I/Borisov est donnée par la formule

$$V_e = \left(\frac{8\pi G \rho}{3} \right)^{1/2} r_n \quad (4.1)$$

où G est la constante gravitationnelle, ρ la densité du noyau et r_n est le rayon du noyau. Les auteurs ont décidé de prendre la densité du noyau $\rho = 500 \text{ kg m}^{-3}$ et son rayon $r_n = 0.5 \text{ km}$. Cela donne une vitesse d'éjection de 0.26 m s^{-1} , ce qui est similaire à la vitesse d'éjection des comètes du Système solaire connues et observables qui est comprise entre 0.1 et 10 m s^{-1} .

Cette vitesse d'éjection étant peu élevée, elle ne peut contrebalancer la gravité présente sur la partie primaire du noyau ; cela explique que la partie fragmentée du noyau n'est pas éjectée avec les particules de poussière.

En conclusion, une explosion a été observée au niveau du noyau de 2I/Borisov durant les premiers jours du mois de mars 2020 laissant ainsi le noyau fragmenté en deux. Étant donné que la vitesse d'éjection de la comète interstellaire est faible, le morceau fragmenté lors de l'explosion ne peut être éjecté et par l'effet de la gravitation les deux morceaux du noyau sont attirés et semblent ne plus faire qu'un à partir du 4 avril 2020 (FIGURE 4.6).

Chapitre 5

Conclusion

Le but de ce mémoire étant d'en apprendre plus sur 2I/Borisov et de pouvoir la comparer avec les comètes natives de notre Système solaire, nous pouvons conclure que ;

1. 2I/Borisov a été découvert le 30 août 2019 par l'astronome Guennadi Borisov et a atteint son périhélie (à une distance de 2.007 du Soleil) le 8 décembre 2019.
2. 2I/Borisov a une morphologie similaire à celle des comètes du Système solaire, comportant une chevelure, une queue de poussière orientée dans le sens opposé à la direction du Soleil ;
3. 2I/Borisov possède une orbite hyperbolique comme certaines comètes observée dans le Système solaire. La grande différence se trouve au niveau de la valeur de l'excentricité. Là, où pour une comète du Système solaire, nous retrouvons une valeur proche de 1, celle de 2I/Borisov excède 3 ce qui confirme son origine interstellaire ;
4. 2I/Borisov a une masse estimée (en 2019) à 4×10^{14} kg et un rayon de 5,9 km ;
5. 2I/Borisov a rencontré de nombreuses étoiles au cours de son voyage. celle dont elle est passée le plus près est Ross 573, à une distance de 0,098 pc, il y a 909 000 ans ;
6. L'étude de la photométrie de la chevelure de 2I/Borisov révèle une structure bilobée due à une surface active au niveau du noyau de celle-ci.
7. La taille de la queue de poussière de la comète interstellaire est de $8.1 \times 10^4 km$, ce qui est similaire à la taille des queues de poussière des comètes natives du Système solaire.
8. L'axe de rotation de 2I/Borisov est à un angle de position $PA \approx 100^\circ$ et 280° .
9. 2I/Borisov a subi une explosion fragmentant ainsi son noyau en 2 parties. La vitesse d'éjection étant faible par rapport à la gravitation, le morceau fragmenté du noyau n'est pas envoyé dans la queue de poussières.

Autant de similitudes et de différences qui font de 2I/Borisov un objet des plus fascinants. 2I/Borisov, ayant une trajectoire hyperbolique, ne pourra plus jamais être observée mais les données enregistrées pendant son passage seront encore épurées, étudiées et commentées pendant de nombreuses années par des équipes d'astronomes à travers le monde.

Bibliographie

- [1] ALLOPROF, *Les comètes*, <http://www.alloprof.qc.ca/BV/Pages/s1078.aspx>, 16 avril 2020.
- [2] AUBÉ M. ET ASSELIN L., *Les comètes*, fédération des astronomes amateurs du Québec, www.faaq.org/services/2015les_cometes.pptx, 2015.
- [3] ASTRONOMIA, *Nuage de Oort*, http://astronomia.fr/2eme_partie/petitsCorps/nuageDeOort.php, 2 mai 2020.
- [4] BAILER-JONES ET AL., *A search for the origin of the interstellar comet 2I/Borisov*, Astronomy & Astrophysics manuscript no. borisov_gdr2, 1-7, 2019.
- [5] CHIMIX, OPTIQUE : DIAMÈTRE APPARENT, LOUPE, OCULAIRE DE MICROSCOPIE, <http://www.chimix.com/an8/prem8/devoir16.htm>
- [6] CORDINER M.A. ET AL., *Unusually High CO Abundance of the First Active Interstellar Comet*, Nature Astronomy, 1-14, 2020.
- [7] CROVISIER J., *Comment ont-ils dessiné les comètes ? Les comètes dans les arts*, https://lesia.obspm.fr/perso/jacques-crovisier/promenade/pro_comete_dessin.html, 30 avril 2020.
- [8] DEBIONNE G., *Delaunay et Tisserand*, http://www.astrosurf.com/quasar95/exposes/tisserand_delaunay_2.pdf, 2010.
- [9] DEBLAUWE V., *Les comètes*, morphologie d'une comète, <http://users.skynet.be/deblauwe/general/morpholo.htm>, 12 avril 2020.
- [10] ESPACE POUR LA VIE, *lexique d'astronomie*, <https://espacepurlavie.ca/lexique-dastronomie>, 1 mai 2020.
- [11] FELDMANN J.B., *Comète interstellaire Borisov : elle avait déjà été détectée en 2018*, <https://blogs.futura-sciences.com/feldmann/2019/11/20/comete-interstellaire-elle-avait-deja-ete-detectee-en-2018/>, 13 mai 2020.
- [12] GURUMED, *Découverte de l'objet le plus éloigné dans le système solaire*, <https://www.gurumed.org/2015/11/12/dcouverte-de-lobjet-le-plus-loign-dans-le-systme-solaire/>, 2 mai 2020.
- [13] DAVID JEWITT CO, *Outburst and Splitting of Interstellar Comet 2I/Borisov*, 20 juin 2020.
- [14] JOHNSTON W.R., *2I Borisov (2019 Q4) : The second interstellar object within our solar system*, http://www.johnstonsarchive.net/astro/2I_borisov.html, 13 mai 2020.
- [15] LA COSMOLOGIE, *Ceinture de Kuiper*, <http://la-cosmologie.e-monsite.com/pages/systeme-solaire/page-13.html>, 2 mai 2020.

- [16] LAM, *Rosetta détecte de l'azote moléculaire pour la première fois dans une comète*, <https://www.lam.fr/les-actualites/article/rosetta-detecte-de-l-azote>, 15 avril 2020.
- [17] LE CIEL, *La ceinture de Kuiper*, <http://le-ciel.eu/la-ceinture-de-kuiper.html>, 2 mai 2020.
- [18] LES CONSTELLATIONS, *nuage de oort definition*, <https://www.semconstellation.fr/nuage-de-oort-definition/>, 1 mai 2020.
- [19] LEE CHIEN-HSIU *Early Observations of the Interstellar Comet 2I/Borisov*, Géosciences, 17 décembre 2019.
- [20] LUU J. ET JEWITT D. *La ceinture de Kuiper*, http://craq-astro.ca/phy1971/profs/robert/article_1.pdf, 1 mai 2020.
- [21] , F. MANZINI AND CO., *Interstellar comet 2I/Borisov exhibits a structure similar to native Solar system comets*, 12 avril 2022.
- [22] MARATREY JP., *Les comètes*, <http://www.astrosurf.com/quasar95/exposes/cometes.pdf>, 15 avril 2015.
- [23] E. MAZZOTTA, E. DOTTO, D. PERNA, S. IEVA, A. GIUNTA, P. PALUMBO, M. MICHELI, *A colour portrait of the interstellar comet 2I/Borisov*, 8 septembre 2021.
- [24] Nasa, *Small-Body Database Lookup*, https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=C%2F2019%20Q4&view=VOP, 24 mars 2022.
- [25] PGJ ASTRONOMIE, *Les différentes familles de comètes*, <https://pgj.pagesperso-orange.fr/familles.htm>, 2 mai 2020.
- [26] RIVET J.-P., *Introduction à l'astronomie*, https://www.oca.eu/images/LAGRANGE/pages_perso/rivet/pdf/Astro.pdf, 2011.
- [27] ROUSSELOT P., *Les comètes et leurs secrets de l'antiquité à Rosetta*, éditions ellipses, Paris, France, 2018.
- [28] SACCO L., *La comète interstellaire 2I/Borisov a une composition atypique*, <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/objet-interstellaire-comete-interstellaire-2i-borisov-composition-atypique-77559/>, 13 mai 2020.
- [29] STELLARTRIP, *Comète 2019 Y4 ATLAS – Analyse spectrale*, <http://stellartrip.net/comete-2019-y4-atlas-analyse-spectrale/>, 6 avril 2020.
- [30] TON'S GUIDE, *Hubble observe sa première comète interstellaire*, <https://www.tomsguide.fr/hubble-observe-sa-premiere-comete-interstellaire/>, 9 mai 2020.
- [31] TRAVEL CHINA GUIDE, *Mawangdui han tombs*, <https://www.travelchinaguide.com/attraction/hunan/changsha/mawangdui.htm>, 30 avril 2020.
- [32] WEBASTRO, *Comètes : Trajectoires*, http://www.jmmasuy.net/objets_speciaux/cometes_2_trajectoires.html, 3 mai 2020.
- [33] WIKIPEDIA, *2I/Borisov*, <https://fr.wikipedia.org/wiki/2I/Borisov>, 5 mars 2020.
- [34] WIKIPÉDIA, *Angle de position*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Angle_de_position#:~:text=En%20astronomie%2C%20l%27%20angle%20de%20position%20%28en%20anglais,la%20primaire%20par%20rapport%20au%20p%C3%B4le%20nord%20c%C3%A9leste, 15 novembre 2021.

Annexe A

Lexique

Les définitions sont reprises des sources suivantes : [10], des cours de mécanique (donné par Terwagne G.), d'astrophysique (donné par Terwagne G.), astronomie (donné par Fuzfa A.), mécanique céleste et résonance (donné par Lemaitre A.).

- **Aphélie** : point de l'orbite se situant au plus loin du Soleil.
- **Albédo géométrique** : rapport entre l'énergie électromagnétique bolométrique réfléchi par un objet avec un angle de phase α nul et l'énergie d'une surface fictive, plane, parfaitement réfléchissante isotrope dans les mêmes conditions que l'objet (bolométriquement et d'angle de phase nul) et de même cross-section effective. Cette mesure ne possède pas d'unité.
- **Angle de phase** : angle formé par le Soleil, l'objet et un observateur terrestre.
- **Angle de position** : en astronomie, l'angle de position (en anglais position angle, abrégé en PA) est une mesure d'angle utilisée pour décrire les étoiles binaires visuelles. Il est défini comme l'écart angulaire (habituellement exprimé en degrés) de l'étoile secondaire à la primaire par rapport au pôle nord céleste.
- **Angstorm** : unité de longueur, notée A . Une unité de angstorm est équivalent à 1×10^{-10} mètres.
- **APASS** : relevé photométrique de tout le ciel.
- **Astéroïde de type D** : astéroïde possédant un très faible albédo.
- **Bande V** : la bande V (visible) correspond au maximum de sensibilité de l'œil humain, c'est pourquoi les magnitudes apparentes des étoiles ou encore des comètes sont souvent données dans la bande V. La longueur d'onde centrale est $\lambda_c = 5500$ ang.
- **Ceinture d'astéroïdes ou ceinture principale** : région du système solaire située entre les orbites de Mars et de Jupiter où se concentre la majorité des astéroïdes.
- **Cross-section effective** : partie d'un astre éclairée par le Soleil et visible par un observateur terrestre.
- **Distance géocentrique** : distance entre l'objet et la Terre.
- **Distance héliocentrique** : distance entre l'objet et le Soleil.
- **Écliptique** : plan de l'orbite par la Terre lorsqu'elle tourne autour de Soleil.
- **Équateur** : grand cercle de la sphère terrestre ou lunaire dont le plan est perpendiculaire à l'axe des pôles.

- **Excentricité** : mesure de « l'aplatissement » de l'orbite elliptique qu'un corps décrit autour d'un autre corps.
- **Magnitude** : valeur numérique permettant de caractériser l'éclat d'un objet céleste.
- **Nœuds** : chacun des deux points d'intersection de l'orbite d'un astre avec un plan de référence. Lorsque le Soleil croise l'un de ces nœuds en allant de l'hémisphère nord à l'hémisphère sud, ce nœud s'appelle nœud descendant. Lorsque le Soleil croise l'un de ces nœuds en allant de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord, ce nœud s'appelle nœud ascendant.
- **Périhélie** : point de l'orbite se situant au plus proche du Soleil.
- **Raie de Swan** : raie spectrale du domaine visible, caractéristique des comètes et des étoiles carbonées mettant en évidence la présence de carbone diatomique C₂.
- **Résonance** : la résonance orbitale se produit entre trois objets. En effet, cela se produit lorsque deux objets gravitent autour d'un troisième. La résonance se note par une fraction qui indique le rapport entre leurs temps de révolution. Par exemple, les plutinos ont une résonance orbitale de 2 : 3 avec Neptune, ce qui signifie qu'ils peuvent parcourir deux fois leur orbite autour du soleil pendant que Neptune parcourt trois fois son orbite.
- **Unité astronomique (ua)** : unité de base de longueur utilisée pour mesurer les distances dans le système solaire. Elle correspond à la distance moyenne entre le Soleil et la Terre. 1 ua = 150 000 000 kilomètres.
- **Vent solaire** : flot de plasma produit par le Soleil. Celui-ci est composé essentiellement de particules chargées, aussi appelées ions.