



Les Vagabonds du cosmos

Pierre Lévesque
Club d'astronomie de Rimouski



Quand la visite s'invite

➤ 3i/Atlas



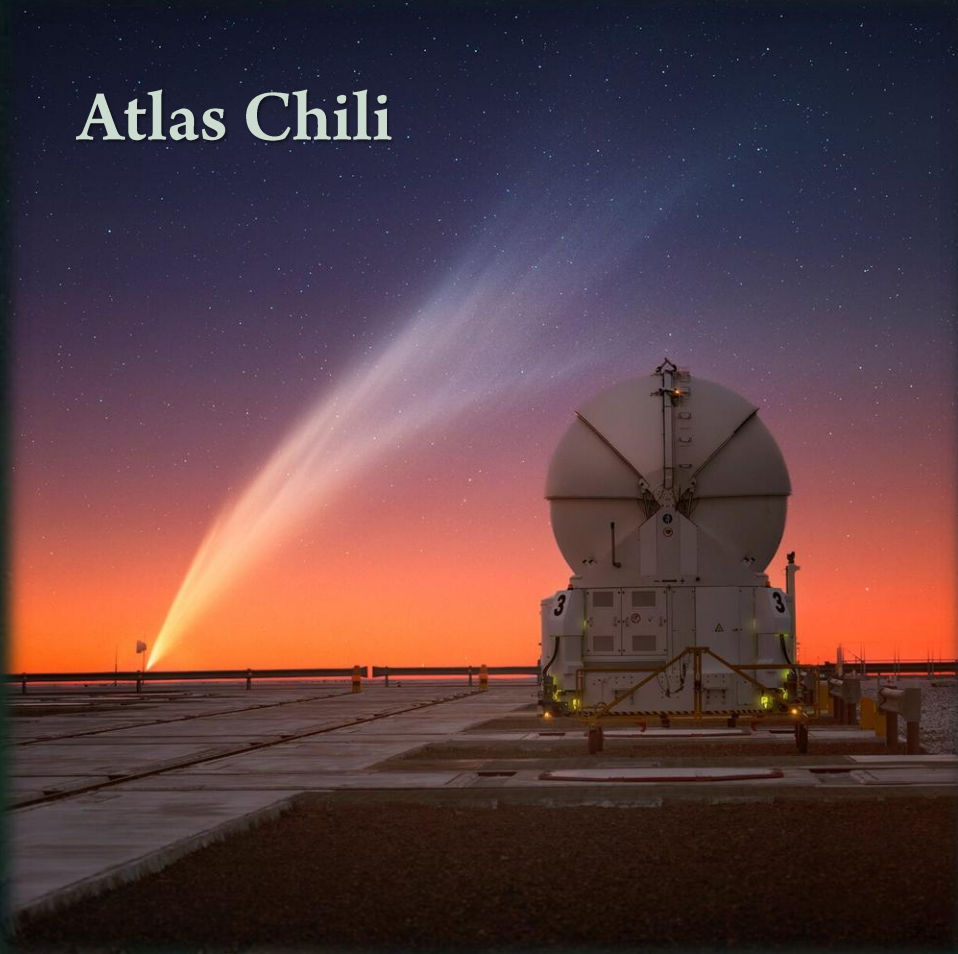
$\approx 2 \text{ UA}$

Photo Gemini, Chili
2025/08/27



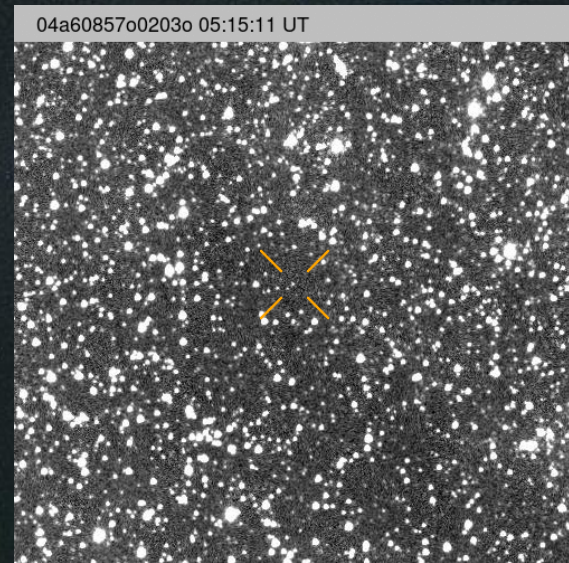
Quand la visite s'invite

Atlas Chili



➤ 3i/Atlas

■ Découverte Le 1^{er}
juillet 2025

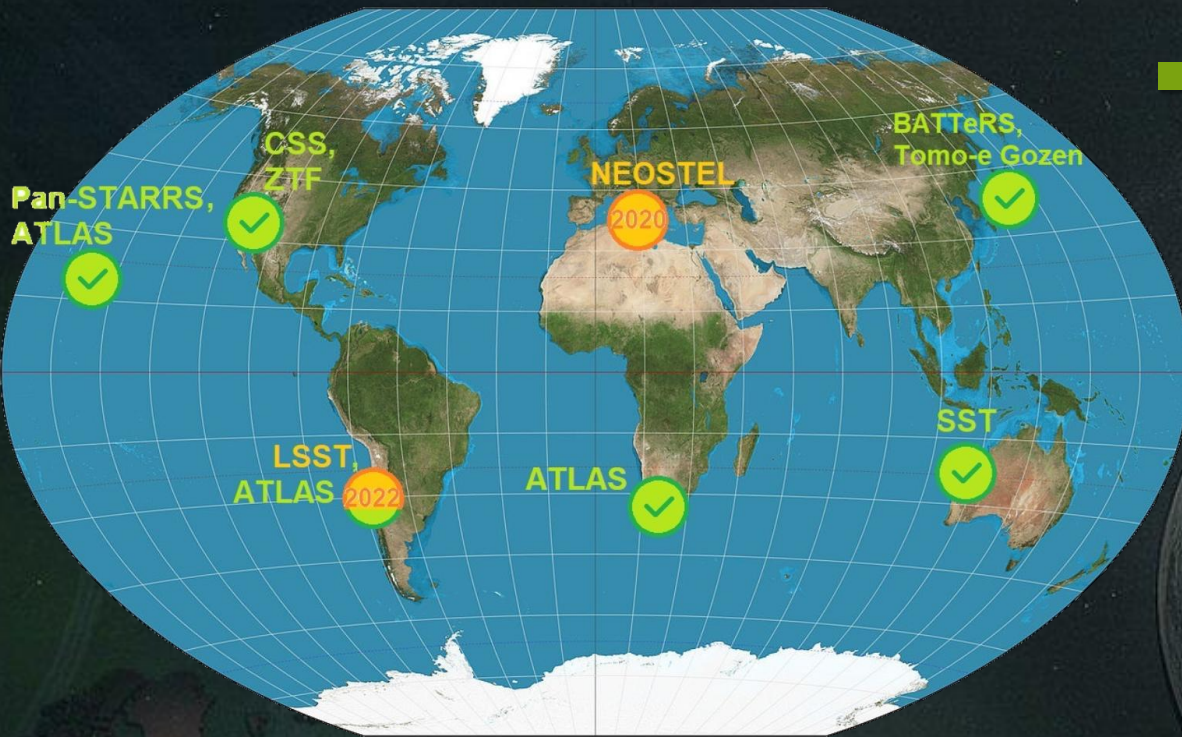


➤ Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System

Quand la visite s'invite

➤ 3i/Atlas

■ Découverte le 1^{er}
juillet 2005



➤ Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System

Quand la visite s'invite

➤ 3I/Atlas

■ Noyau : 320 m à 5,6 km

<https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-5829>
Preprint. Discussion started: 1 December 2025
© Author(s) 2025. CC BY 4.0 License.



3I/ATLAS: An Interstellar Crustal Fossil in the M-Relic (HLF) Framework for Small-Body Evolution

Abstract

AKM Eahsanul Haque^{1,2*}, Ismael Lopez³

3I/ATLAS (C/2025 N1), the third confirmed interstellar object, exhibits a unique combination of dynamical, compositional, and morphological anomalies. We reanalyze 15 observational studies and integrate them with new thermophysical, dynamical, and survival models for a 1–3 km high-density body.

3I/ATLAS

Quand la visite s'invite

➤ 31/Atlas

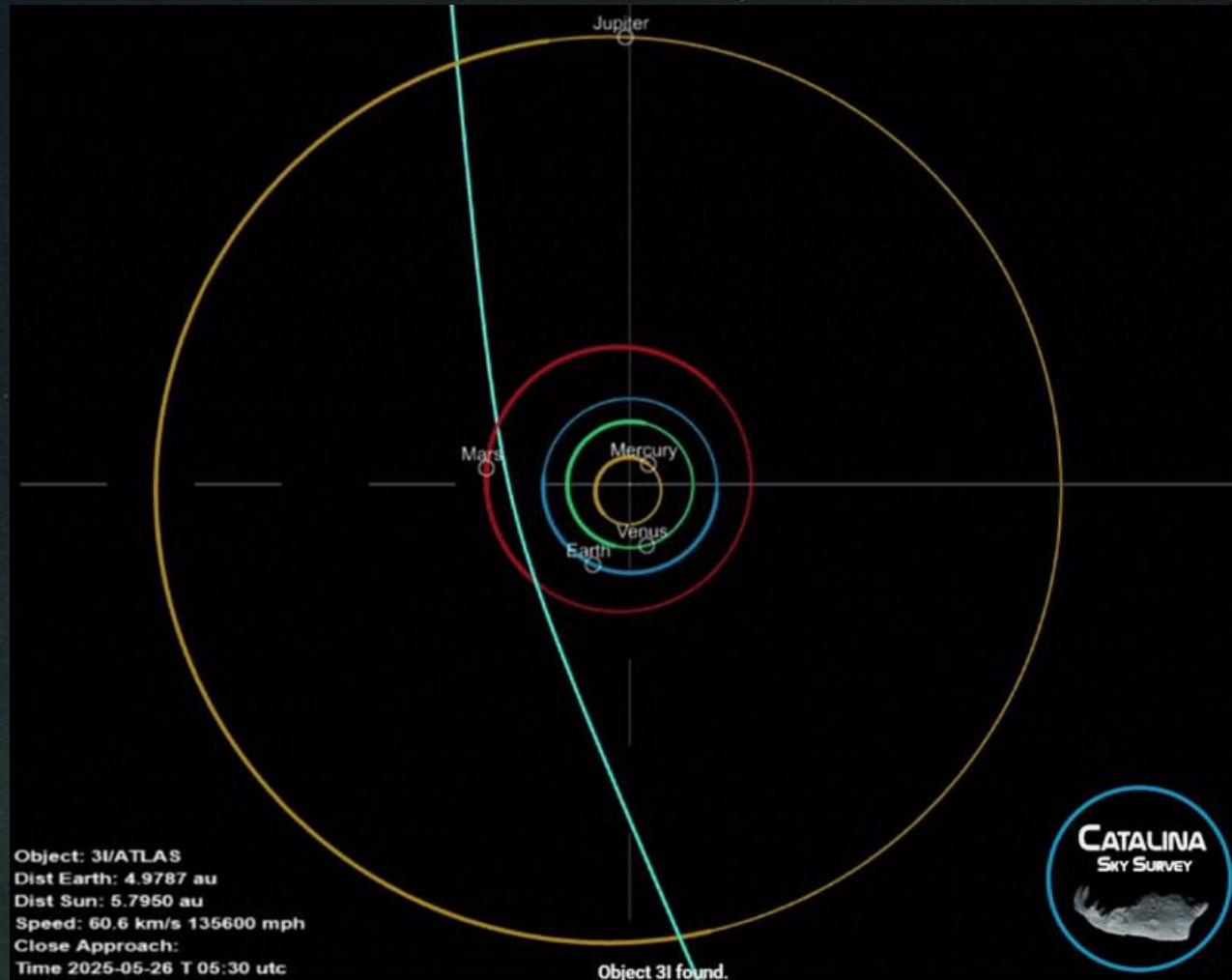
- Noyau : 320 m à 5,6 km
- Vitesse : 69 km/s ou
248 400 km/h
à sa découverte



Quand la visite s'invite

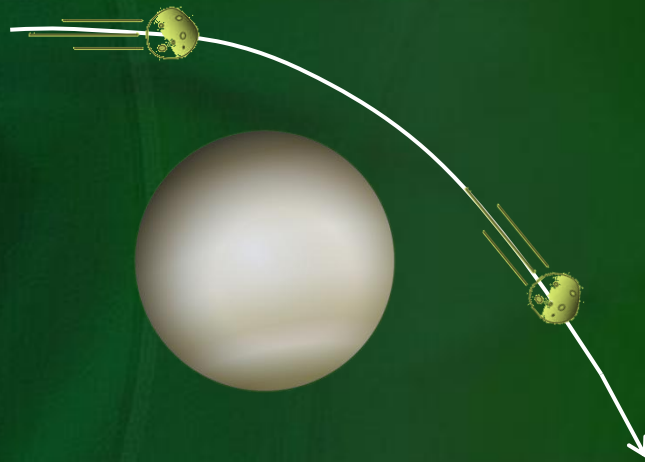
➤ 31/Atlas

■ Orbite très
ouverte



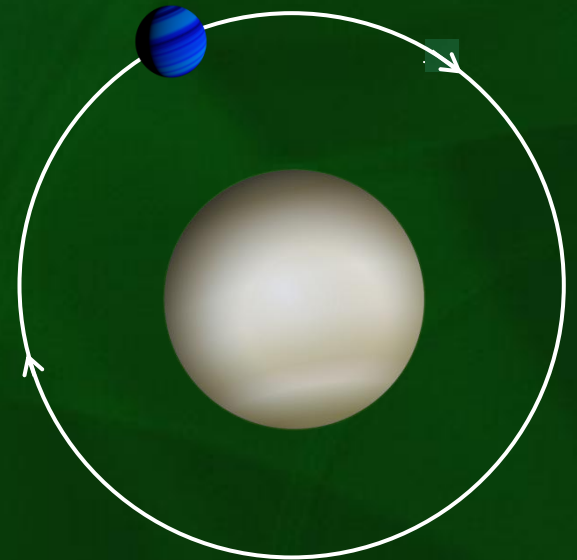
Rappel : qu'est-ce qu'une **orbite** ?

- Une *orbite* est une trajectoire courbe que décrit un astre autour d'un autre dans l'espace.



Orbite ouverte
appelée aussi **hyperbolique**

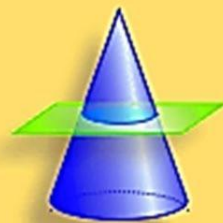
Orbite fermée



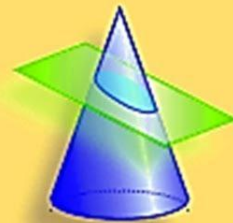
Qu'est-ce qu'une orbite ?

- Juste pour vous rappeler qu'une hyperbole...
 - Est une section conique

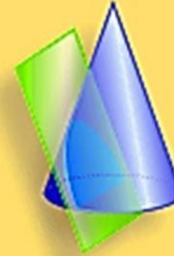
LES CONIQUES



Cercle



Ellipse



Parabole



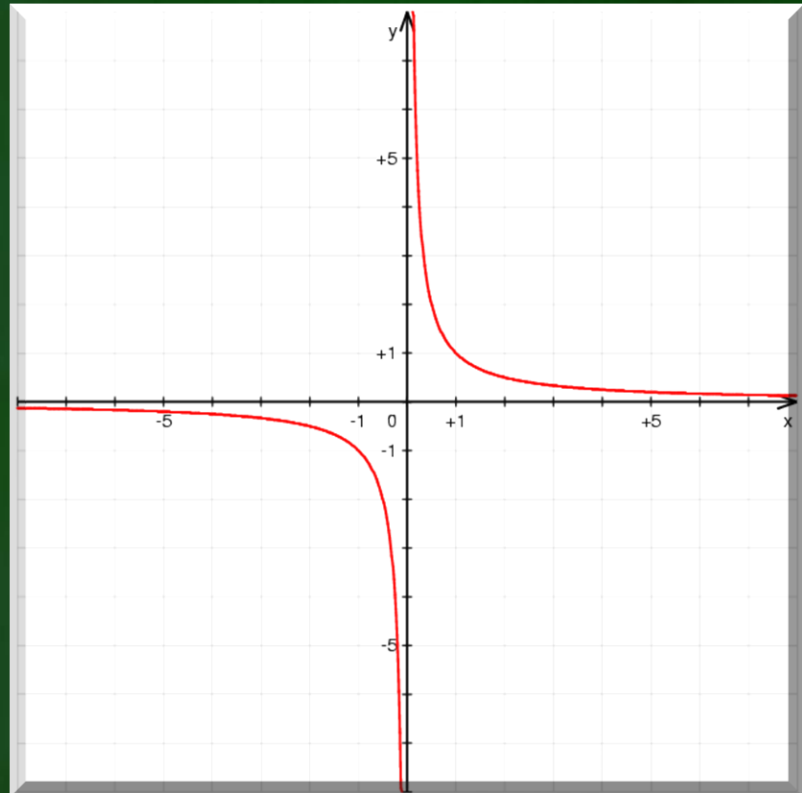
Hyperbole

Qu'est-ce qu'une orbite ?

- ... L'hyperbole est la courbe décrite par une fonction rationnelle dans un plan cartésien.

$$f(x) = \frac{1}{x}$$

■ où $x \neq 0$



Quand la visite s'invite

➤ 3i/Atlas (comète)

- Une orbite hyperbolique
 - Et une grande vitesse (69 km/s)
- Signifient que cet objet ne sera pas capturé par le Soleil,
- et qu'il ne provient pas du Système solaire.

3i/Atlas est un astre **interstellaire** !

Quand la visite s'invite

➤ 3i/Atlas

- On estime son âge à ≈ 7 milliards d'années.
- Sa composition comprend les mêmes éléments que les objets du Système solaire, mais...
 - ✓ CO^2 du coma > que les comètes usuelles.
 - ✓ Rapport Ni/Fe du noyau > que celui des comètes classiques.

3i/Atlas est un astre **interstellaire** !

Quand la visite s'invite

➤ 3I/Atlas

- On a aussi mis en évidence du cryovolcanisme sur la comète.

Spectrophotometric evidence for a metal-bearing, carbonaceous, and pristine interstellar comet 3I/ATLAS

**Josep M. Trigo-Rodríguez^{1,2}
Maria Gritsevich^{3,4},
and Jürgen Blum⁵**

¹Institut de Ciències de l'Espai (ICE, CSIC), Campus UAB, Carrer de Can Magrans S/N, Cerdanyola del Vallès, 08193, Catalonia, Spain. E-mail: trigo@ice.csic.es

²Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), Esteve Terradas 1, Edifici RDIT, Of. 212, Parc Mediterrani de la Tecnologia (PMT),

Campus del Baix Llobregat – UPC, Castelldefels (Barcelona), 08860, Catalonia, Spain

³Faculty of Science, University of Helsinki, Gustaf Hallströmin katu 2, FI-00014 Helsinki, Finland

⁴Institute of Physics and Technology, Ural Federal University, Mira str. 19, 620002 Ekaterinburg

⁵Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, Technische Universität Braunschweig, Mendelssohnstr 3, D-38106 Braunschweig, Germany

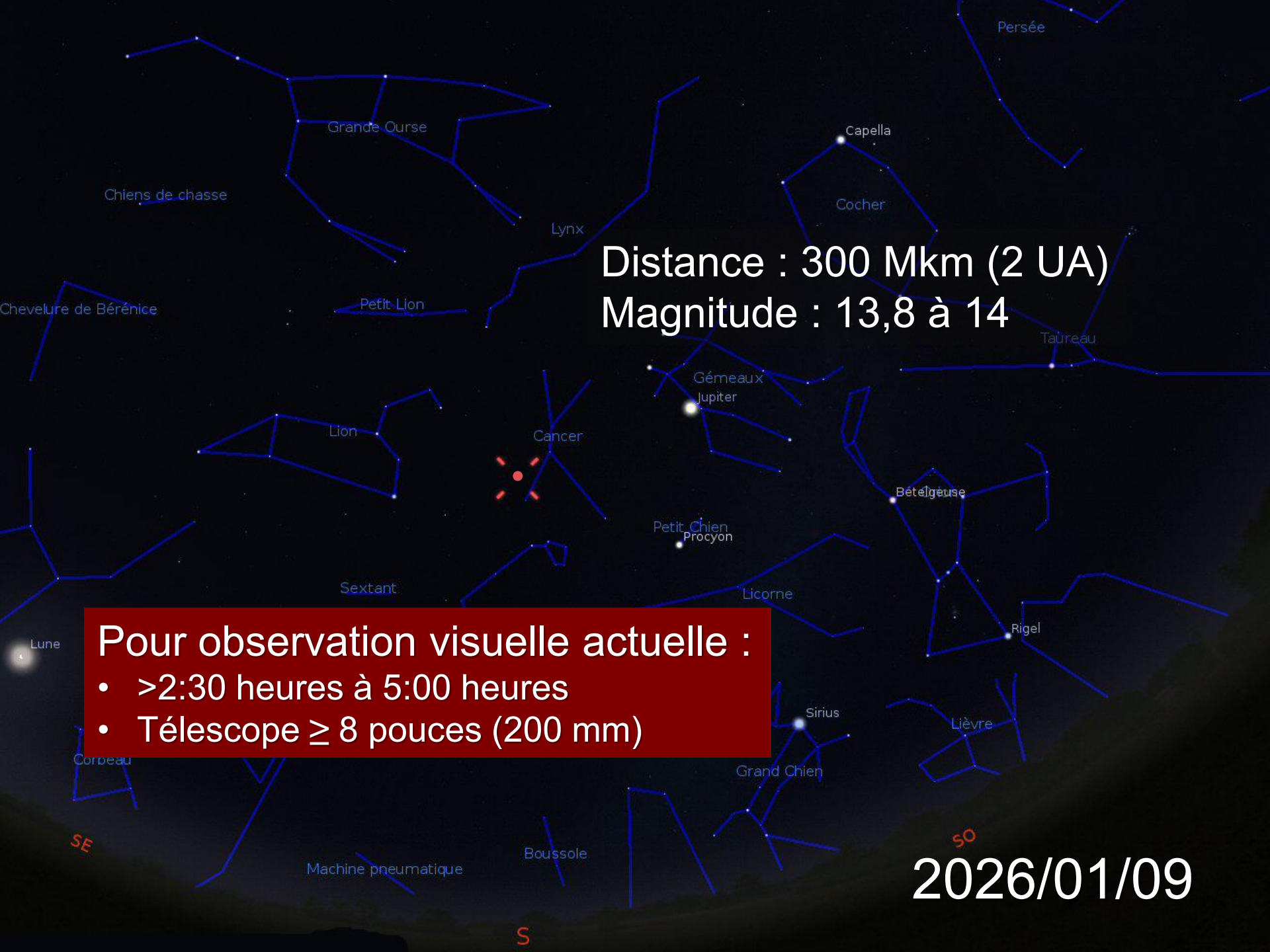


Quand la visite s'invite

➤ **3i/Atlas** est le 3^e objet interstellaire identifié formellement jusqu'à maintenant.

Interstellar visitor 3i/ATLAS, November 20, 4.05 UT
LRGB image 900/300/300/300 sec 12"/4 QHY 600 Michael Jäger, Gerald Rhemann





A detailed star chart of the Cancer constellation and its surroundings. The Cancer constellation is highlighted with a red outline and a red star at its center. Other constellations shown include Grande Ourse, Persée, Cocher, Taureau, Gémeaux, Lion, Sextant, Corbeau, Machine pneumatique, Boussole, Grand Chien, Lièvre, and Persée. Stars are labeled with names like Capella, Rigel, Sirius, and Betelgeuse. The chart is set against a dark blue background with a grid of lines.

Distance : 300 Mkm (2 UA)
Magnitude : 13,8 à 14

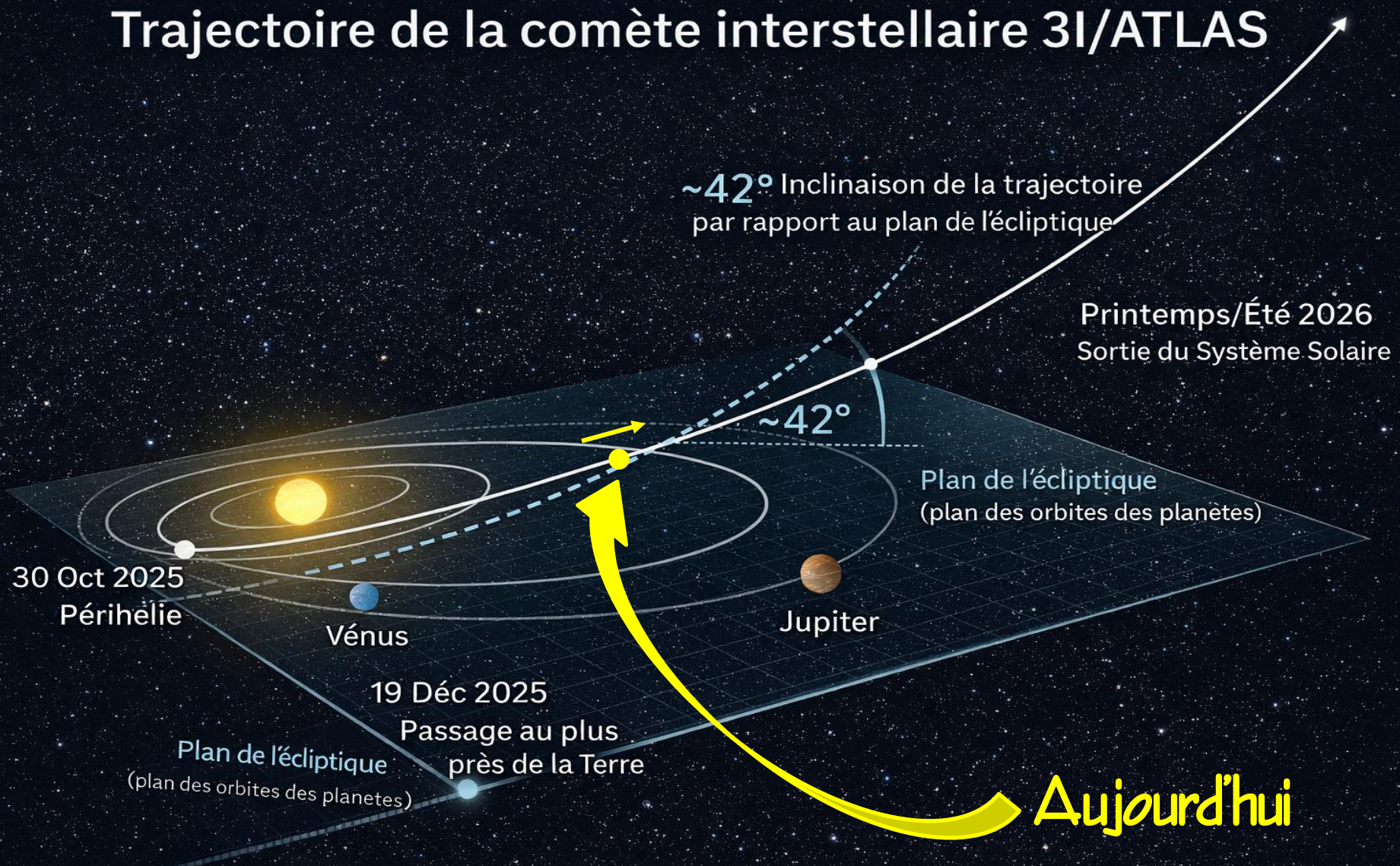
Pour observation visuelle actuelle :

- >2:30 heures à 5:00 heures
- Télescope $\geq$ 8 pouces (200 mm)

2026/01/09

Quand la visite s'invite

Trajectoire de la comète interstellaire 3I/ATLAS

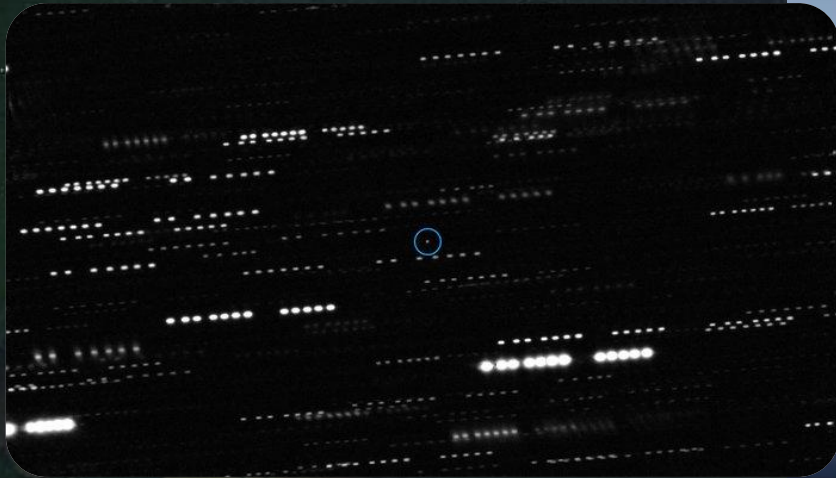


Quand la visite s'invite

➤ C 2017 U1 puis rebaptisé 1981064 AHU/2017 U1 fut le 1^{er}.

- Découvert le 19 octobre 2017.

- Télescope Pan-STARRS 1 à Hawaï



Quand la visite s'invite

➤ **C 2017 U1** puis rebaptisé **1i/Oumuamua** fut le 1^{er}.

Le mystère Oumuamua

«Messenger» en hawaïen

**Premier bolide interstellaire
découvert au sein
de notre système solaire**

Détecté
pour la 1^{ère} fois
en octobre 2017

Longueur : 400 m
Largeur : 48,8 m

- ▶ D'abord qualifié d'astéroïde (roche)
- ▶ Ensuite considéré comme une comète (glace)
- ▶ Son statut maintenant remis en question

Accélération excessive

Pas de signe d'une queue de comète



Quand la visite s'invite

➤ **C 2017 U1** puis rebaptisé **1I/ʻOumuamua** fut le 1^{er}.

- *Orbite hyperbolique*

- *Vitesse $26,3 \pm 87,7$ km/s
($94\,680 \pm 315\,720$ km/h)*



Jupiter

Earth Venus Mercury Sun

Mars

Quand la visite s'invite

➤ **2i/Borisov** fut la 2^e.

- Comète découverte le 30 août 2019
- Par un astronome amateur de Crimée (Gennadiy Borisov)



Quand la visite s'invite

➤ **2i/Borisov** fut la 2^e.

- Comète découverte le 30 août 2019
- Par un astronome amateur de Crimée (Gennadiy Borisov)
- Diamètre 975 m



Télescope Hubble
2019/10/12

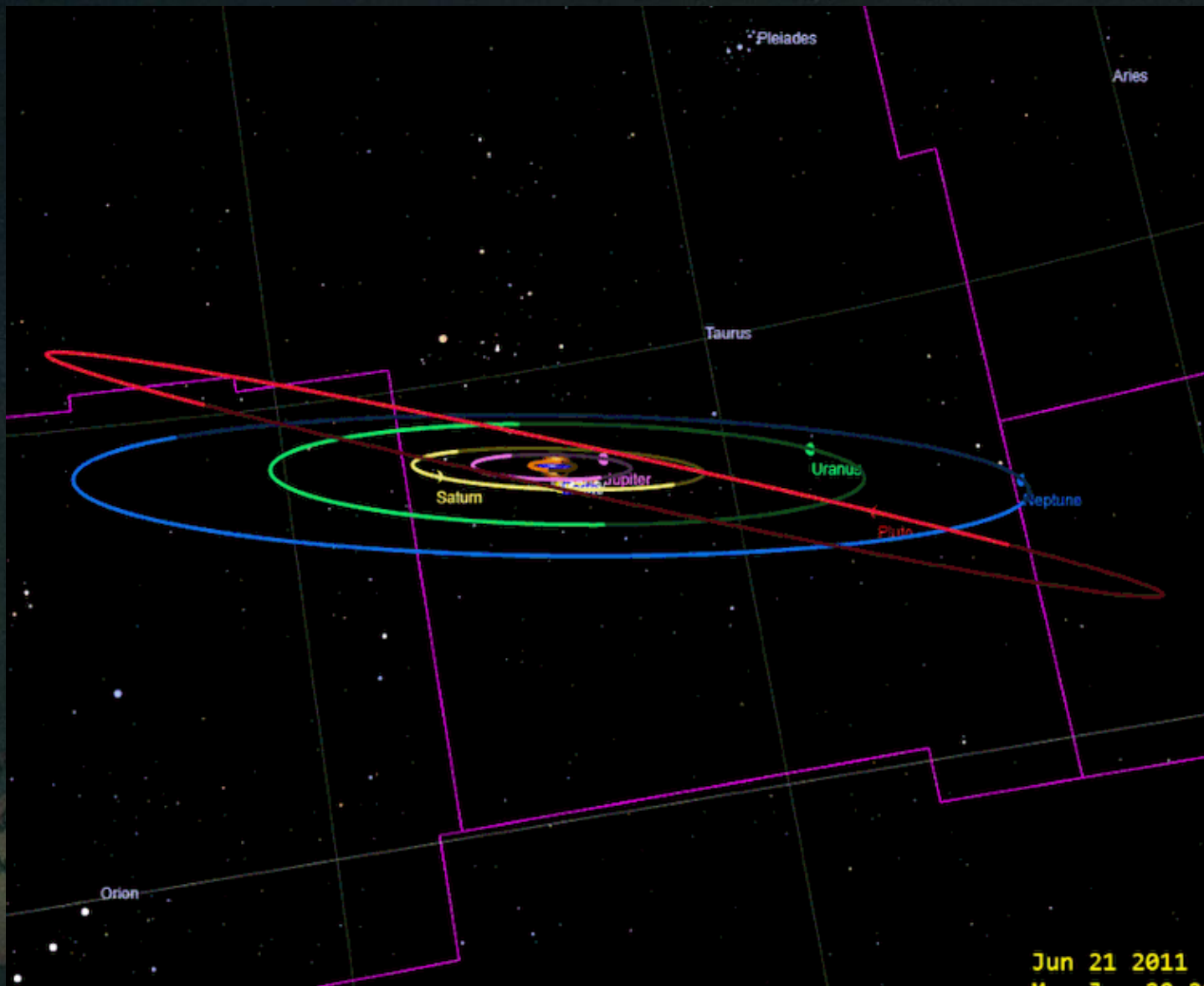
Quand la visite s'invite

➤ *2i/Borisov* fut la 2^e.

- *Orbite hyperbolique*
- *Vitesse variant de 32 à 44 km/s
ou 115 000 à 158 000 km/h*



Quand la visite s'invite



Quand la visite s'invite

➤ Pourquoi 2i/Borisov ?

- Le i signifie *interstellaire*
- Le 2 signifie Le 2^e objet répertorié du genre



Quand la visite s'invite

➤ Bien sûr, il n'en fallait pas plus pour que...

➤ Abraham (Avi) Loeb

- Ancien directeur du Département d'astronomie de l'Université Harvard,
- Directeur du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian,
- Président du Conseil de physique et d'astronomie de la National Academy.
- Directeur de l'initiative sur les trous noirs de l'Université Harvard,
- Directeur du projet Galileo,



Quand la visite s'invite

➤ Bien sûr, il n'en fallait pas plus pour que...

1I/Oumuamua



3I/Atlas



Quand la visite s'invite

➤ Il y peut-être pire, croyez-Le ou non...

CHAPITRE 2 | ▼

EVANGILE DE JÉSUS-CHRIST SELON SAINT MATTHIEU

01 Jésus était né à Bethléem en Judée, au temps du roi Hérode le Grand. Or, voici que des mages venus d'Orient arrivèrent à Jérusalem

02 et demandèrent : « Où est le roi des Juifs qui vient de naître ? Nous avons vu son étoile à l'orient et nous sommes venus nous prosterner devant lui. »

➤ Réalisant ainsi ce qu'annonçaient Les prophètes...

Ésaïe 60: 1-5

60 Lève-toi, sois éclairée, car ta lumière arrive. Et la gloire de l'Éternel se lève sur toi.

³ Et des rois marchent à la clarté de tes rayons. Tous ils s'assemblent, ils viennent vers toi.

⁴ Ils viendront tous de Séba; Ils porteront de l'or et de l'encens.

Quand la visite s'invite

➤ Il y peut-être pire, croyez-le ou non...

Le mystère de l'étoile de Noël

L'étoile de Bethléem, ou l'étoile de Noël, était-elle une comète, une supernova, une double éclipse de Jupiter, un alignement de la Terre, de Jupiter et de Saturne devant le soleil ? La tradition chrétienne décrit l'étoile de Bethléem comme le signe qui a annoncé la naissance de Jésus-Christ aux « Mages d'Orient ». Des siècles plus tard, des scientifiques ont estimé qu'effectivement, en l'an -7, -6 ou -5, des événements astronomiques ont pu produire d'intrigantes lumières dans le ciel, sujettes aux interprétations. Ce qui suggère aussi que Jésus serait né avant l'an 1.

An -7
Apparition possible de l'étoile
Selon la théorie de la triple
conjonction astronomique.

An -6
Fin du recensement
dans l'Empire romain

- Jésus non recensé : il serait donc né après.
- Autre date d'apparition possible de l'étoile (théorie de la double éclipse de Jupiter)

An -5
Naissance de Jésus ?
Autre date d'apparition possible de l'étoile (théorie de la supernova)

An -4
Mort du Roi Hérode
D'après l'Évangile selon Matthieu, Jésus serait né sous son règne, donc avant sa mort, datée de l'an -4 par le théologien Emil Schürer.

Était-ce une triple conjonction ?

En 1603, l'astronome allemand **Johannes Kepler** a calculé qu'en l'an -7, la Terre, Jupiter et Saturne se sont alignés dans la constellation des Poissons, en mai, octobre et décembre.



Rois mages : de Babylone à Bethléem

1 Départ indéterminé
Certains disent que les « Mages d'Orient » (probablement des astrologues de Babylone) ont voyagé vers la Palestine et la constellation des Poissons est associée à la Judée.

2 Arrivée à Jérusalem
Les Mages se seraient enquis de la naissance du « Messie » auprès du roi Hérode, qui leur indique d'aller voir à Bethléem.

3 En partant pour Bethléem
Les Mages auraient revu l'étoile qui « marchait » devant eux jusqu'à ce qu'elle soit arrivée au-dessus du lieu où était le petit enfant, elle s'arrêta. » (Évangile selon Matthieu).

Était-ce une double éclipse de Jupiter ?

En 2001, l'astronome américain **Michael Molnar** estime avec une modélisation informatique que Jupiter a été cachée par la Lune, les 20 mars et 17 avril de l'an -6.

Était-ce une supernova ?

D'anciens écrits chinois retrouvés par le missionnaire jésuite Jean-François Fouquet (18^e siècle) mentionnent un « k'o-hsing » en mars-avril de l'an -5. Ce terme désignait une nova (étoile devenue brillante) ou une supernova (beaucoup plus brillante après une explosion).

Était-ce une comète brillante ?

C'est possible, mais à cette époque, ces petits corps célestes brillants étaient plutôt vus comme des mauvais signes d'inondations ou de famine.

NATIONAL GEOGRAPHIC

Sur les traces de l'étoile de Bethléem : qu'en dit l'archéologie ?

Depuis des siècles, théologiens, historiens et astronomes débattent de ce récit biblique.

DE CANDIDA MOSS |
PUBLICATION 23 DÉC. 2025, 09:06 CET



Quand la visite s'invite

➤ Il y peut-être pire, croyez-le ou non...

 / Sciences

Médecine Animaux & Biodiversité Archéologie & Paléontologie Géologie Maths, physique et chimie Espace & Astronomie

Accueil > Sciences & Environnement

Et si la mystérieuse « étoile de Bethléem » était une comète au comportement étrange ? **Ah ! Ah !**

Par Tristan Vey



DÉCRYPTAGE - Un astronome de la Nasa a modélisé la trajectoire d'un astre qui aurait pu paraître s'arrêter dans le ciel, tout en correspondant aux observations faites par des astronomes chinois à l'époque de la naissance du Christ.

Quand la visite s'invite

➤ Il y peut-être pire, croyez-Le ou non...



British Astronomical Association

Supporting amateur astronomers since 1890



COMMUNITY ▾

NEWS ▾

EVENTS ▾

PUBLICATIONS ▾

SECTIONS ▾

VIDEOS ▾

OBSERVATIONS ▾

ABOUT US ▾

LOGIN ▾



The star that stopped: The Star of Bethlehem & the comet of 5 BCE

Mark Matney

2025 December 3

Journal of the British Astronomical Association, Volume 135, Issue 6, Pages 387–406 (2025); DOI: <https://doi.org/10.64150/193njt>

ABSTRACT

This study introduces a comet candidate to explain the Star that the Magi associated with the birth of Jesus as described in the biblical book of Matthew. By utilising observations of a comet recorded in Chinese annals in 5 BCE, a novel numerical technique was used to compute an orbit for this comet that could have passed very close to Earth in early June of 5 BCE, exhibiting 'temporary geosynchronous' motion. This is the first astronomical candidate for the Star ever identified that could have had apparent motion corresponding to the description in Matthew, where the Star 'went before' the Magi on their journey to Bethlehem until it 'stood over' where the child Jesus was. The study also examines how the Magi may have been influenced by ancient beliefs about comets, as described in Greco-Roman astrological writings, contemporary cuneiform omen texts, and the belief system of astrological geography. There is also a discussion of how this comet candidate corresponds to the chronology of the events surrounding Jesus' birth.

Quand la visite s'invite

➤ Il y peut-être pire, croyez-le ou non...



British Astronomical Association

Supporting amateur astronomers since 1890



COMMUNITY ▾

NEWS ▾

EVENTS ▾

P

The star that stopped BCE

Mark Matney

Journal of the British Astronomical Association, V

ABSTRACT

This study introduces a comet candidate to explain the observations of a comet recorded in Chinese annals very close to Earth in early June of 5 BCE, exhibiting a very close approach to Earth. The study also examines the possibility that the comet could have had apparent motion corresponding to the 'star over' where the child Jesus was. The study also examines astrological writings, contemporary cuneiform omenology, and how the comet corresponds to the chronology of the events surrounding the birth of Jesus.

Astromaterials Research & Exploration Science

ABOUT MARK MATNEY



ARES

CURATION ▾

RESEARCH ▾

MISSIONS ▾

SAFETY ▾

IMAGE SCIENCE ▾

ENGAGEMENT ▾

PEOPLE ▾



Mark Matney

Scientist, Orbital Debris Program Office (modeling lead) | NASA

Email

mark.matney-1@nasa.gov

Phone

281.483.2258

Biography

Mark Matney is a planetary scientist and modeling lead for the Orbital Debris Program Office within the Astromaterials Research and Exploration Science (ARES) Division at the Johnson Space Center. Matney's work involves all aspects of orbital debris research including measurements, modeling, and mitigation. Orbital Debris is a major (and growing) source of hazard to both crewed and robotic spacecraft - especially in low-Earth orbit. NASA is a world leader in understanding and helping mitigate the risk for all users of space - both U.S. and international.

Education

Ph.D.	Space Physics and Astronomy	Rice University	1992
M.S.	Space Physics and Astronomy	Rice University	1990
B.S.	Astronomy and Physics	Texas Christian University	1985

Quand la visite s'invite

➤ Il y peut-être

Medium

CHRISTMAS AND ASTRONOMY

Was the Star of Bethlehem an Interstellar Object like 3I/Atlas?

How 3I/Atlas revives a 2,000-year-old cosmic mystery at the crossroads of astronomy and scripture.



Rudi Widiyanto · 8 min read · Dec 11, 2025



British Astronomical Association

Supporting amateur astronomers since 1890



COMMUNITY ▾

NEWS ▾

EVENTS ▾

PROGRAMS ▾

Astronomy
ABC

ARES

The star that stopped BCE

Mark Matney

Journal of the British Astronomical Association, Vol. 137, No. 1, 2025

ABSTRACT

This study introduces a comet candidate to explain the observations of a comet recorded in Chinese annals very close to Earth in early June of 5 BCE, exhibiting a very close approach to Earth that could have had apparent motion corresponding to the 'star that stopped over' where the child Jesus was. The study also examines historical astrological writings, contemporary cuneiform omen texts, and how the comet candidate corresponds to the chronology of the events surrounding the birth of Jesus.



Mark Matney

Scientist, Orbital Debris Program Office (modeling lead) | NASA

Email

mark.matney-1@nasa.gov

Phone

281.483.2258

Biography

Mark Matney is a planetary scientist and modeling lead for the Orbital Debris Program Office within the Astromaterials Research and Exploration Science (ARES) Division at the Johnson Space Center. Matney's work involves all aspects of orbital debris research including measurements, modeling, and mitigation. Orbital Debris is a major (and growing) source of hazard to both crewed and robotic spacecraft - especially in low-Earth orbit. NASA is a world leader in understanding and helping mitigate the risk for all users of space - both U.S. and international.

Education

Ph.D.	Space Physics and Astronomy	Rice University	1992
M.S.	Space Physics and Astronomy	Rice University	1990
B.S.	Astronomy and Physics	Texas Christian University	1985

Bon, revenons à nos moutons

➔ Quelques questions à se poser

- Ça arrive tu souvent...
- Ça vient d'où... Comment ça se fait...
- Y en a tu beaucoup de ces patentes vagabondes dans le cosmos...
- Pourquoi qu'on en a pas vu avant...
- On peut tu espérer en voir plus un jour...

1) Y en a tu beaucoup

➤ Commençons par les “gros” astres errants
(πλανήτης) vagabonds.

On fait référence ici à des objets
sans attache, qui ne font partie
d’aucun système stellaire et qui
vagabondent librement dans
l’espace interstellaire.

1) Y en a tu beaucoup

➤ Commentaires par les “gros” astres errants
(πλανήτης) vagabonds.

Free-Floating Planets May be More Common Than Stars



NASA Science Editorial Team

MAY 17, 2011

ARTICLE



On estime qu'il y aurait
2 planètes errantes par
étoile dans la galaxie

1) Y en a tu beaucoup

➤ Commence par les “gros” astres errants
(πλανήτης) vagabonds.

On fait référence ici à des
objets importants, à des
planètes parfois aussi grosses
que Jupiter ou Saturne.

On estime qu'il y a
2 planètes errantes par
étoile dans la galaxie



1) Y en a tu beaucoup

➤ Des plan^{tes} vagabondes à profusion...

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 166:108 (13pp), 2023 September

© 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/1538-3881/ace688>



Free-floating Planet Mass Function from MOA-II 9 yr Survey toward the Galactic Bulge

Takahiro Sumi¹ , Naoki Koshimoto^{1,2,3} , David P. Bennett^{2,3} , Nicholas J. Rattenbury⁴ , Fumio Abe⁵, Richard Barry² ,
Apama Bhattacharya^{2,3}, Ian A. Bond⁶, Hirosane Fujii⁵, Akihiko Fukui^{7,8} , Ryusei Hamada¹, Yuki Hirao⁹ ,
Stela Ishitani Silva^{2,10}, Yoshitaka Itow⁵ , Rintaro Kirikawa¹, Iona Kondo¹ , Yutaka Matsubara⁵ , Shota Miyazaki¹¹ ,
Yasushi Muraki⁵ , Greg Olmschenk² , Clément Ranc¹² , Yuki Satoh¹ , Daisuke Suzuki¹ , Mio Tomoyoshi¹,
Paul . J. Tristram¹³, Aikaterini Vandorou^{2,3}, Hibiki Yama¹, and Kansuke Yamashita¹

¹ Department of Earth and Space Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 565-0871, Japan

⁴ School of Physics and Astronomy, University of Exeter, Exeter, EX4 4PL, UK

⁵ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

⁶ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

⁷ Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

⁹ Institute of Astronomical Science, University of Tsukuba, Maebashi, Ibaraki 305-8565, Japan

¹¹ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

¹² Sorbonne Université, CNRS, UMR 7595, Institut d'Astrophysique de Paris, 98 bis bd Arago, F-75014 Paris, France

¹³ University of Canterbury Mt. John Observatory, P.O. Box 56, Lake Tekapo 8770, New Zealand

Received 2023 March 13; revised 2023 June 26; accepted 2023 July 3; published 2023 August 16

This indicates
that the abundance of FFPs, $f = 21^{+23}_{-13}$ planets star⁻¹, is $5.8^{+6.4}_{-3.8}$
times more than known bound planets in this mass range.

1) Y en a tu beaucoup

➤ Des planètes vagabondes à profusion...

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 166:108 (13pp), 2023 September

© 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/1538-3881/ace688>



Free-floating Planet Mass Function from MOA-II 9 yr Survey toward the Galactic Bulge

Takahiro Sumi¹, Naoki Koshimoto^{1,2,3}, David P. Bennett^{2,3},
Apama Bhattacharya^{2,3}, Ian A. Bond⁶, Hirosane Fujii⁵, Akihiko Fukui¹⁰, Ryusei Hamada⁹, Yuki Hirao⁹,
Stela Ishitani Silva^{2,10}, Yoshitaka Itow⁵, Rintaro Kirikawa¹, Iona Kondoh¹¹, Yuki Matsuda⁵, Shota Matsuoka¹¹,
Yasushi Muraki⁵, Greg Olmschenk², Clément Ranc¹²,
Paul J. Tristram¹³, Aikaterini Vandenbroucke^{2,3}, Hideo Yano¹⁰

¹ Department of Earth and Space Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 565-0871, Japan

⁴ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-cho, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

⁵ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-cho, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

⁶ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-cho, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

⁷ Department of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley, CA 94720-1300, USA

⁹ Institute of Astronomical Sciences, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

¹¹ Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-cho, Chofu, Tokyo 184-8639, Japan

¹² Sorbonne Université, CNRS, UMR 7595, Institut d'Astrophysique de Paris, 98 bis bd Arago, F-75014 Paris, France

¹³ University of Canterbury Mt. John Observatory, P.O. Box 56, Lake Tekapo 8770, New Zealand

Received 2023 March 13; revised 2023 June 26; accepted 2023 July 3; published 2023 August 16

On parle ici de planètes $\geq$ à la Terre

that the abundance of FFPs, $f = 21^{+23}_{-13}$ planets star¹, is $5.8^{+6.4}_{-3.8}$ times more than known bound planets in this mass range.

Combien d'étoiles dans la Voie Lactée

- Le nombre de planètes sans attache est mesuré par rapport au nombre des étoiles de notre galaxie.
- On estime Le nombre d'étoiles de la galaxie entre 100 et 400 milliards.

The Milky Way is a less massive galaxy—new estimates of the Milky Way's local and global stellar masses

JIANHUI LIAN,^{1,2} TAO WANG,^{1,2} QIKANG FENG,^{3,4} YANG HUANG,^{5,6} AND HELONG GUO^{1,2}

100

¹ *Sci*
² *Key* IMPROVED ESTIMATES OF THE MILKY WAY'S STELLAR MASS AND STAR FORMATION RATE FROM HIERARCHICAL BAYESIAN META-ANALYSIS

TIMOTHY C. LICQUIA^{1,2}, JEFFREY A. NEWMAN^{1,2}

400

⁵ *Sch* ¹ Department of Physics and Astronomy, University of Pittsburgh, 3941 O'Hara Street, Pittsburgh, PA, 15260; tcl15@pitt.edu

² PITTSburgh Particle physics, Astrophysics, and Cosmology Center (PITT PACC)

Accepted for publication in *ApJ* 2015 April 21; published 2015 June 10.

1) Y en a tu beaucoup

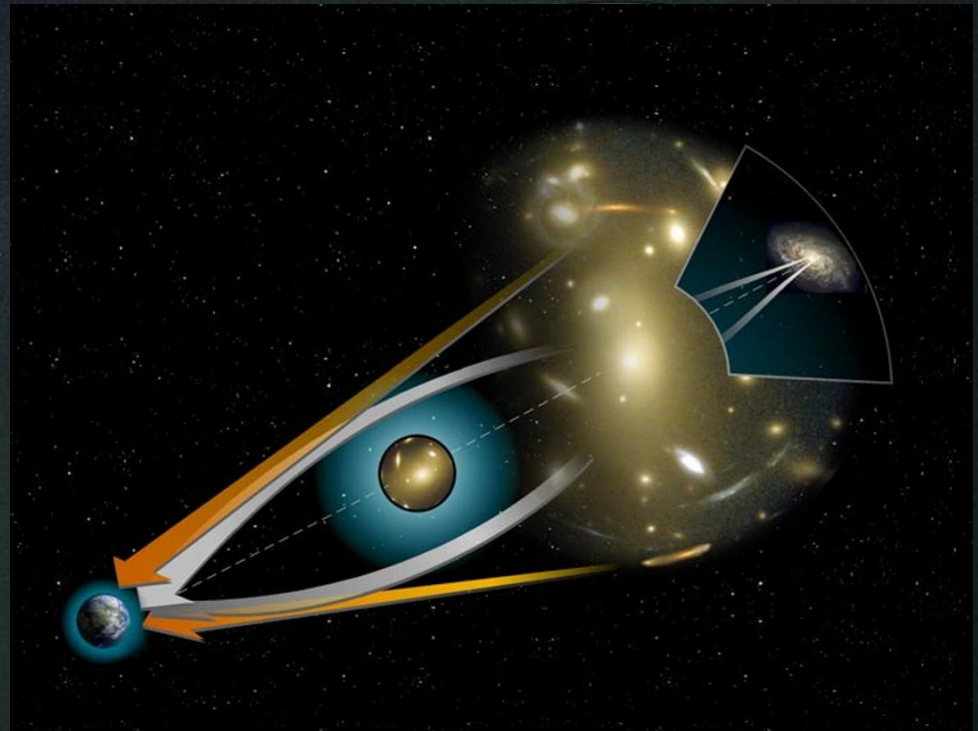
- Ce qui nous donne une estimation *très* précise 🤔 de **200** à **8 000** milliards de planètes errantes d'une taille $\geq$ à la Terre vagabondant de-ci de-là dans notre galaxie.



1) Y en a tu beaucoup

➤ Vous vous demandez sûrement comment détecter dans l'espace intersidéral ces petits objets obscurs.

- La méthode la plus utilisée est la **microlentille gravitationnelle**.
- Mais il y en a d'autres...



1) Y en a tu beaucoup

- Si nous additionnons l'ensemble des petits objets de la taille des astéroïdes ou des comètes, alors on peut aisément parler de milliers de milliards d'objets sans attache qui errent dans l'espace entre les planètes.

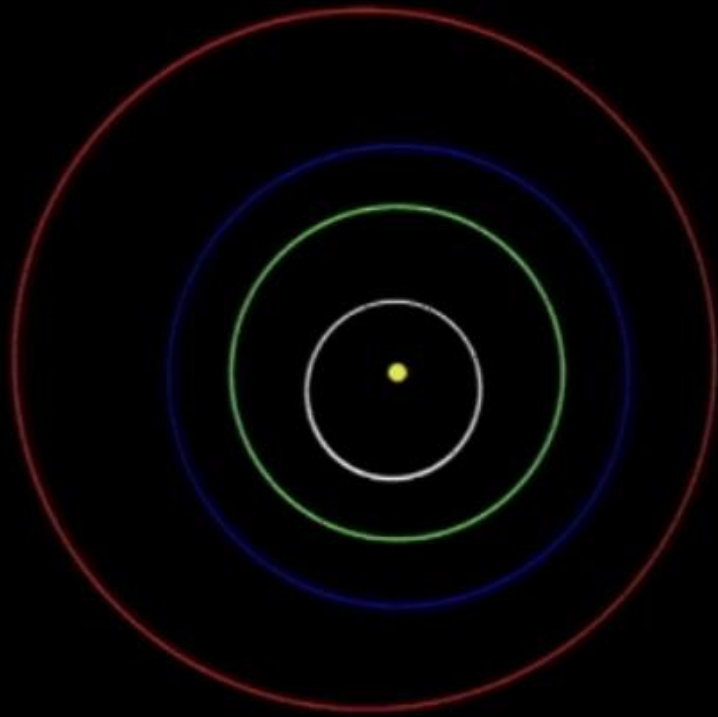
2) Ça vient d'où

- Pour le comprendre, rappelons-nous la formation des systèmes stellaires.



2) Ça vient d'où

- Les instabilités orbitales



1 kyr

(c) ASD/MOCE-ONRS

✓ Le système solaire interne actuel

2) Ça vient d'où

Modèle de Nice

- Les instabilités orbitales
 - ✓ Inversion des orbites de Neptune et d'Uranus aux alentours de 800-900 millions d'années après le début de la formation du Système solaire.



2) Ça vient d'où

Grand bombardement
tardif (4,2 - 3,8 Ga)

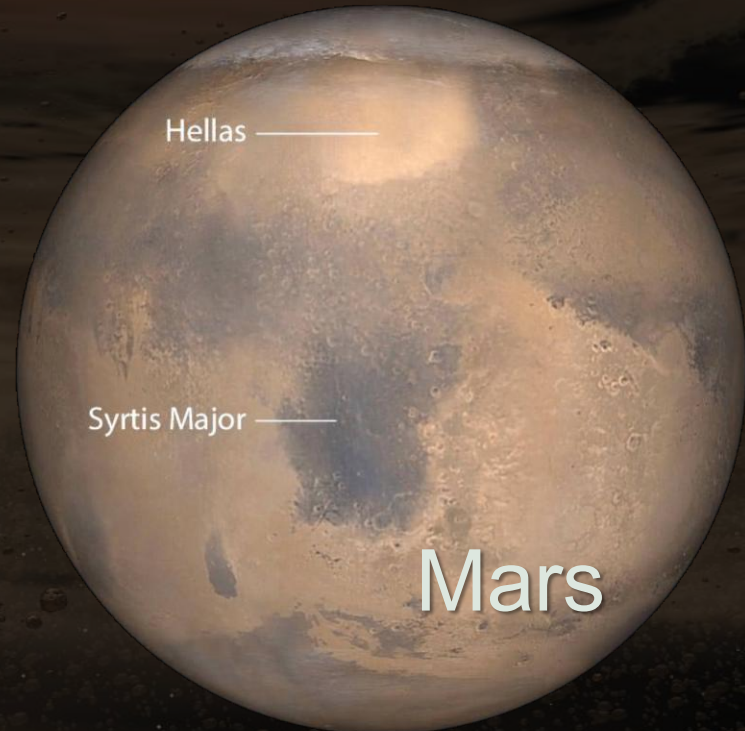
- Les instabilités orbitales
 - ✓ A entraîné la dispersion de nombreux objets disparates du disque primitif



2) Ça vient d'où

Grand bombardement
tardif

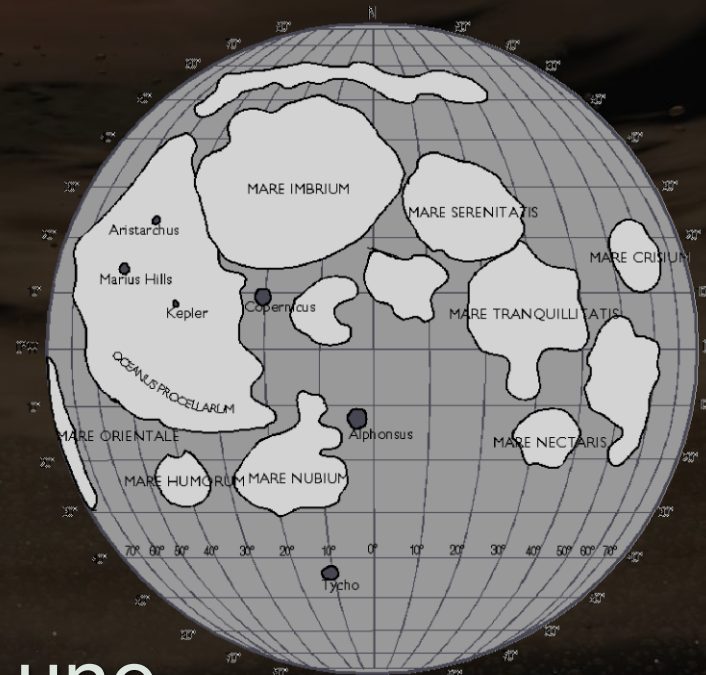
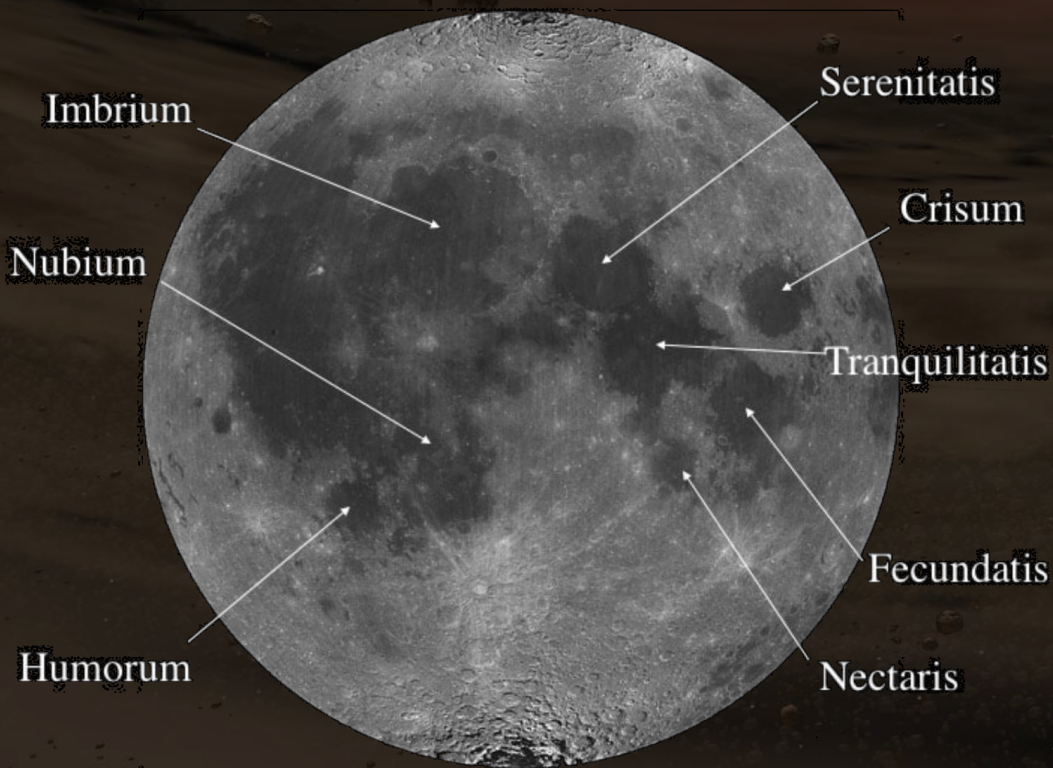
- Les instabilités orbitales
 - ✓ Responsable des grands cratères d'impact sur les planètes telluriques



2) Ça vient d'où

Grand bombardement
tardif

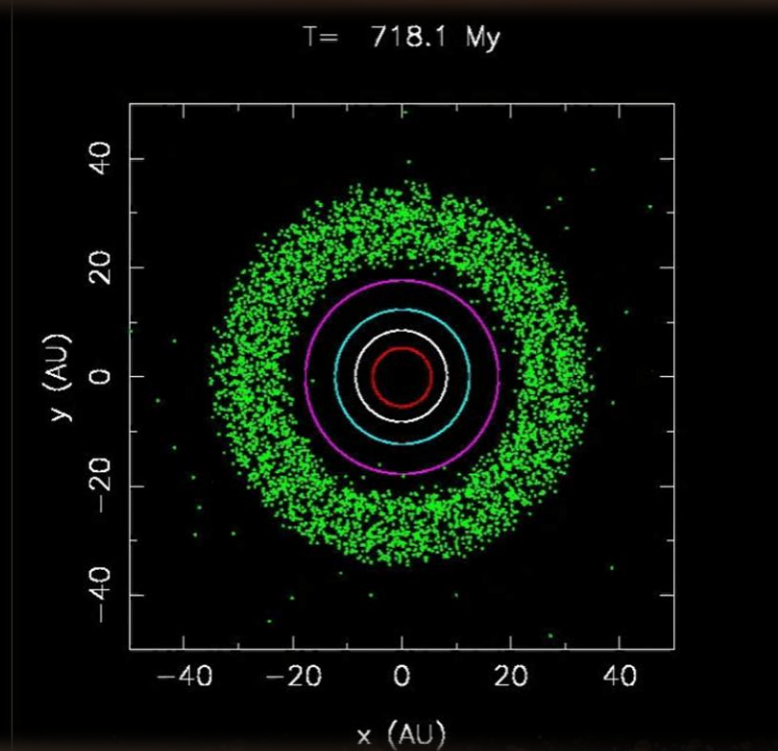
- Les instabilités orbitales
 - ✓ Responsable des grands cratères d'impact sur les satellites des planètes



Lune

2) Ça vient d'où

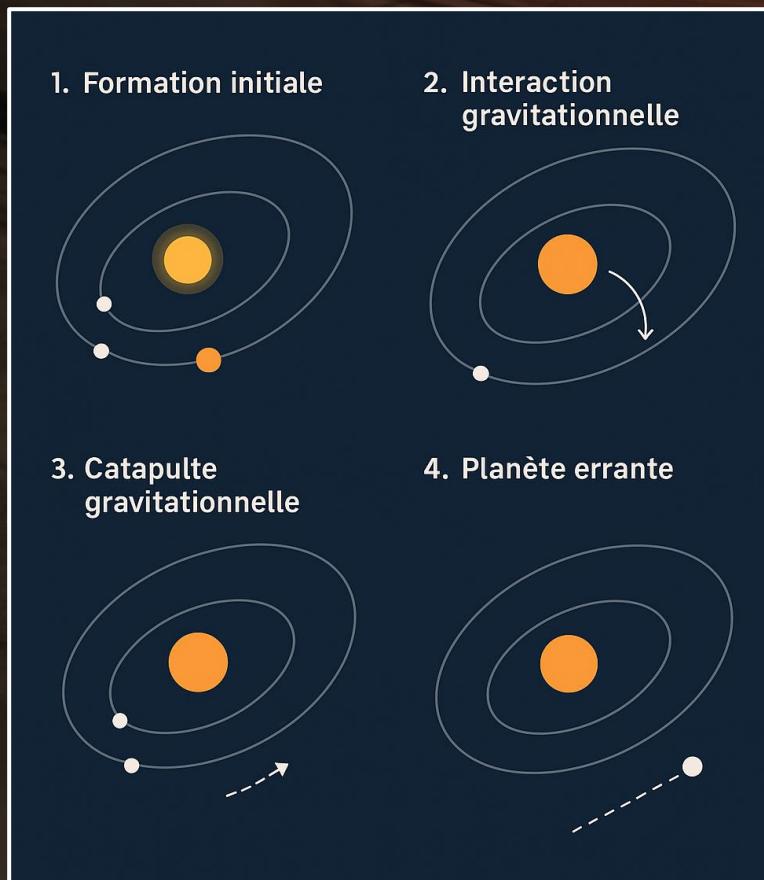
- Les instabilités orbitales
 - ✓ La structuration actuelle de la ceinture de Kuiper
 - ✓ La formation de l'hypothétique nuage de Oort



2) Ça vient d'où

- Les interactions gravitationnelles orbitales...

✓ Peuvent entraîner l'expulsion de planètes par effet de proximité

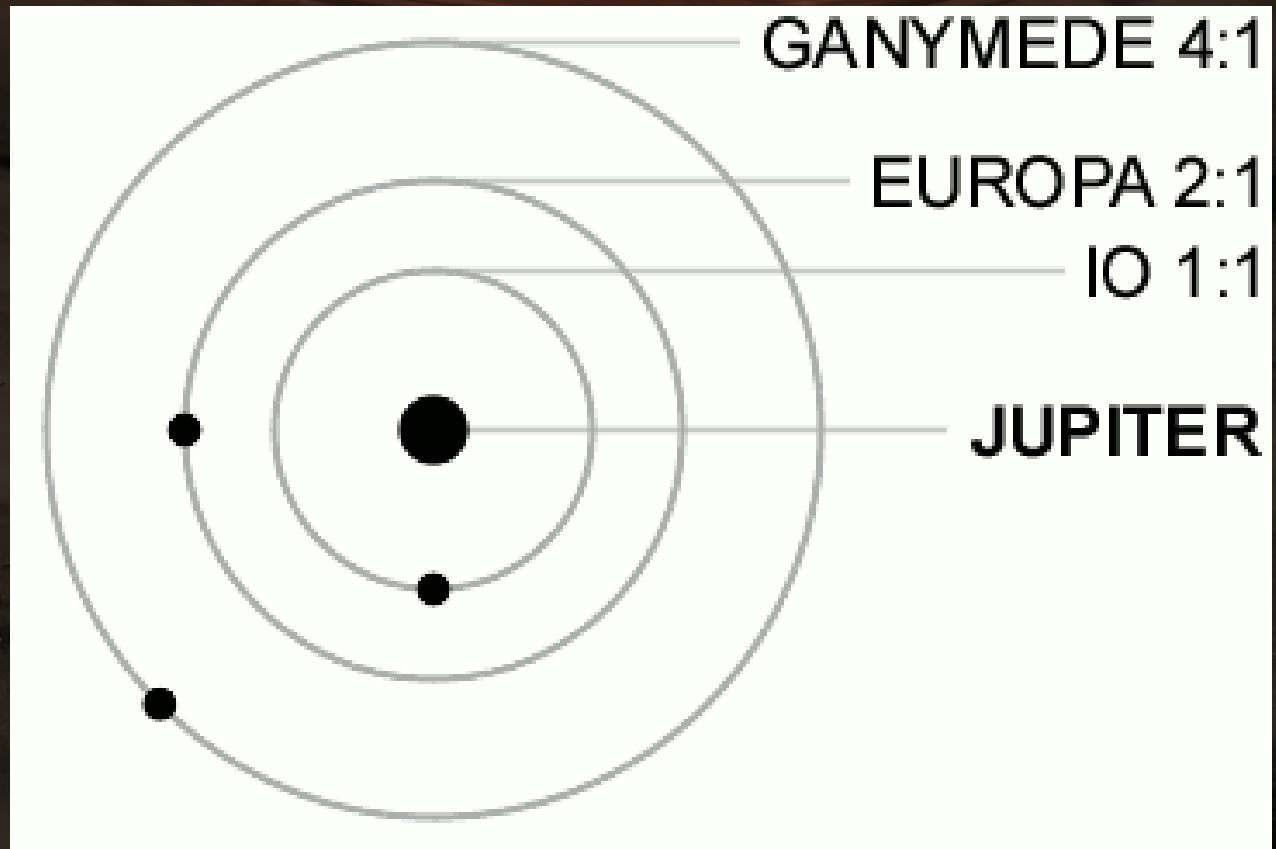


2) Ça vient d'où

- Les résonnances orbitales
 - ✓ Peuvent créer de l'instabilité orbitale et peuvent faciliter l'expulsion de planètes des systèmes
- Deux corps sont en résonance orbitale lorsque leurs périodes orbitales vérifient un rapport de *petits entiers*, par exemple :
 - 2:1 ➡ Io:Europe
 - 3:2 ➡ Neptune:Pluton
 - 4:3 ➡ Titan:Hypérion etc.

2) Ça vient d'où

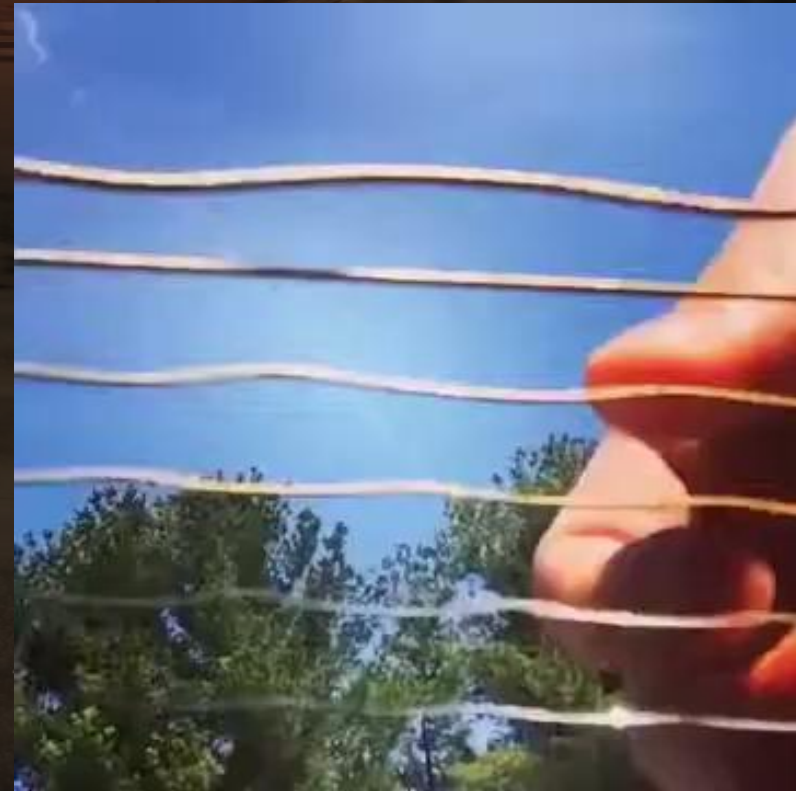
- Les résonnances orbitales
 - Io-Europe-Ganymède ➔ 1:2:4



2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

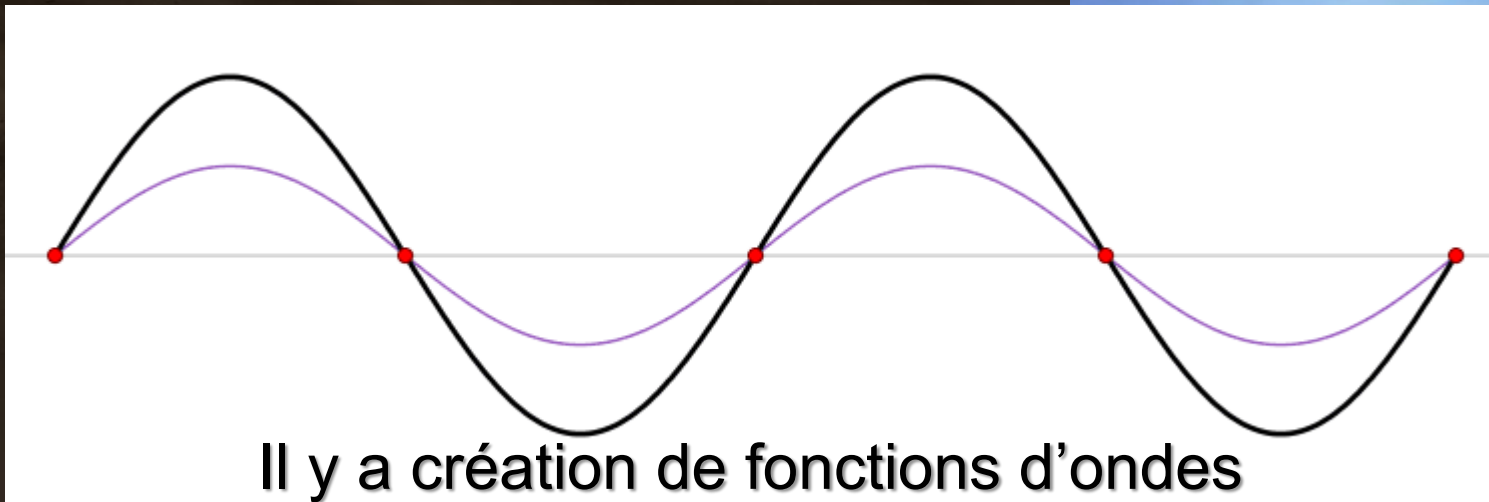
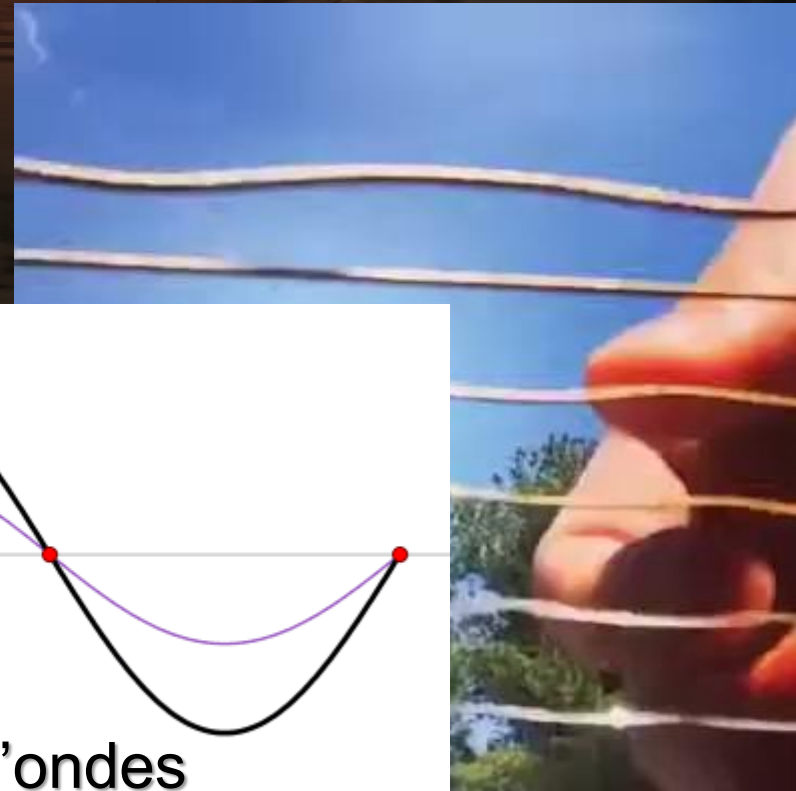
- Les résonances orbitales planétaires sont souvent assimilées à des *harmoniques* en musique. Qui sont, elles aussi, des multiples de nombres entiers. (2, 3, 3, 5, etc.)



2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

- Les résonances orbitales planétaires sont souvent assimilées à des *harmoniques* en musique. Qui sont, elles aussi,



Il y a création de fonctions d'ondes

2) Ça vient d'où

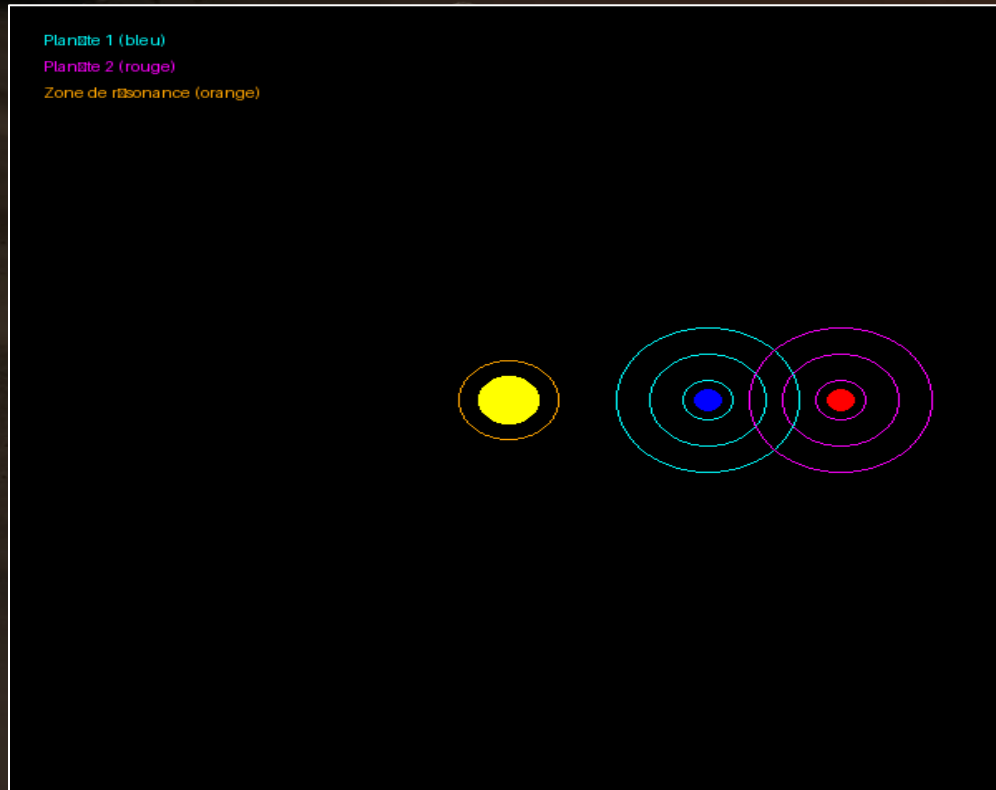
➤ Les résonances orbitales

- Les résonances orbitales sont des *harmoniques gravitationnelles* du mouvement orbital.
 - ✓ En musique, elles stabilisent la fondamentale.
 - ✓ En planétologie, elles peuvent créer des *instabilités* orbitales fatales pour le système.

2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

- Les résonances orbitales génèrent des fonctions d'onde dans l'*espace-temps*.



- Les lignes de champ de l'espace-temps interfèrent entre elles de manière périodique fixe.

2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

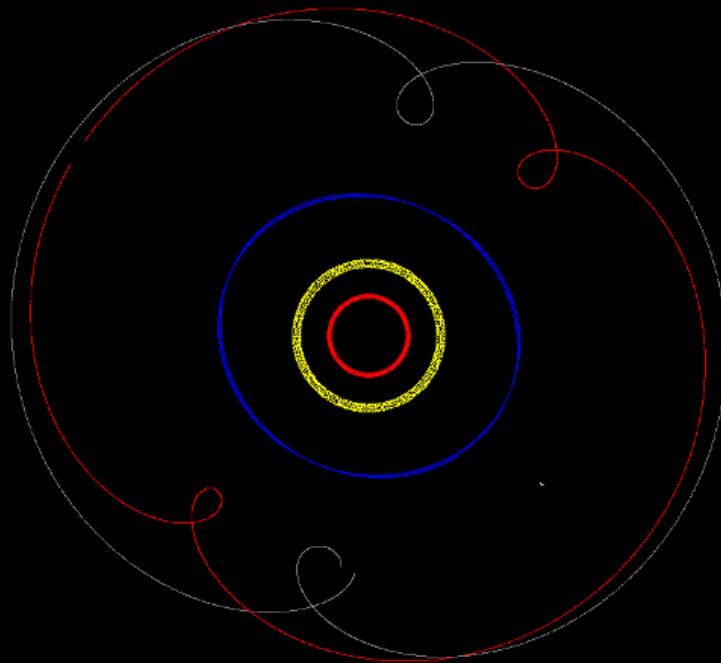
- Les résonances orbitales génèrent des fonctions d'onde dans l'*espace-temps*.



- Les lignes de champ de l'espace-temps interfèrent entre elles de manière périodique fixe.

2) Ça vient d'où

- Les résonnances orbitales
 - Les résonnances orbitales génèrent des fonctions d'onde dans l'*espace-temps*.

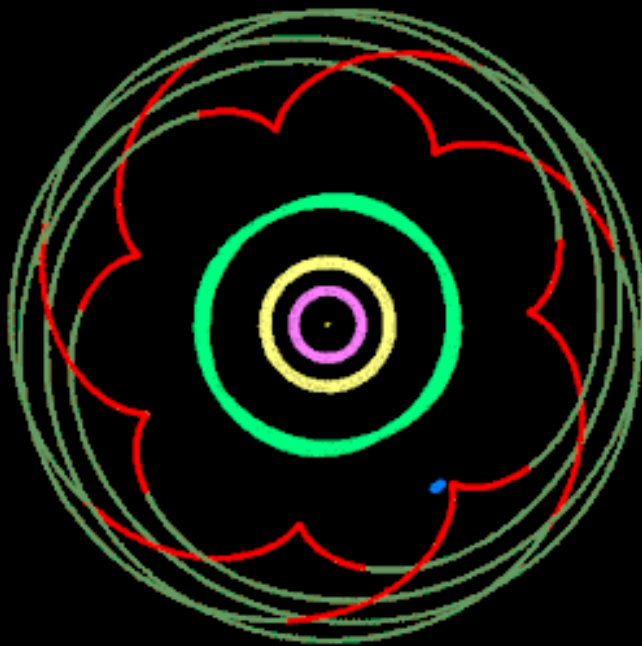


Les lignes de champ de l'espace-temps interfèrent entre elles de manière périodique fixe.

2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

- Les résonances orbitales génèrent des fonctions d'onde dans l'*espace-temps*.

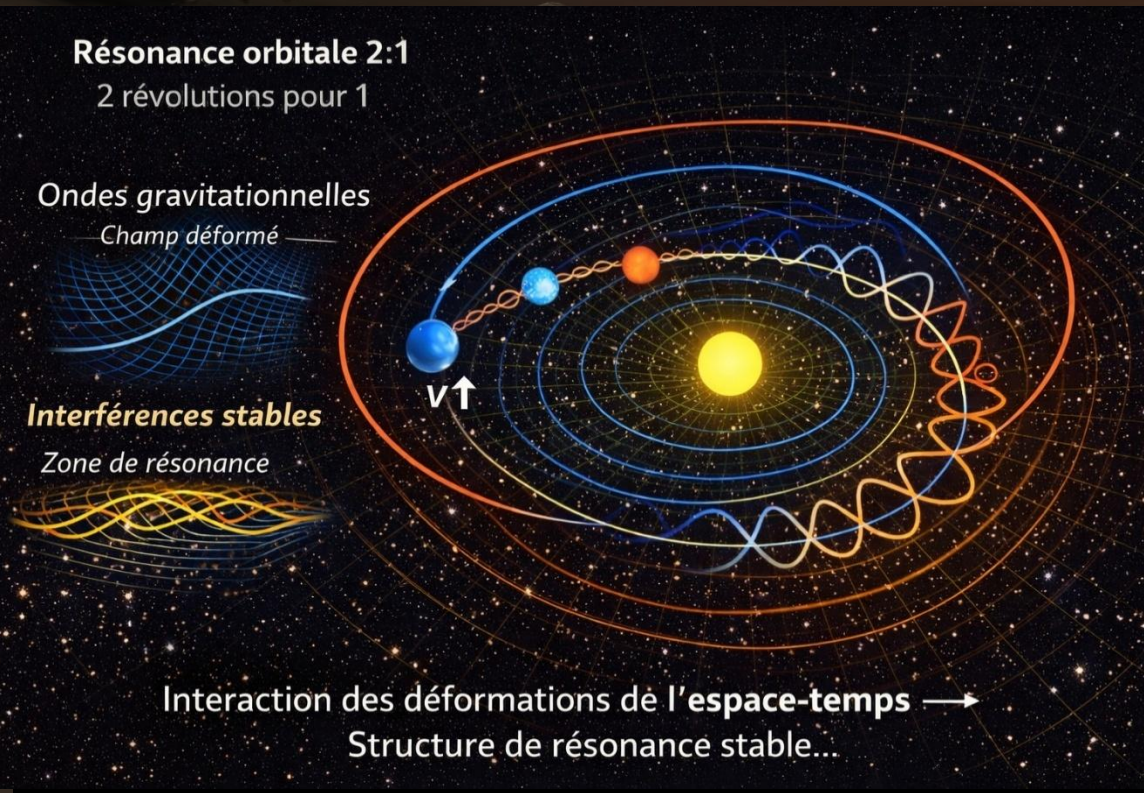


Les lignes de champ de l'espace-temps interfèrent entre elles de manière périodique fixe.

2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

- Les résonances orbitales génèrent des fonctions d'onde dans l'*espace-temps*.



Les lignes de champ de l'espace-temps interfèrent entre elles de manière périodique fixe.

2) Ça vient d'où

➤ Les résonances orbitales

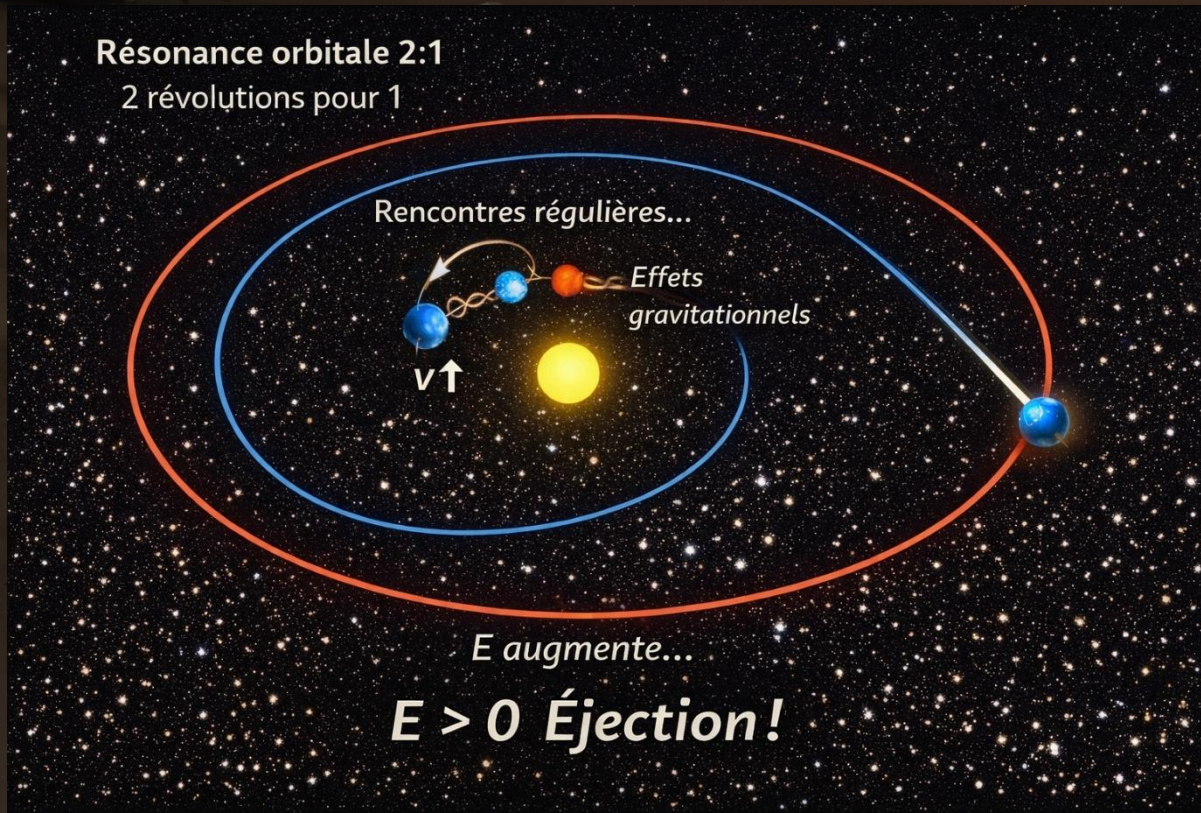
- Les résonances orbitales peuvent contribuer à l'**expulsion** de planètes ou d'objets d'un système stellaire, mais rarement à elles seules.
- Elles agissent plutôt comme des mécanismes d'amplification des excentricités et de déstabilisation au sein d'une dynamique gravitationnelle plus large.
- Sans dissipation, l'harmonie mathématique peut devenir un moteur d'**instabilité** physique.

2) Ça vient d'où

- Les résonances orbitales
 - L'expulsion proprement dite nécessite presque toujours :
 - ✓ une interaction gravitationnelle forte (rencontre rapprochée) avec un gros objet.
 - ✓ ou un contexte évolutif (migration planétaire, perte de masse stellaire, perturbation externe).
- Les résonances sont des pompes à excentricité orbitale.

2) Ça vient d'où

➤ Une planète, un satellite, un astéroïde sont expulsés lorsque :

$$E = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{r} > 0$$


- L'interaction avec une planète "proche" fouette l'astre visé en $\uparrow v$.

2) Ça vient d'où

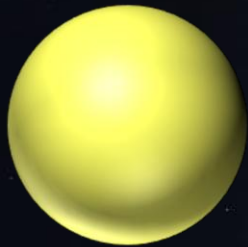
- Toutes ces instabilités rendent les systèmes stellaires chaotiques, ainsi :
- Des planètes sont expulsées et deviennent errantes.
 - Une myriade de petits corps est expulsée et ceci tout au long de la vie du système :
 - Comètes, astéroïdes, corps de toute mesure
 - Tout ceci est amplifié dans les **systèmes multiples** qui forment environ la moitié des assemblages stellaires.

2) Ça vient d'où

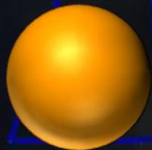


2) Ça vient d'où

Gliese 710



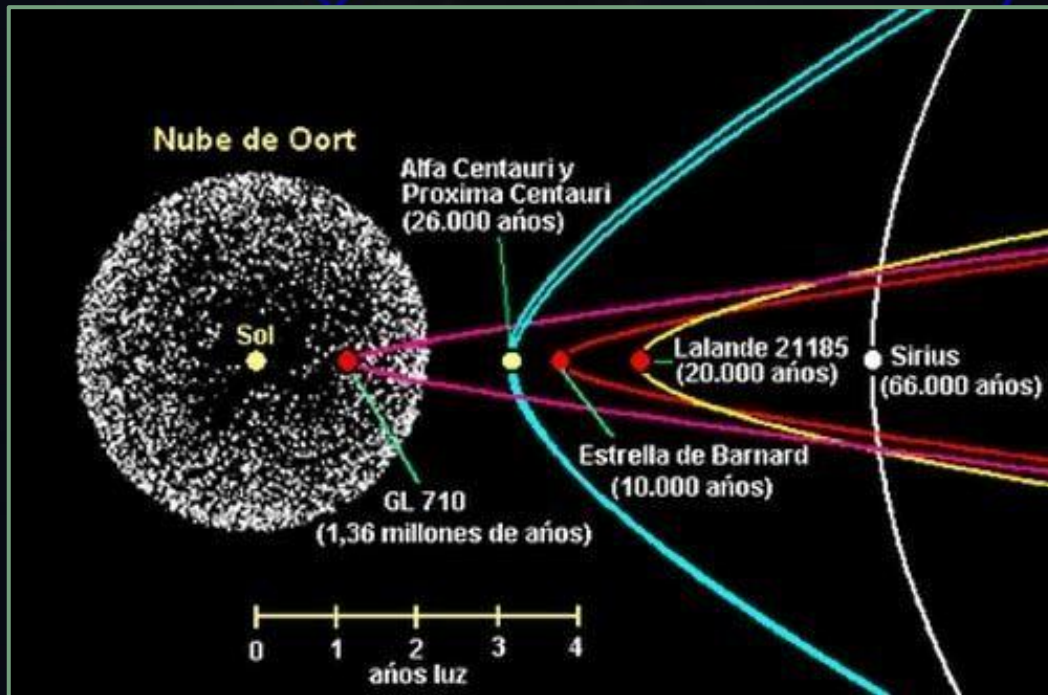
Sun



Gliese 710

➤ Des perturbations peuvent aussi venir de l'interaction occasionnelle entre les systèmes stellaires.

2) Ça vient d'où



Gliese 710

- Dans 1,3 millions d'années, Gliese 710 va passer à l'intérieur du nuage de Oort à 13 000 UA du Soleil.

2) Ça vient d'où

- Il y aurait donc des gazillions d'objets flottant sans attache entre les étoiles dans notre galaxie.
 - Un nombre incalculable, démesuré, dément...
 - Des milliards et des milliards...
- Alors pourquoi qu'on en voit pas plus !

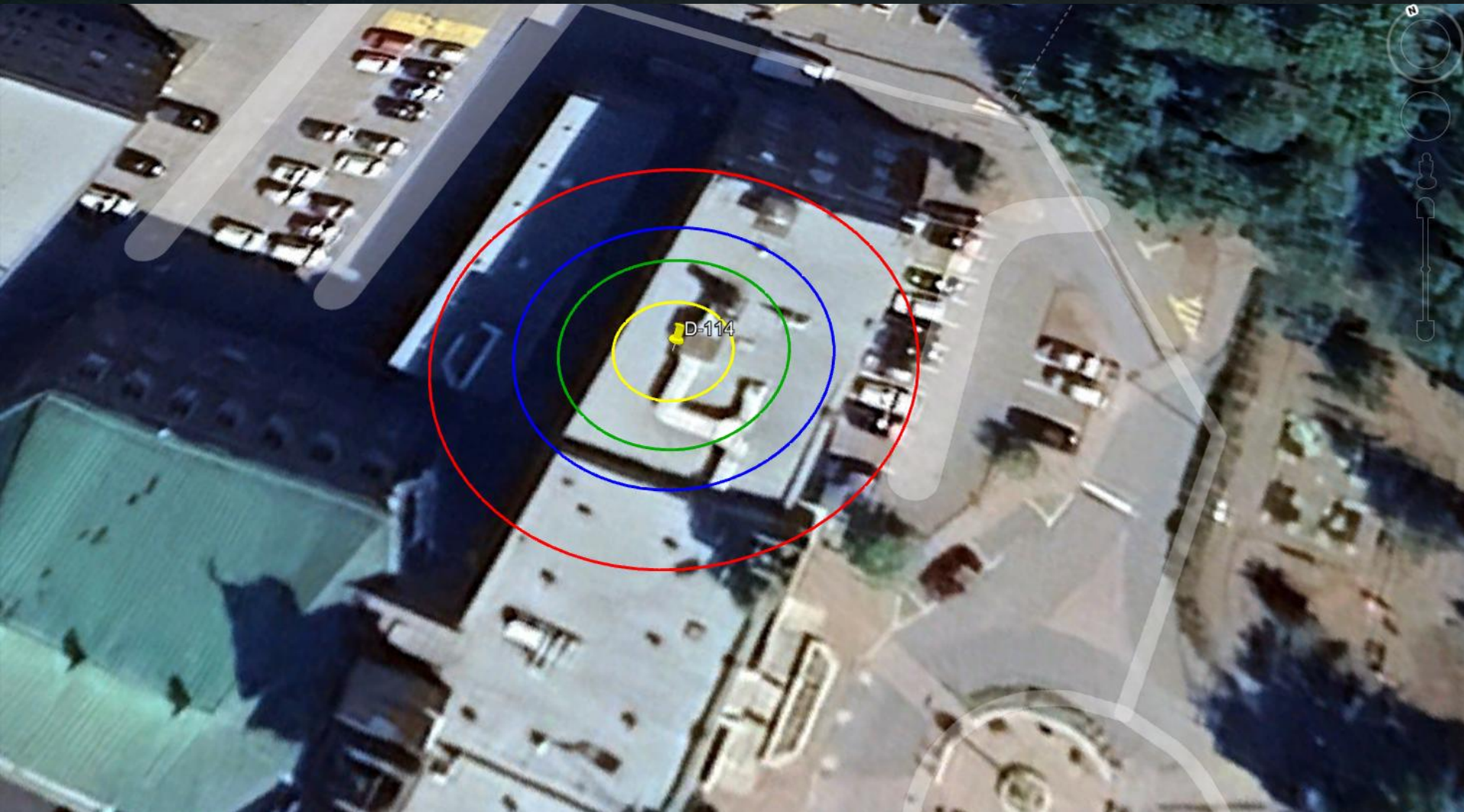
3) Ben, ous qui sont !

- Ben ! Il faut savoir que l'espace est spacieux.
- Bon ! Reprenons notre exemple familier...



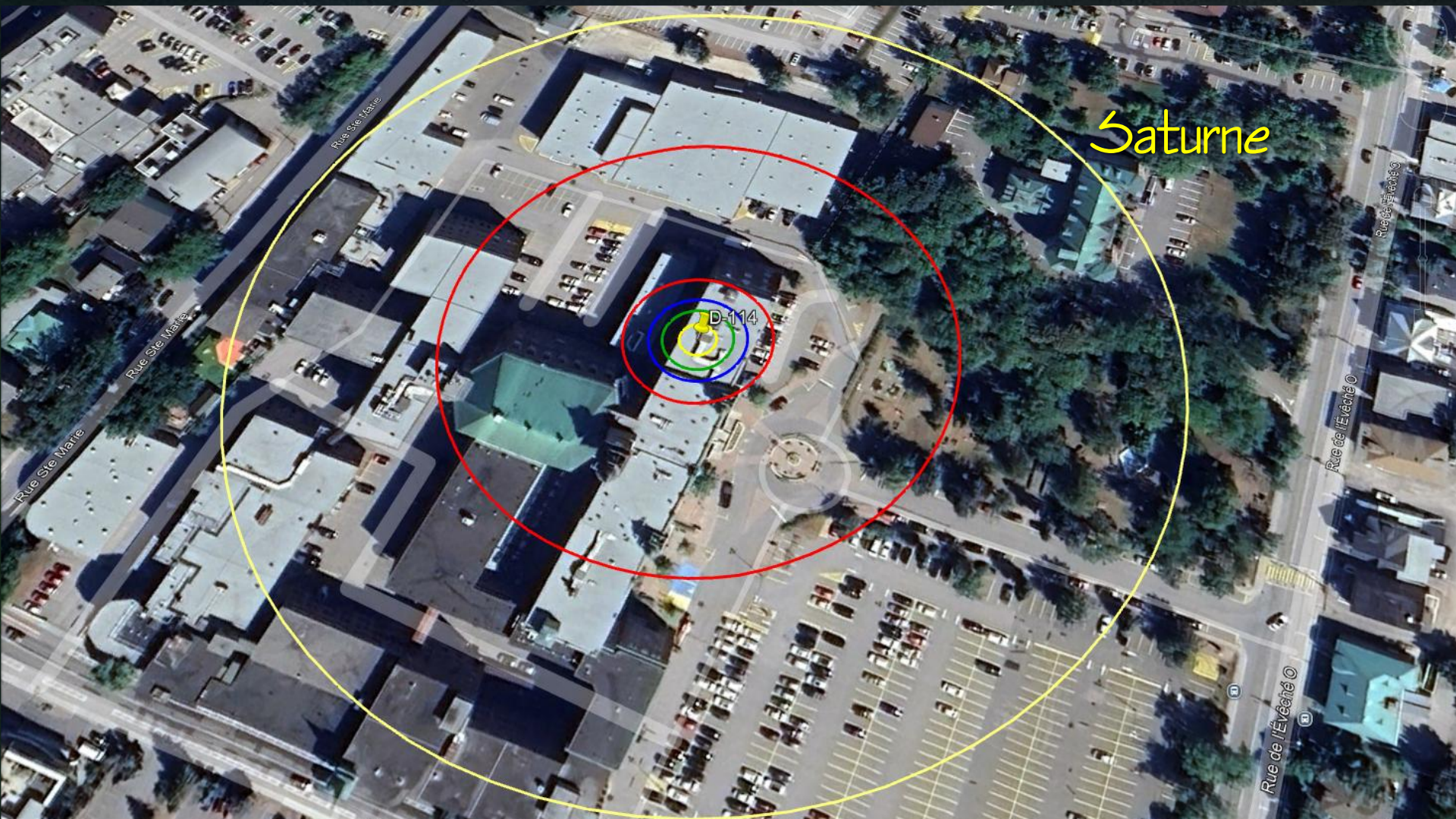
3) Ben, ous qui sont !

➤ Note Système solaire où Le Soleil = 



3) Ben, ous qui sont !

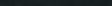
➤ Note Système solaire o  le Soleil =

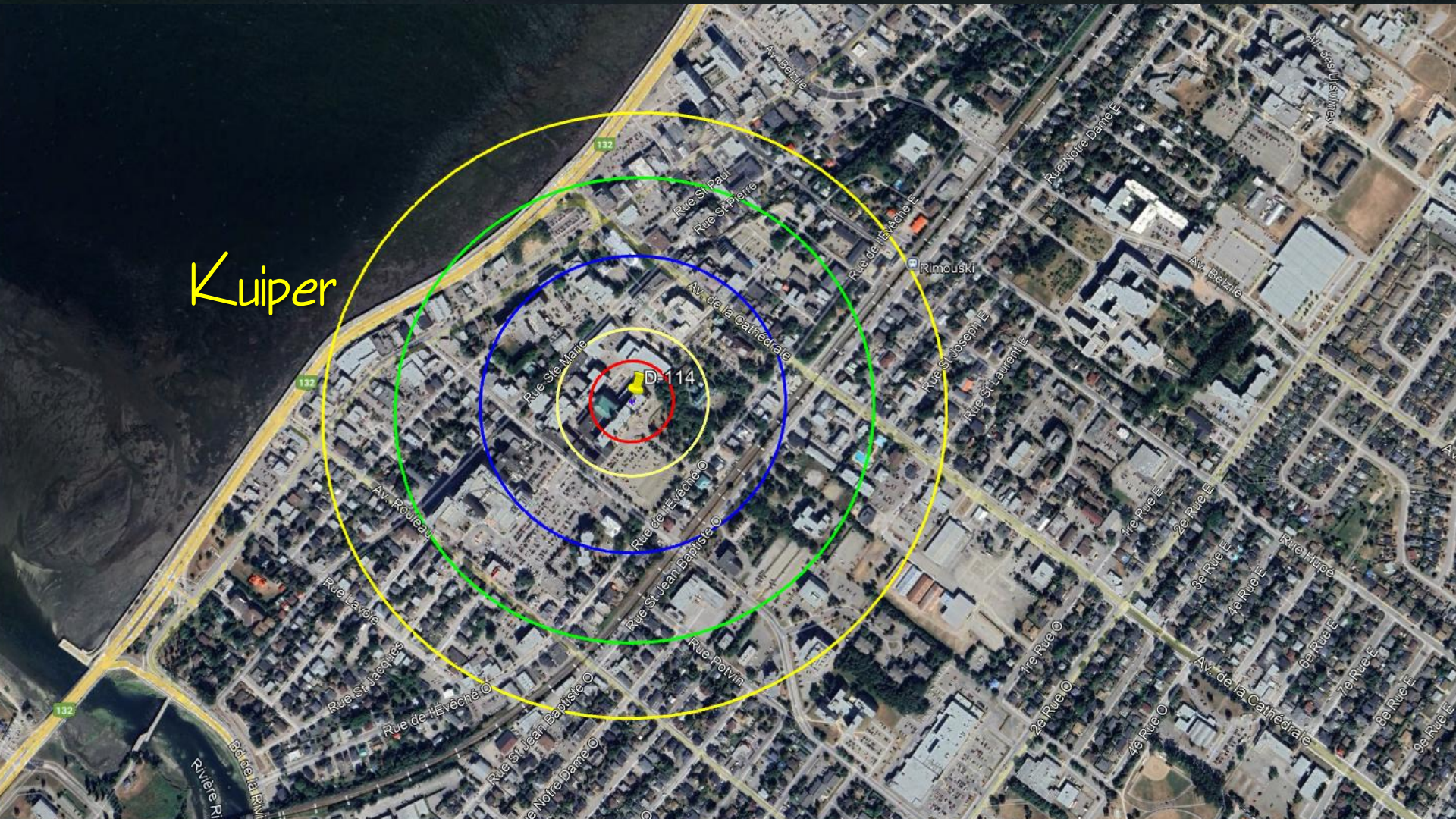


➤ Note Système solaire où le Soleil =



3) Ben, ous qui sont !

➤ Note Système solaire où Le Soleil = 



3) Ben, ous qui sont !

➤ Et notre nuage de Oort si Le Soleil = 

➤ Le nuage de Oort est une structure
hypothétique.

➤ Son étendue va
de 20 000 à
200 000 U.A.

➤ On y trouverait
 10^{11} à 10^{12} objets.

Star Formation in the Interstellar Medium:

In Honor of David Hollenbach, Chris McKee, and Frank Shu

ASP Conference Series, Vol. 323, 2004

D. Johnstone, F. C. Adams, D. N. C. Lin, D. A. Neufeld, and E. C. Ostriker

Oort Cloud Formation and Dynamics

Luke Dones

Southwest Research Institute, Boulder, CO 80302

Paul R. Weissman

Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91109

Harold F. Levison

Southwest Research Institute, Boulder, CO 80302

Martin J. Duncan

Queen's University, Kingston, ON K7L 3N6, Canada

Abstract. The Oort cloud is the primary source of the long-period comets. We describe what is known about the population and mass of the Oort cloud, including the hypothetical inner Oort cloud; outline dynamical processes in the cloud; and summarize new simulations of the formation of the cloud.

3) Ben, ous qui sont !

➤ Et notre nuage de Oort si Le Soleil = 

➤ Le nuage de Oort est une structure hypothétique.

➤ Son étendue va de 20 000 à 200 000 U.A.

➤ On y trouverait 10^{11} à 10^{12} objets.

63 240 UA
correspondent à une
année-lumière

Paul R. Weissman

Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91109

Harold F. Levison

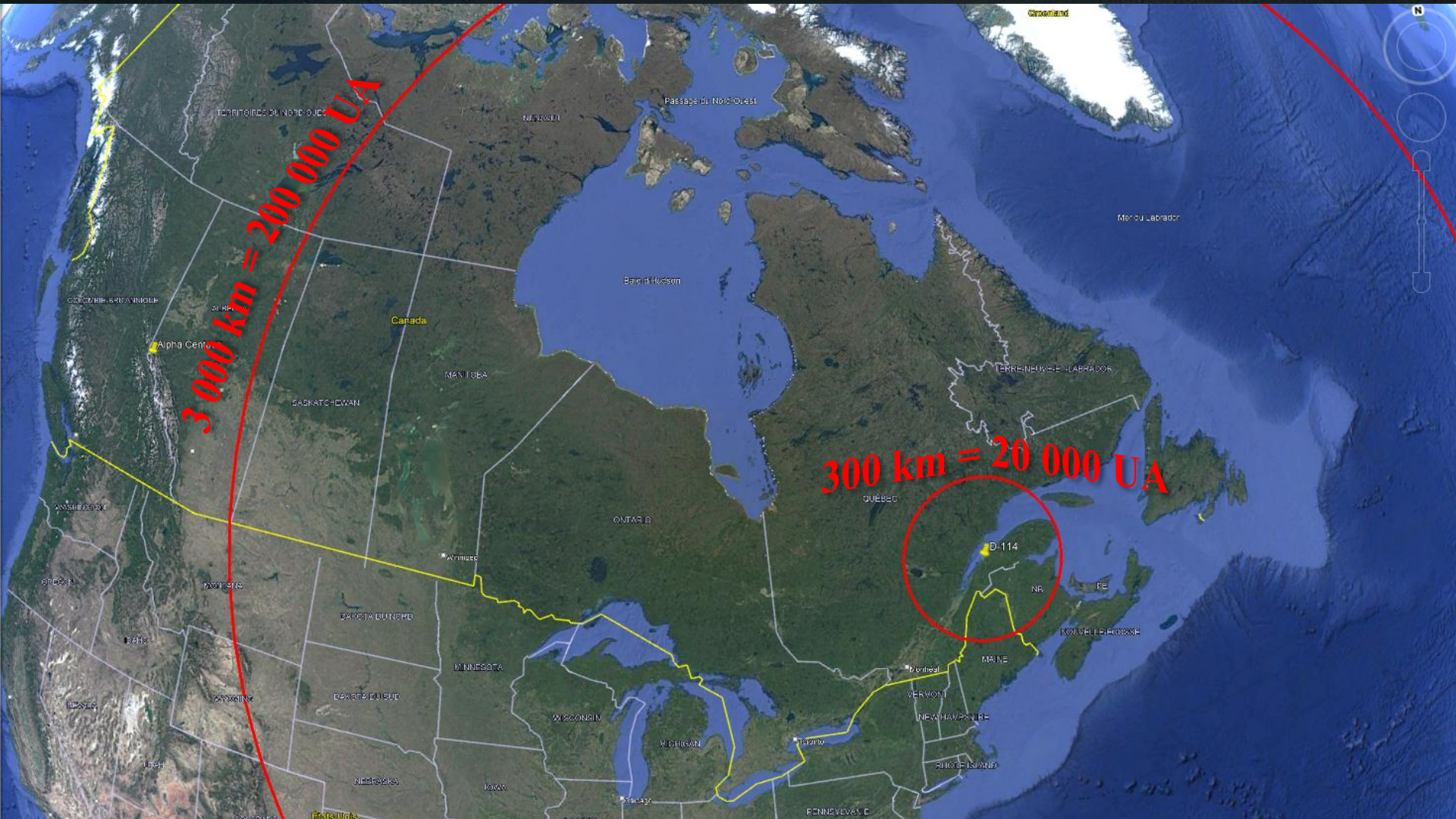
Southwest Research Institute, Boulder, CO 80302

Martin J. Duncan

Queen's University, Kingston, ON K7L 3N6, Canada

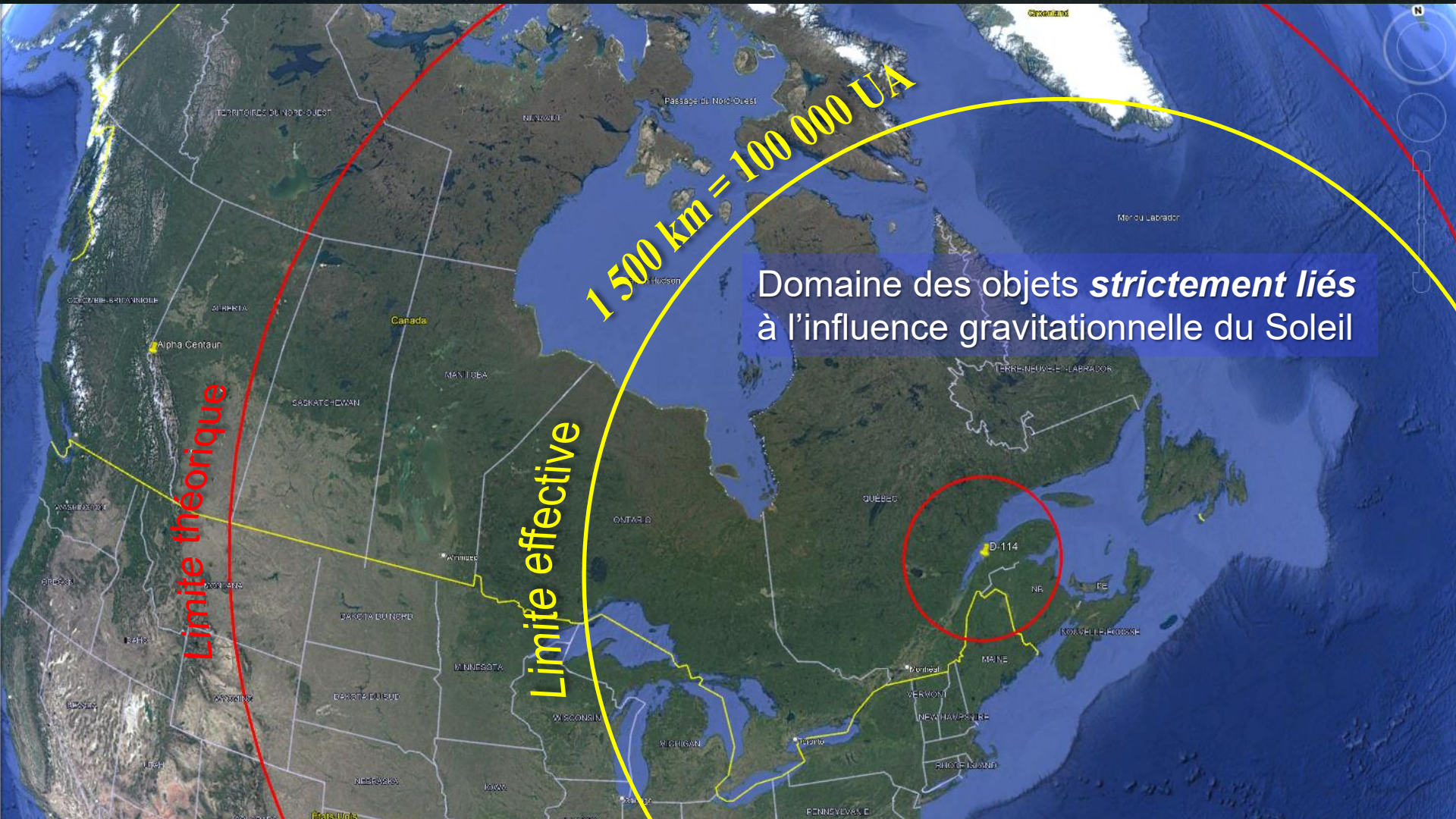
Abstract. The Oort cloud is the primary source of the long-period comets. We describe what is known about the population and mass of the Oort cloud, including the hypothetical inner Oort cloud; outline dynamical processes in the cloud; and summarize new simulations of the formation of the cloud.

➤ Notre nuage de Oort si Le Soleil =



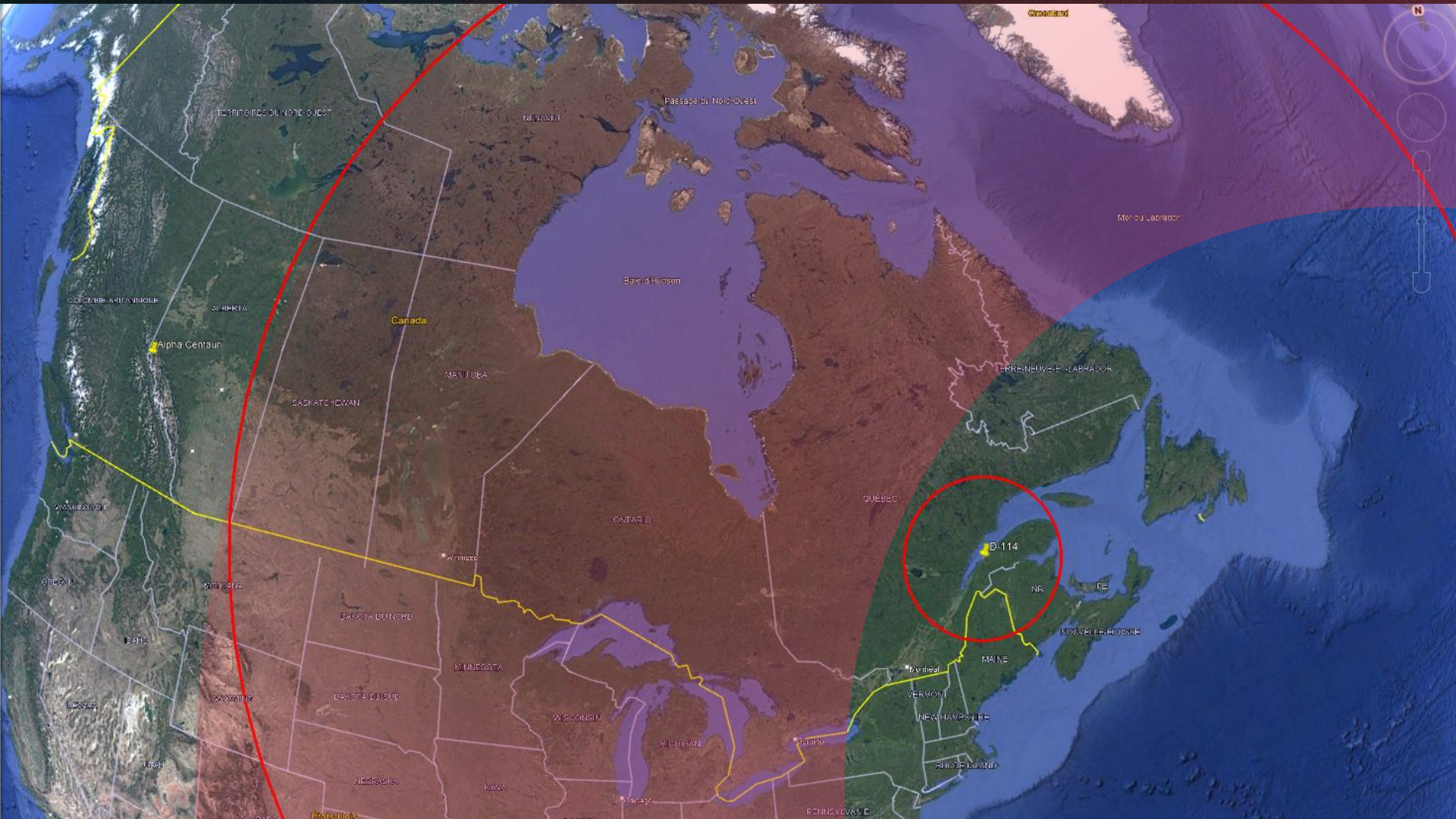
3) Ben, ous qui sont !

➤ Notre nuage de Oort si Le Soleil = 



3) Ben, ous qui sont !

➤ Notre nuage de Oort si Le Soleil = 



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Mais, grand dieu, jusqu'où s'étend l'effet gravitationnel du Soleil...

- Bien ! En théorie il ne finit jamais.

Restons ici dans un paradigme newtonien où la gravitation est assimilée à une **force**, une valeur vectorielle.

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Mais, grand dieu, jusqu'où s'étend l'effet gravitationnel du Soleil...

- Bien ! En théorie il ne finit jamais.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Mais, grand dieu, jusqu'où s'étend l'effet gravitationnel du Soleil...

- Bien ! En théorie il ne finit jamais.

$$F_{Gs} = G \frac{M_s}{d^2}$$

- La valeur de la force varie en fonction de l'inverse du carré de la distance, mais son influence tend vers l'infini.

Oh ! Affligeant rappel théorique

- Donnons-nous un aperçu de sa valeur.
- Faisons abstraction de la propriété essentielle de la force gravitationnelle associée à toute masse.
- Et demandons-nous : “Que faudrait-il pour retenir la Terre en orbite autour du Soleil.”
 - Imaginons la Terre attachée au Soleil à l'aide d'un câble d'acier de la plus haute résistance.

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Analogie avec un lanceur de marteau :



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Quelle grosseur de câble faudrait-il ?

- Calculons d'abord la force

$$F = G \frac{M_{\odot} m_{\oplus}}{UA^2} \rightarrow F \approx 3,542 \times 10^{22} \text{ N}$$

- Supposons une contrainte (σ) de rupture σ_{lev} de l'acier

$$\text{Aire}_{\text{cable}} = F/\sigma \quad \text{et} \quad d_{\text{cable}} = \sqrt{4A/\pi}$$

➤ On trouve un diamètre du câble...

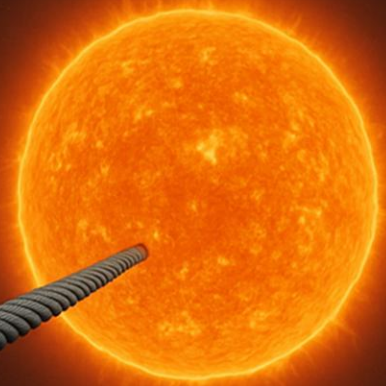
$$D = 6130 \text{ km}$$

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Soit un câble dont le diamètre est $\cong$ au rayon de la Terre !

$$R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$$

$$D = 6130 \text{ km}$$



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Mais à 200 000 UA, La force gravitationnelle du Soleil ($F = \frac{GM}{d^2}$) est 40 milliards de fois plus faible qu'à 1 UA.

- Mais elle n'est toujours pas nulle.

- Elle suffit encore à retenir de petits objets faiblement liés.

➤ La force finit par trouver sa limite pratique lorsqu'elle se confronte aux **forces de marée de la galaxie.**

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Par analogie, considérons la marée exercée par la Lune sur la Terre.

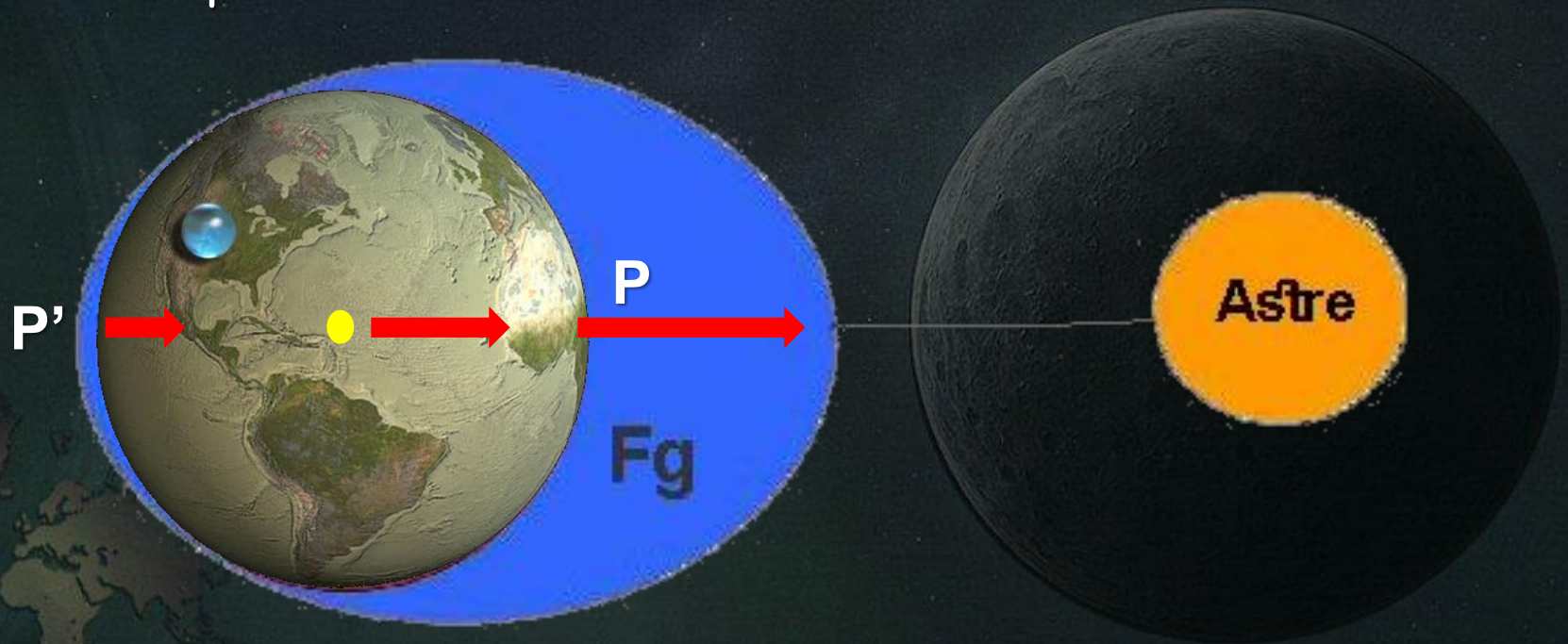
- Pourquoi la marée...

Les objets astronomiques sont *tridimensionnels* et la force d'attraction d'un autre corps céleste s'applique de manière différenciée en des points singuliers de cet objet. C'est ce qui donne lieu aux **forces de marée**.

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ Par analogie, considérons la marée exercée par la Lune sur la Terre.

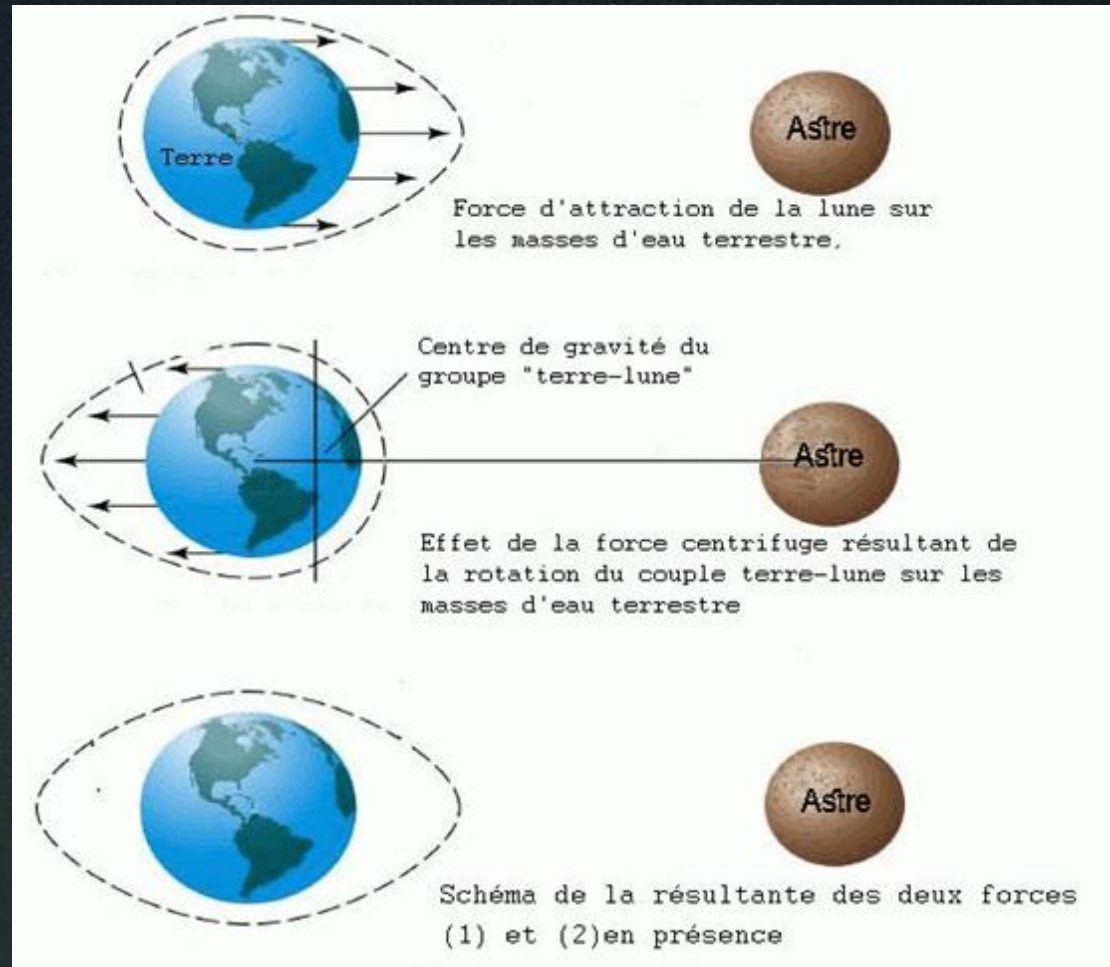
■ Pourquoi la marée...



Oh ! Affligeant rappel théorique

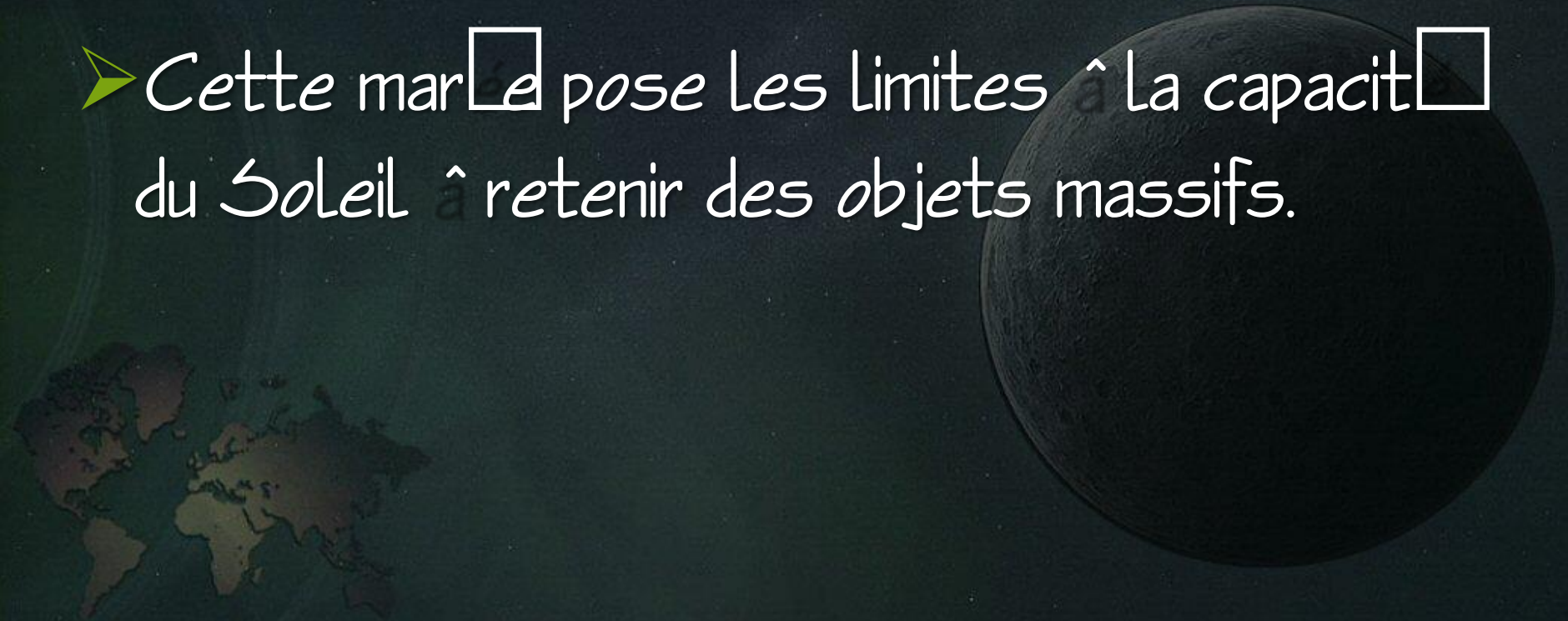
➤ Par analogie, considérons la marée exercée par la Lune sur la Terre.

■ Pourquoi la marée...



Oh ! Affligeant rappel théorique

- La galaxie exerce un effet de marée sur le Système solaire qui serait une structure tridimensionnelle de $\pm 200\,000$ UA de rayon.
- Cette marée pose les limites à la capacité du Soleil à retenir des objets massifs.



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ On parle souvent du nuage de Oort comme d'une **sphère** qui enveloppe le **Système** solaire comme une coque.

Informations sur le nuage d'Oort

Le nuage d'Oort se situe bien au-delà de Pluton et des confins les plus éloignés de la ceinture de Kuiper.

Les scientifiques pensent que le nuage d'Oort est une gigantesque enveloppe sphérique entourant le Soleil, les planètes et les objets de la ceinture de Kuiper. Il s'agit d'une sorte de grande bulle épaisse autour de notre système solaire, composée d'objets glacés semblables à des comètes.

Obtenez les faits ➔



Image infrarouge de la comète C/2006 W3 (Christensen) du nuage d'Oort, prise par le vaisseau spatial NEOWISE de la NASA. NEOWISE a observé la comète le 20 avril 2010, alors qu'elle se trouvait à près de 600 millions de kilomètres de la Terre.

NASA

Oh ! Affligeant rappel théorique

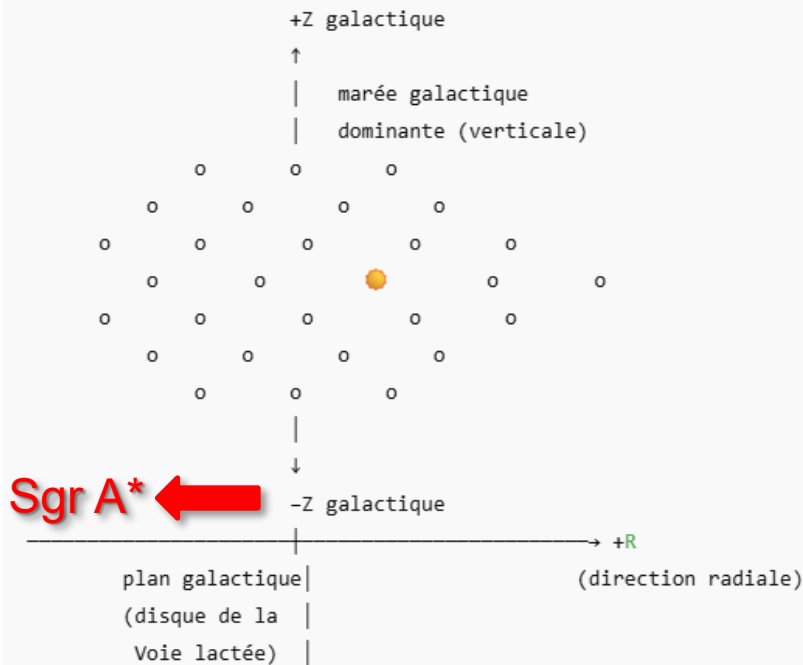
- Mais La marée galactique devrait déformer aussi Le nuage de Oort qui prendrait alors une forme ovoïde, ellipsoïdale, prolate.



Oh ! Affligeant rappel théorique

Schéma orienté : Soleil – Nuage de Oort – Galaxie

Vue globale (3D conceptuelle)



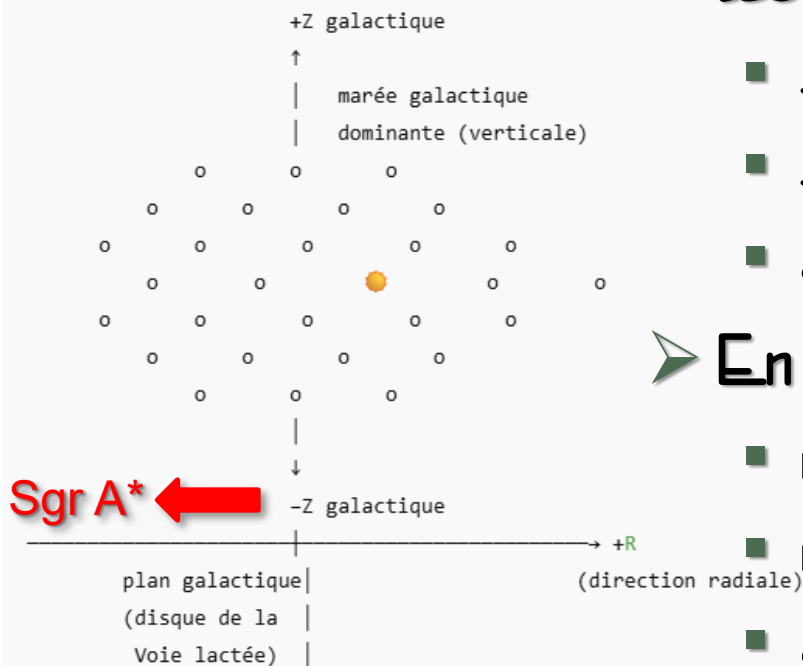
- ☀ : Soleil
- ○ : objets du nuage de Oort
- Axe Z : perpendiculaire au plan galactique
- Axe R : direction radiale dans le plan galactique

👉 Le nuage est légèrement allongé selon $\pm Z$ → forme prolate

Oh ! Affligeant rappel théorique

Schéma orienté : Soleil – Nuage de Oort – Galaxie

Vue globale (3D conceptuelle)



- : Soleil
- : objets du nuage de Oort
- Axe Z : perpendiculaire au plan galactique
- Axe R : direction radiale dans le plan galactique

Le nuage est légèrement allongé selon $\pm Z$ → forme prolate

➤ Contrairement aux océans terrestres, les objets du nuage de Oort :

- sont indépendants les uns des autres,
- suivent des orbites képlériennes très lentes,
- avec des périodes de millions d'années.

➤ En conséquence, la marée galactique :

- ne crée pas une déformation rigide,
- mais modifie statistiquement les orbites
- en fonction de leur orientation et de leur phase

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ La déformation est donc :

- alignée avec la structure galactique,
pas avec l'écliptique

➤ La marée galactique joue le même rôle conceptuel que la marée lunaire,

- mais elle déforme une **population d'orbites**,
pas un objet matériel –
- d'où une forme ovale diffuse, et non une déformation visible et fixe.



Oh ! Affligeant rappel théorique

- La distribution est donc alignée avec la structure galactique, pas avec l'écliptique
- La matière galactique joue le même rôle conceptuel que la matière lunaire,
 - mais elle forme une **population d'orbites**, pas un objet matériel –
 - d'une forme ovale diffuse, et non une distribution visible et fixe.

C'est ici que l'analogie avec le système Terre-Lune devient boiteuse.

Oh ! Affligeant rappel théorique

Effets de Marée : Objet Cohérent vs. Nuage Diffus

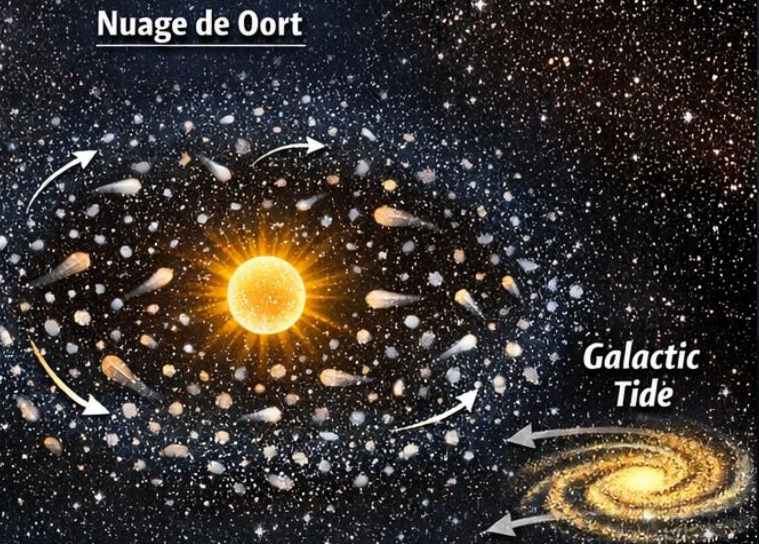
Objet Cohérent



- Étiré, Déformé
- Reste Intact

Objet Cohérent : Déformé en Entier

Nuage de Comètes Diffus



- Orbites Modifiées, Redistribuées
- Sans Cohésion

Nuage Diffus: Orbites Déplacées Individuellement

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ *Le nuage de Oort est centré sur Le Soleil, mais "sculpté" par La Galaxie :*

il reste quasi sphérique, tout en étant légèrement étiré parallèlement au plan galactique, avec une asymétrie secondaire vers Le centre de La Voie lactée.



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ On définit ainsi une structure virtuelle appelée paradoxalement la **sphère de Hill**.

- Elle fixe les limites pratiques de l'extension de la force gravitationnelle du Soleil.
- On peut calculer le rayon de la sphère de Hill pour un corps de masse **m** orbitant autour d'un corps de masse **M** .

$$r_H = a \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3}$$

Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ $r_H = a \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3}$

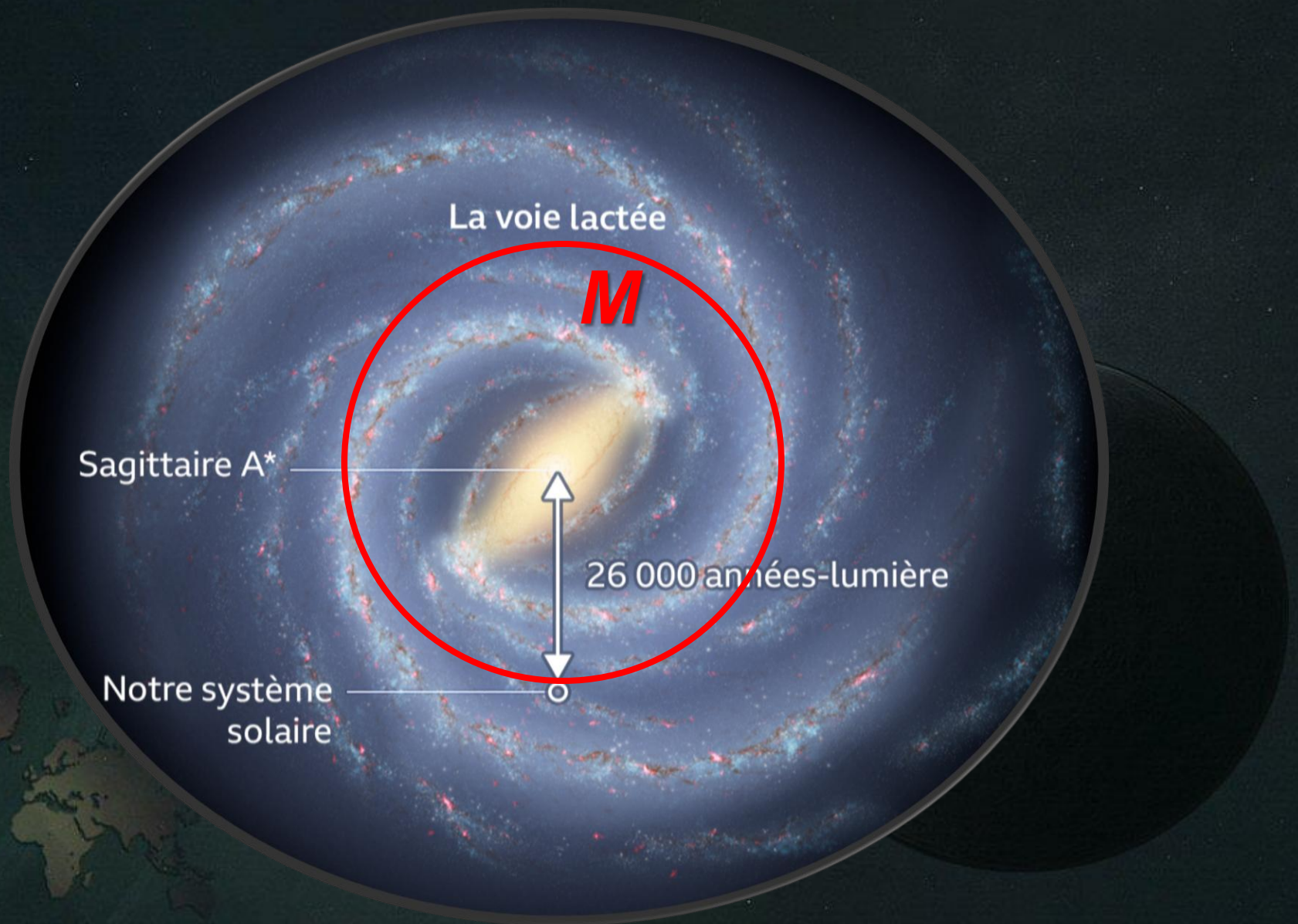
➤ $m = M_{\odot}$ = masse du Soleil

• $M = M_{\text{gal}}$ = masse de la Voie

lactée *contenue* l'intérieur de l'orbite du Soleil

• a = distance du Soleil au centre galactique
(son rayon orbital)

Oh ! Affligeant rappel théorique



Oh ! Affligeant rappel théorique

➤ $r_H = a \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3}$ du Système solaire

➤ On a $m = M_{\odot}$

$a \approx 8 \text{ kpc} \quad 1 \text{ kpc} = 206\,265 \text{ UA}$

$a = 8 \times 206\,265 = 1\,650\,000 \text{ UA}$

$M_{gal,int} \approx 10^{11} M_{\odot}$

➤ On trouve $r_H \approx \mathbf{246\,000 \text{ UA}}$

Oh ! Affligeant rappel théorique

- La sphère de Hill résulte d'un équilibre entre :
 - La force gravitationnelle qui décroît comme $1/d^2$
 - La force de marée qui s'amplifie avec la distance
- Là où la force de marée surpasse la gravité locale, il n'y a plus d'orbite stable.
- Mais la zone vraiment stable pendant des milliards d'années où les orbites survivent tout ce temps ne dépasse pas $\approx 100\,000$ UA.

Oh ! Affligeant rappel théorique

Quelques exemples de sphères de Hill

Corps	Rayon de la sphère de Hill	Peut garder des satellites ?
Terre	$\sim 1,5 \cdot 10^6 \text{ km}$	✓ Lune + satellites artificiels
Jupiter	$\sim 53 \cdot 10^6 \text{ km}$	✓ nombreuses lunes
Soleil (dans la Galaxie)	$\sim 200.000 \text{ UA}$	✓ Nuage de Oort

Oh ! Affligeant rappel théorique

Représente l'emplacement des points de Lagrange (L_1 , L_2).

Quelques exemples



Corps

Terre

$\sim 1,5 \cdot M \cdot km$

✓ Lune + satellites artificiels

Jupiter

$\sim 53 \cdot M \cdot km$

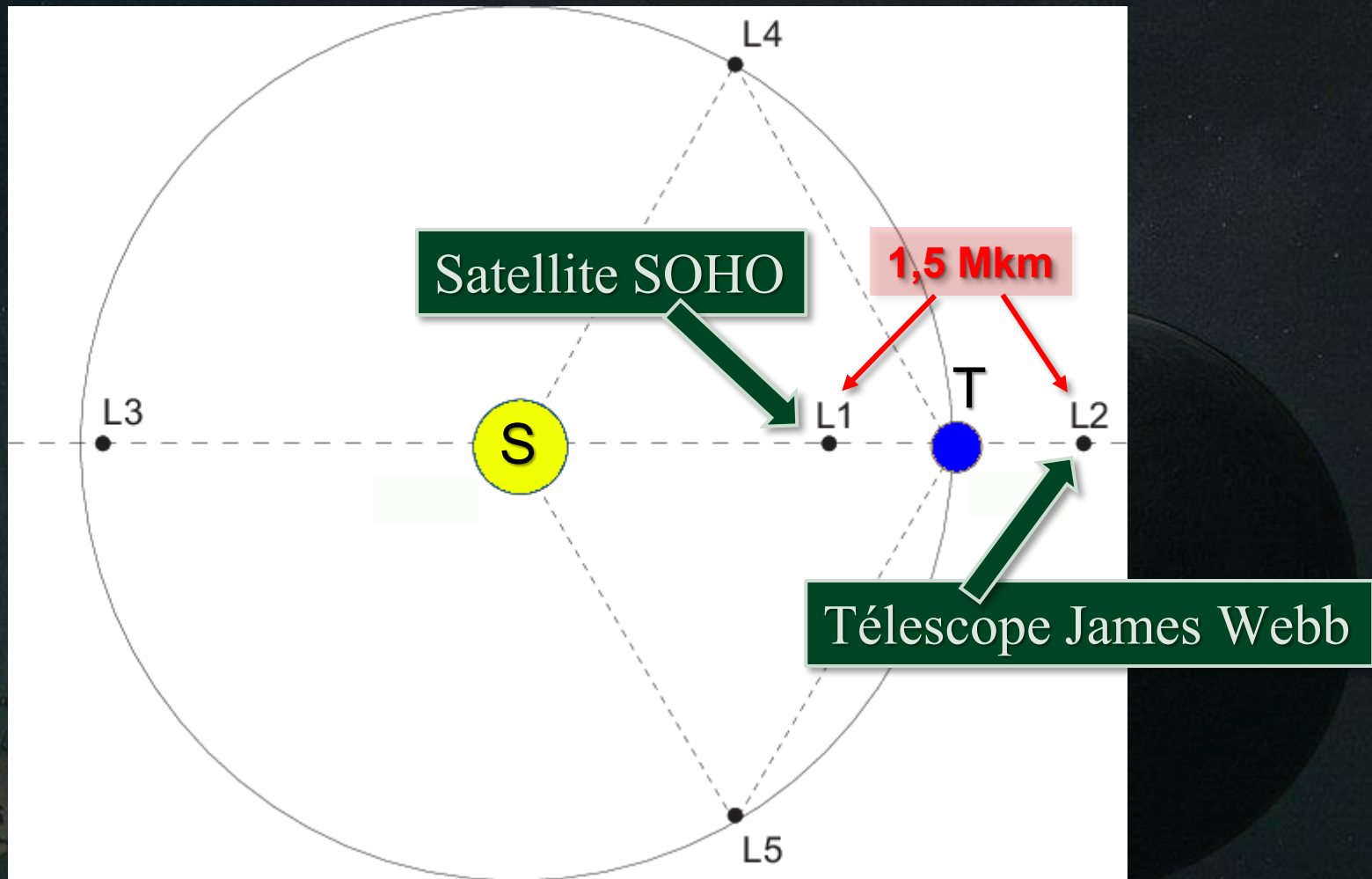
✓ nombreuses lunes

Soleil (dans la Galaxie)

$\sim 200.000 \cdot UA$

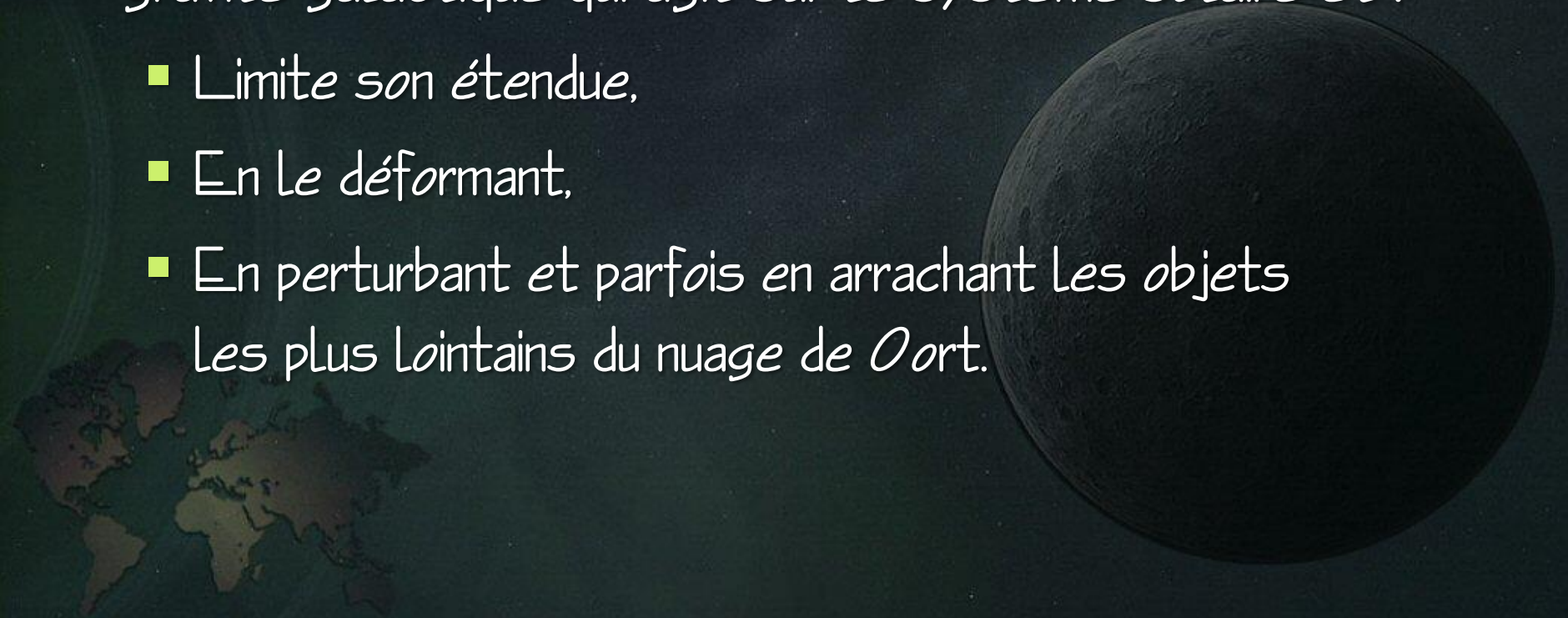
✓ Nuage de Oort

Oh ! Affligeant rappel théorique



Ce qu'il faut retenir

- La *gravité ne s'arrête jamais*, mais la domination gravitationnelle oui.
- La ***force de marée*** de la Voie lactée est le différentiel de gravité galactique qui agit sur le système solaire et :
 - Limite son étendue,
 - En le déformant,
 - En perturbant et parfois en arrachant les objets les plus lointains du nuage de Oort.



Ce qu'il faut retenir

- La *sphère de Hill* définit la frontière réelle du pouvoir gravitationnel d'un corps dans un système hiérarchique.
- C'est la raison pour laquelle l'étendue pratique de l'effet gravitationnel du Soleil a une limite supérieure.
- Le Soleil ne peut pas conserver des objets au-delà de cette limite qui est d'environ **200 000 UA**.

La Sphère de Hill ➡ zone où le Soleil gagne
"le bras de fer" gravitationnel. (200 000 UA)
Le vrai Nuage de Oort ➡ zone où les orbites
survivent longtemps. (100 000 UA)

Ce qu'il faut retenir

- Malgré tout, l'**effet de marée galactique** peut cependant perturber suffisamment l'orbite des objets du *Nuage de Oort* pour précipiter certains de ces objets vers le *Système solaire interne* où ils deviennent des *comètes à longue période*.
- C'est le **mécanisme fondamental** de formation de ces *comètes*.
- Les objets du *Nuage de Oort* sont tellement espacés entre eux qu'ils interagissent peu gravitationnellement et ne peuvent donc pas vraiment s'influencer mutuellement.

Ce qu'il faut retenir

- Malgré tout, l'**effet de marée galactique** peut cependant perturber suffisamment l'orbite des objets du *Nuage de Oort* pour précipiter certains de ces objets vers le Système solaire interne où ils deviennent des comètes à longue période.
- C'est le **mécanisme** **for** ces comètes.

La masse totale des objets du Nuage de Oort équivaut à $1-5 M_{\oplus}$
- Les objets du Nuage de Oort sont tellement espacés entre eux qu'ils interagissent peu gravitationnellement et ne peuvent donc pas vraiment s'influencer mutuellement.

2) Ça vient d'où

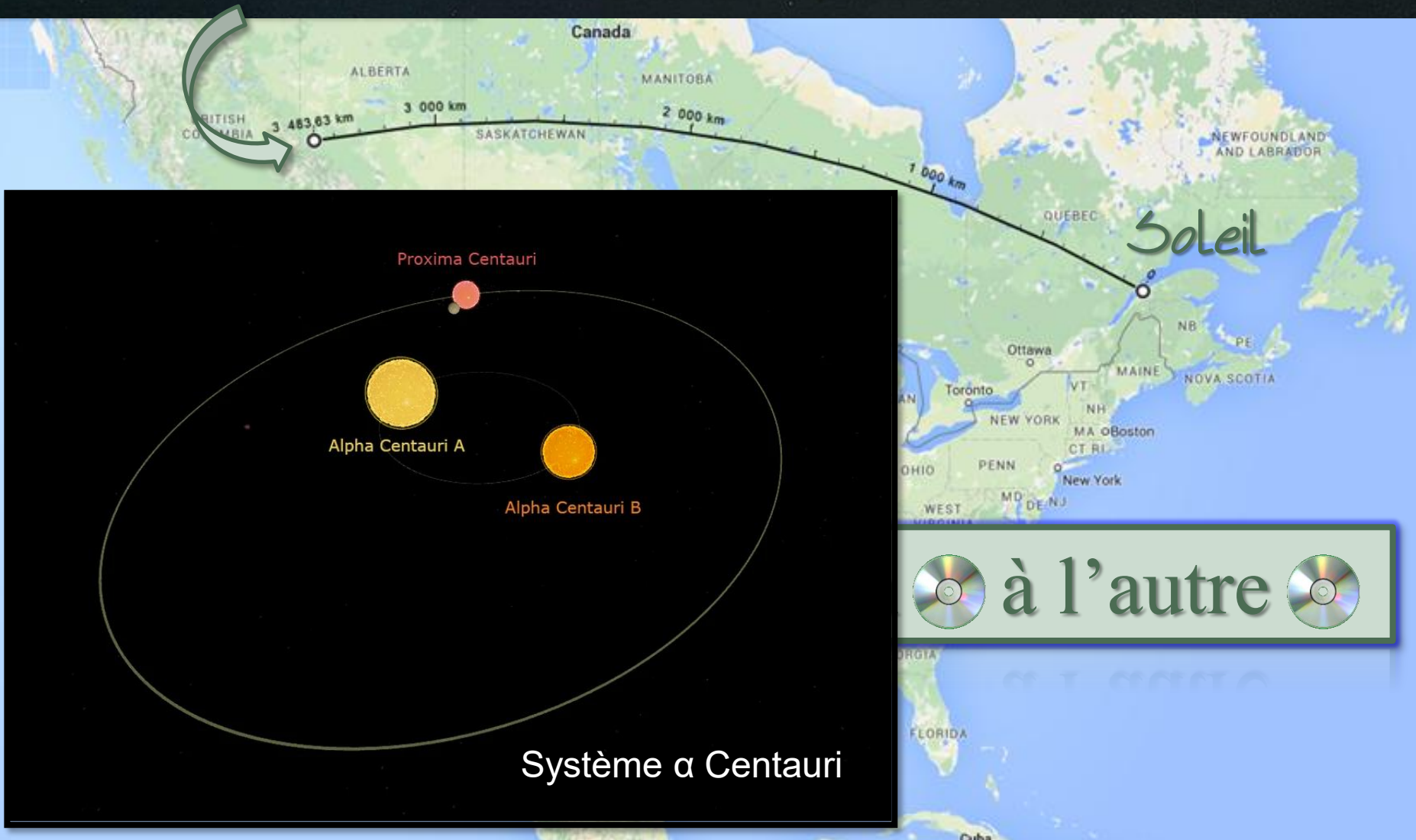
➤ Proxima du Centaure à 4,2 a.l.



D'un à l'autre

2) Ça vient d'où

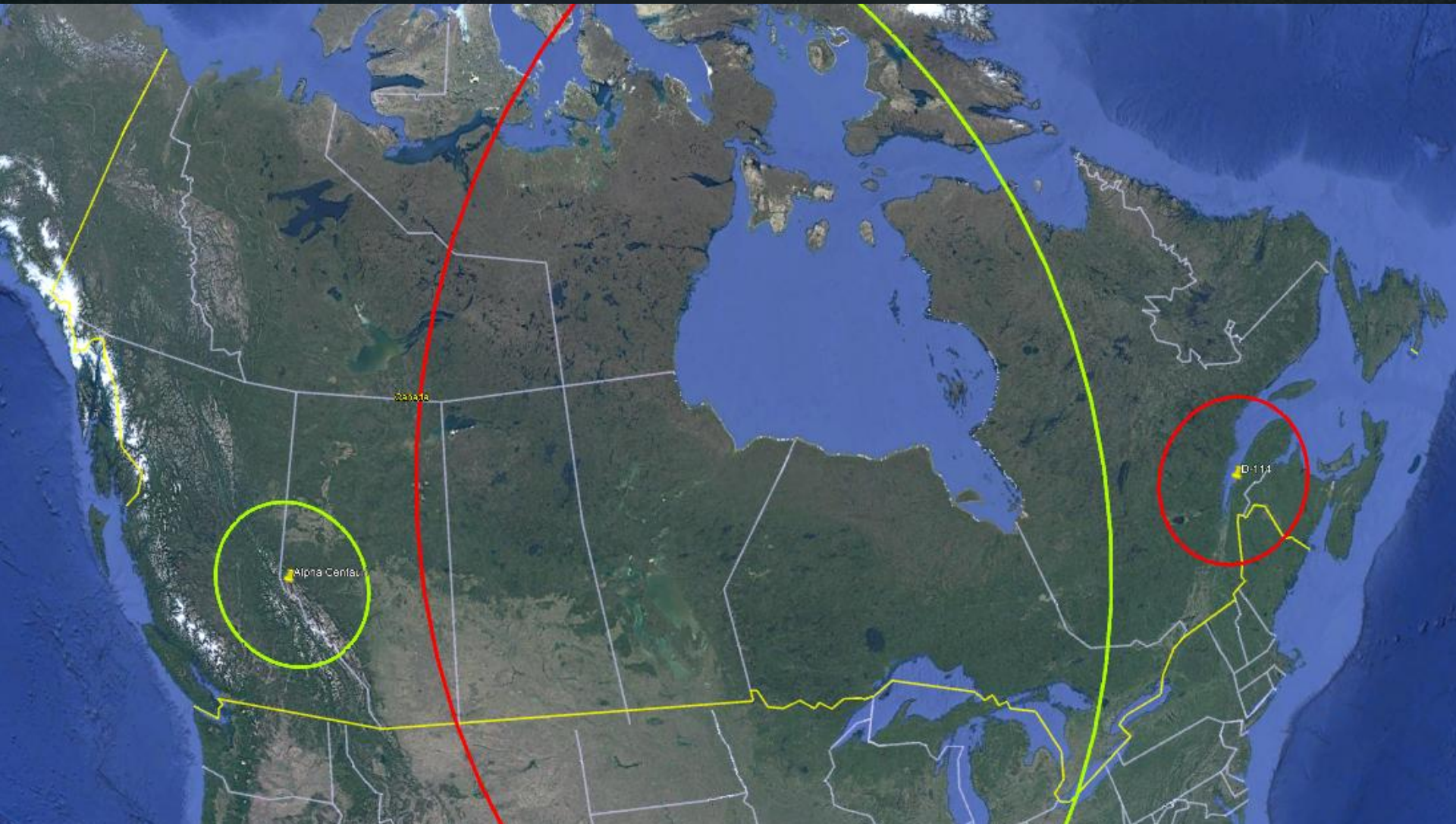
➤ Proxima du Centaure à 4,2 a.l.





2) Ça vient d'où

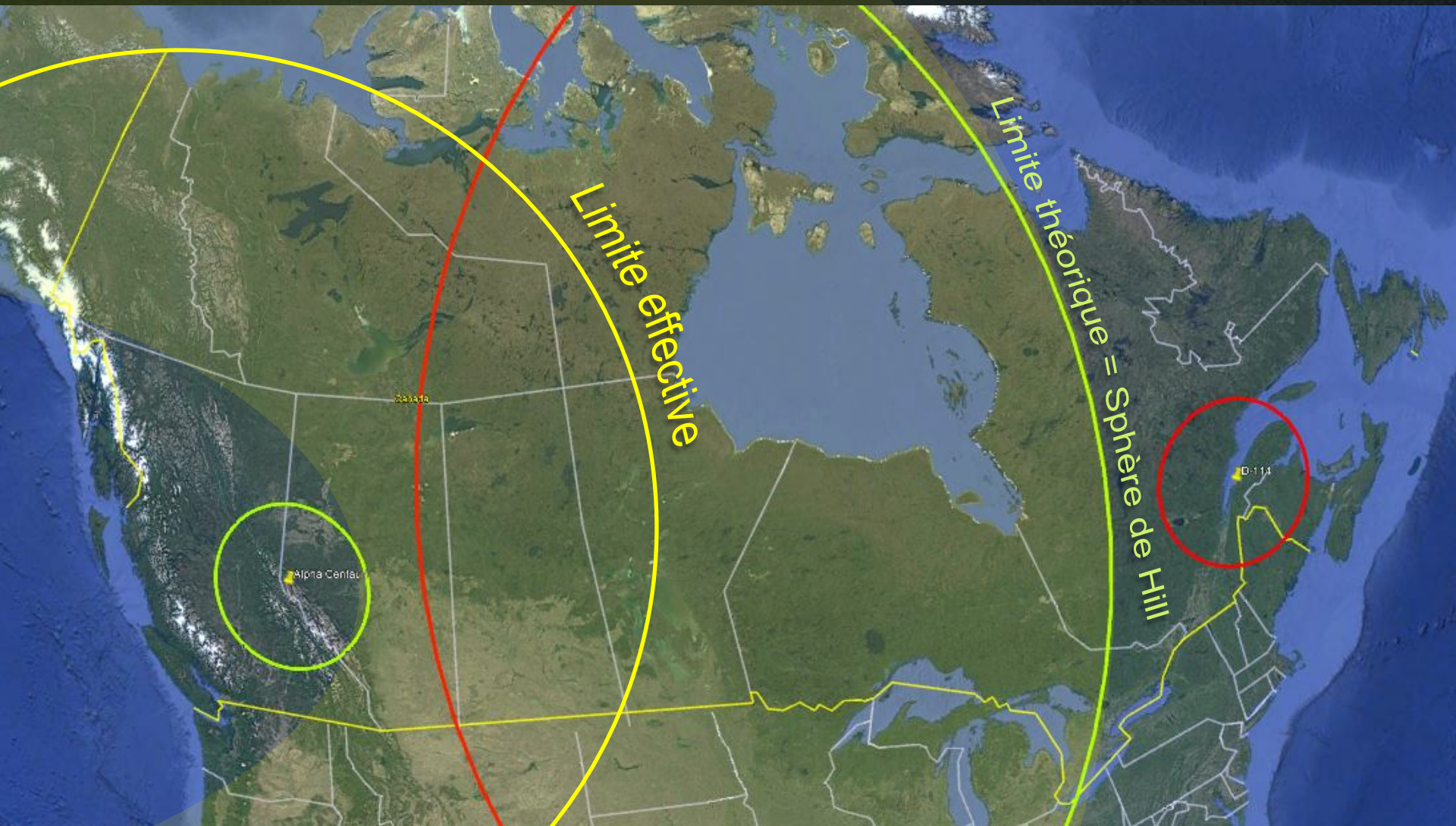
➤ Les nuages de *Oort* du Soleil et α -Centauri





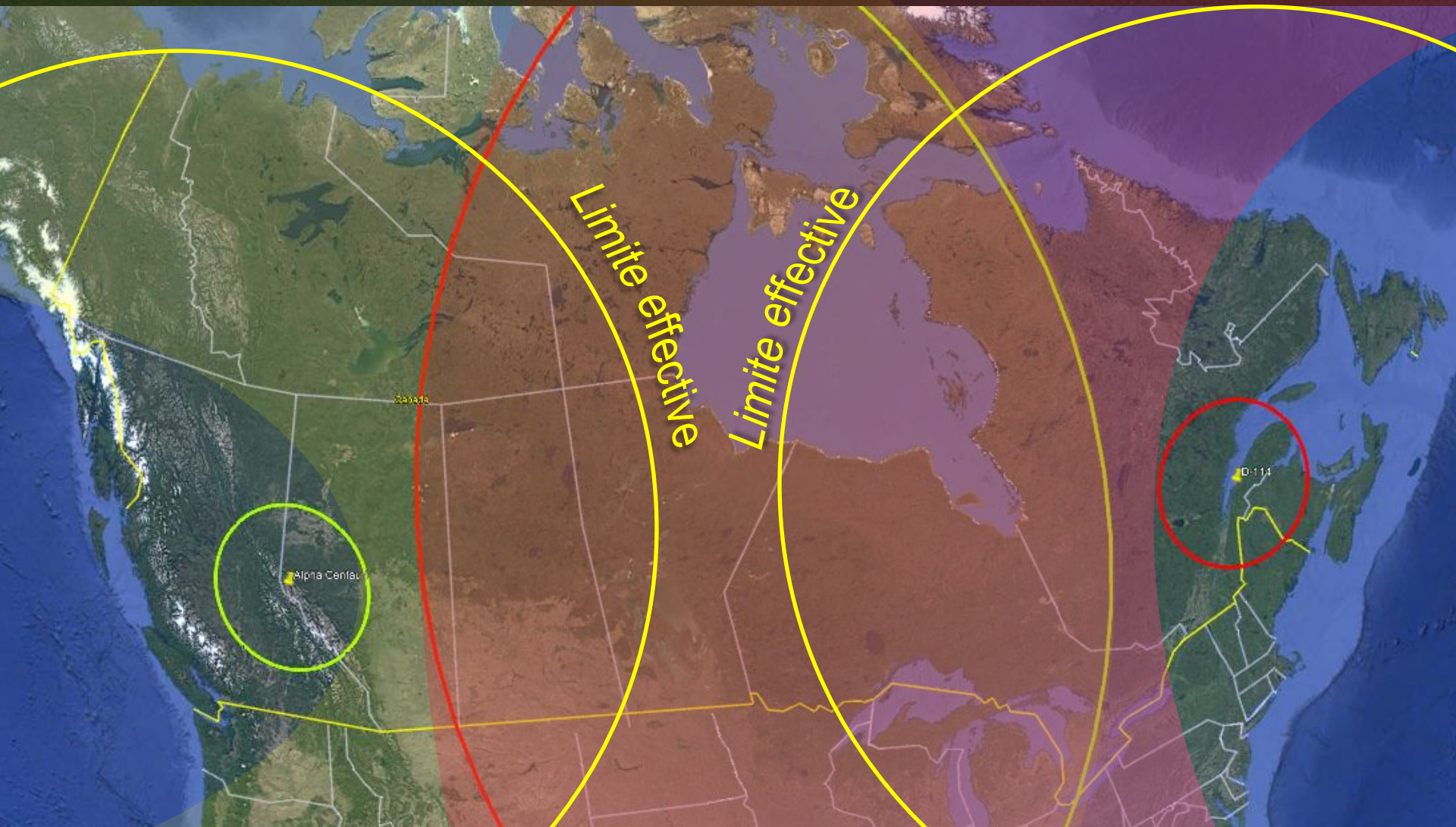
2) Ça vient d'où

➤ Les nuages de Oort du Soleil et α -Centauri

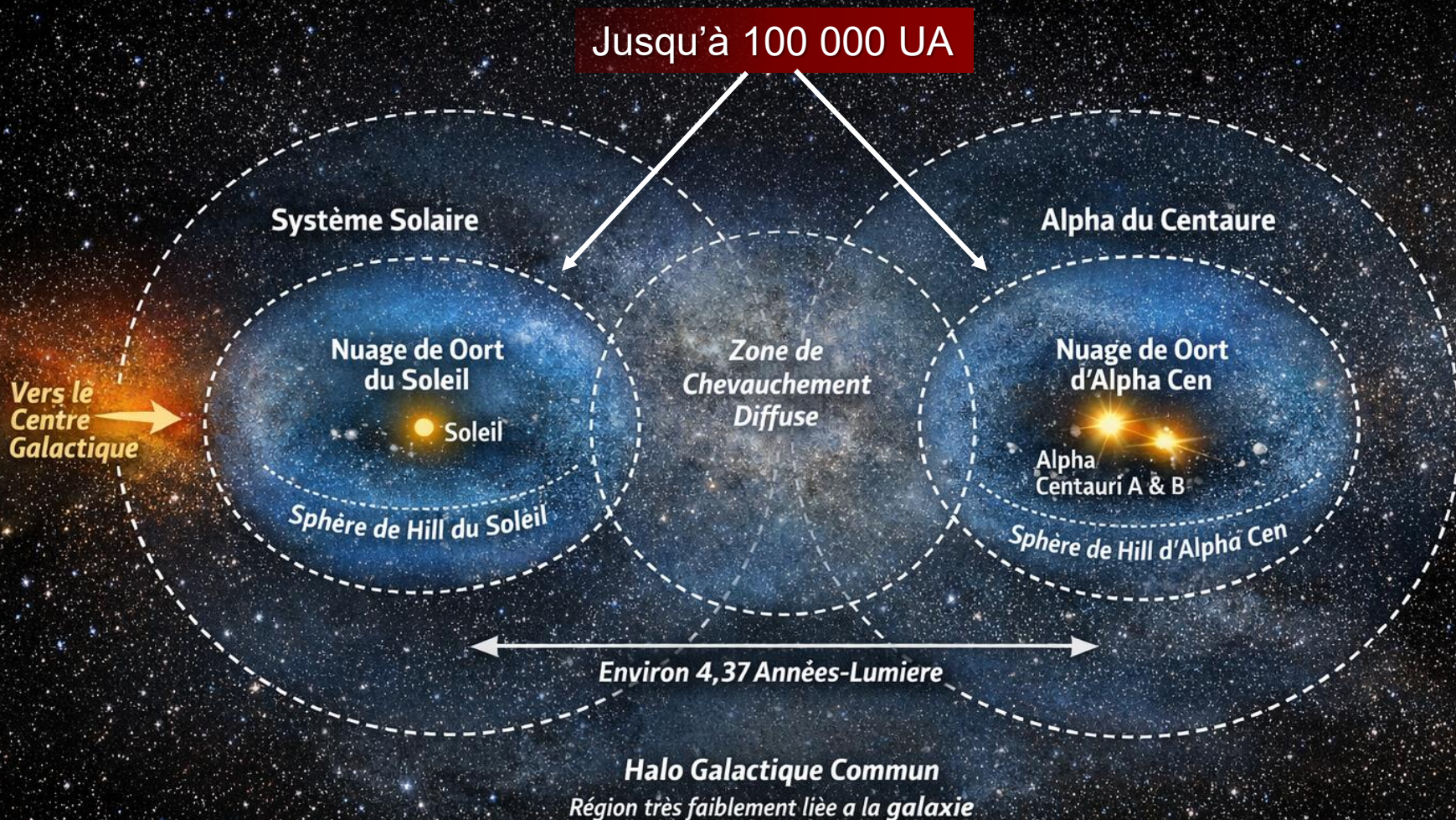


2) Ça vient d'où

➤ Les nuages de Oort du Soleil et α -Centauri



2) Ça vient d'où





2) Ça vient d'où

➤ Les nuages de Oort du Soleil et α -Centauri



➤ Peut-on toujours parler d'un espace interstellaire ?



2) Ça vient d'où

➤ Les nuages de Oort du Soleil et α -Centauri



➤ 3i/Atlas va quitter la sphère de Hill dans quelques dizaines de milliers d'années.

2) Ça vient d'où

- Mais attention ! Bien que Le nuage de Oort soit peuplé de cent à mille milliards d'objets dont La taille va de quelques dizaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres,
- En raison de l'immensité de l'espace,
 - Ces objets sont éloignés les uns des autres de 1 à 5 milliards de kilomètres,
 - Soit la distance qui sépare Le Soleil de Saturne jusqu'à Neptune.

2) Ça vient d'où

➤ Prenons un nuage de Oort entre 20 000 et 200 000 UA

$$V = \frac{4}{3}\pi(200\,000^3 - 20\,000^3)UA^3$$
$$= 3,35 \times 10^{16}UA^3$$

- Si on a mille milliards d'objets = 10^{12}
- Alors, $V_{moy} = \frac{V}{N_{Objets}} = \frac{3,35 \times 10^{16}UA^3}{10^{12}} = 33\,476\,UA^3$
- Et la distance moyenne entre les objets = $\sqrt[3]{33\,476}$
- $O_u \approx 32\,UA$

2) Ça vient d'où

➤ Prenons un nuage de Oort entre 20 000 et 200 000 UA

$$V = \frac{4}{3}\pi(200\,000^3 - 20\,000^3)UA^3$$
$$= 3,35 \times 10^{16}UA^3$$

■ Si on a mille milliards d'objets = 10^{12}

■ Alors, $V_{moy} = \frac{V}{N} = \frac{3,35 \times 10^{16}UA^3}{10^{12}} = 33500UA^3$

■ Et la distance moyenne

■ $O_u \approx 32 UA$

La distance du Soleil à Neptune est de 30 UA

476

4) Ça arrives-tu souvent

➤ On estime qu'entre 1 à 10 objets interstellaires ≥ 100 mètres traverseraient le Système solaire interne chaque année.

Submitted to the Astronomical Journal

DRAFT VERSION MARCH 8, 2021

Interstellar Objects in the Solar System:

1. Isotropic Kinematics from the Gaia Early Data Release 3

T. MARSHALL EUBANKS,^{1,2} ANDREAS M. HEIN,³ MANASVI LINGAM,^{4,5} ADAM HIBBERD,³ DAN FRANKLIN,⁶ NIKOLAOS PERAKIS,^{3,7} ROBERT KENNEDY,² W. P. BLASE,¹ AND JEAN SCHNEIDER⁸

ABSTRACT

1I/'Oumuamua (or 1I) and 2I/Borisov (or 2I), the first InterStellar Objects (ISOs) discovered, have opened up entirely new areas of exobody research. Finding additional ISOs and planning missions to intercept or rendezvous with these bodies will greatly benefit our knowledge of their likely orbits and arrival rates. Here, we use the local velocity distribution from the Gaia Early Data Release 3 Catalogue of Nearby Stars and a standard gravitational model to predict the velocity dependent flux of ISOs entering the solar system. With an 1I-type number density of $\sim 0.1 \text{ AU}^{-3}$, we predict that a total of ~ 6.9 such objects per year should pass within 1 AU of the Sun. There will be a fairly large high-velocity tail to this flux, with half of the incoming ISOs predicted to have a velocity at infinity, $v_{\infty} > 40 \text{ km s}^{-1}$. Our model predicts that $\sim 92\%$ of incoming ISOs will be residents of the galactic thin disk, $\sim 6\%$ (~ 4 per decade) will be from the thick disk, ~ 1 per decade will be from the halo and at most ~ 3 per century will be unbound objects, ejected from our galaxy or entering the Milky Way from another galaxy. The rate of ISOs with very low $v_{\infty} \lesssim 1.5 \text{ km s}^{-1}$ is so low in our model that any incoming very low velocity ISOs are likely to be previously lost solar system objects. Finally, we estimate a cometary ISO number density of $\sim 7 \times 10^{-5} \text{ AU}^{-3}$ for 2I type ISOs, leading to discovery rates for these objects possibly approaching once per decade with future telescopic surveys.

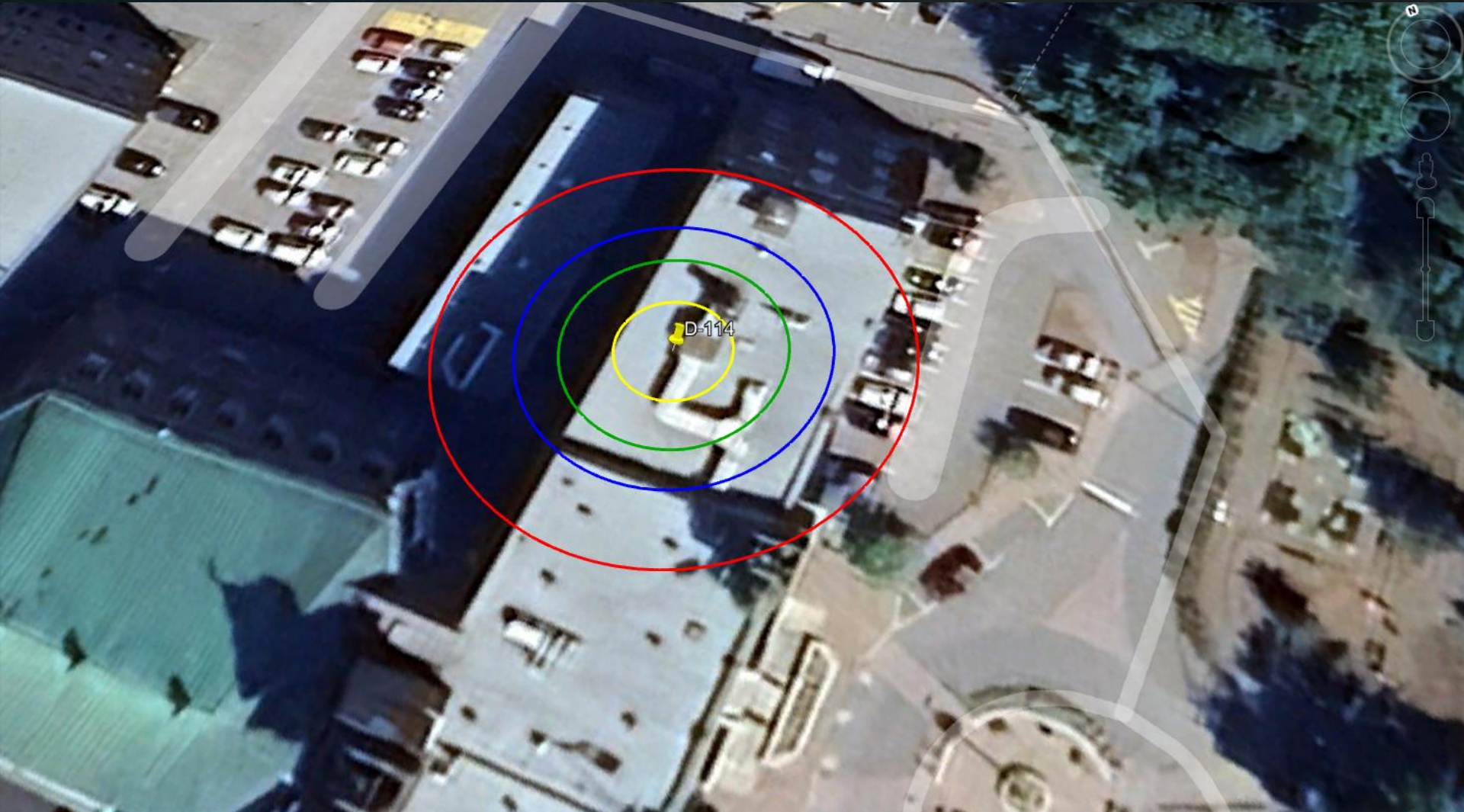


4) Ça arrives-tu souvent

- On estime qu'entre 1 à 10 objets interstellaires ≥ 100 mètres traverseraient le Système solaire interne chaque année.
- Pour les objets plus petits on pourrait parler de centaines par année.
- Le Système solaire interne est ridiculement minuscule dans l'immensité de l'espace.

4) Ça arrives-tu souvent

➤ On estime qu'entre 1 à 10 objets

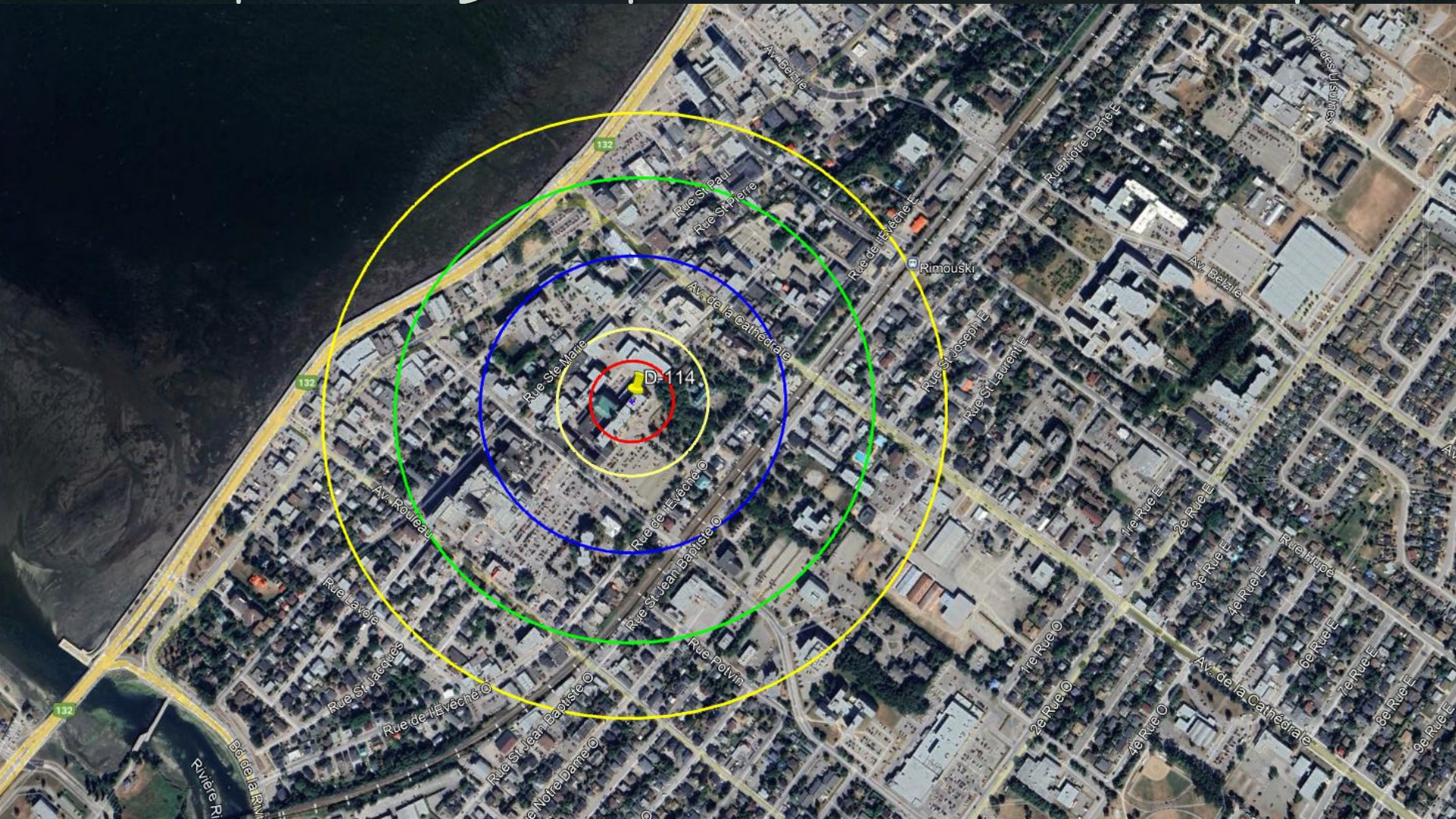


4) Ça arrives-tu souvent

- On peut imaginer que de la ceinture de Kuiper jusqu'au Soleil, des centaines, sinon des milliers, de ces corps interstellaires nous visitent chaque année.



➤ On peut imaginer que de la ceinture de Kuiper



5) Pourquoi on les voit pas

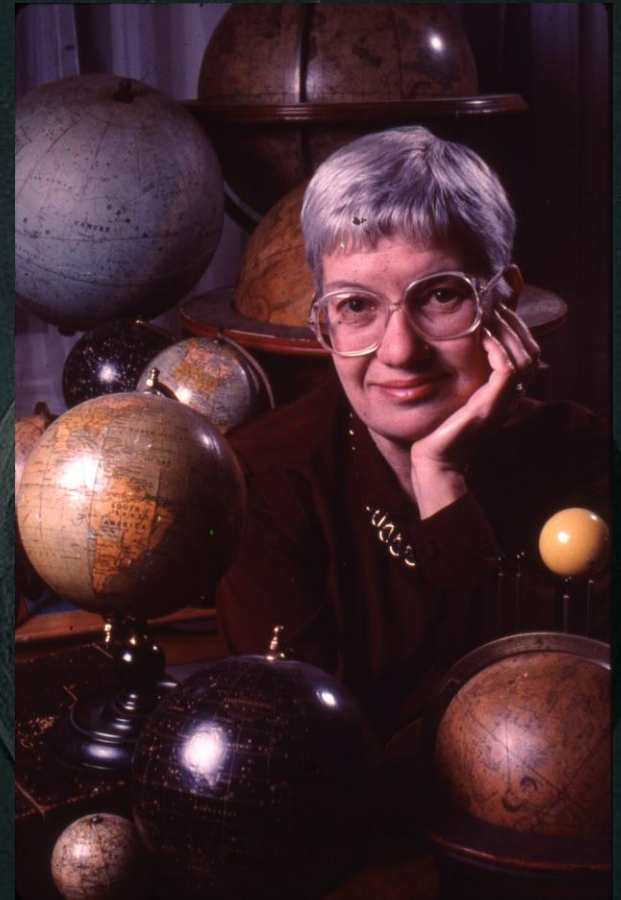
1. Ils sont petits
2. Ils sont sombres
 - À l'exception des comètes qui développent une queue
3. Ils vont vite, et ils passent à des vitesses de $20 \text{ à } 70 \text{ km/s}$ sur des trajectoires hyperboliques
4. Les télescopes actuels n'explorent qu'une petite partie du ciel, et encore, pas en continu.

6) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope

Vera Rubin

- Mais d'abord, qui était Vera Rubin ?
 - ✓ Astrophysicienne américaine
 - ✓ En étudiant la rotation des galaxies, elle postule l'existence de la matière noire.



1928-2016

6) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin

- Situé sur le Cerro Pachón
au Chili



6) On peut tu en voir plus

- Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin
 - Situé sur le Cerro Pachón
au Chili



6) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin

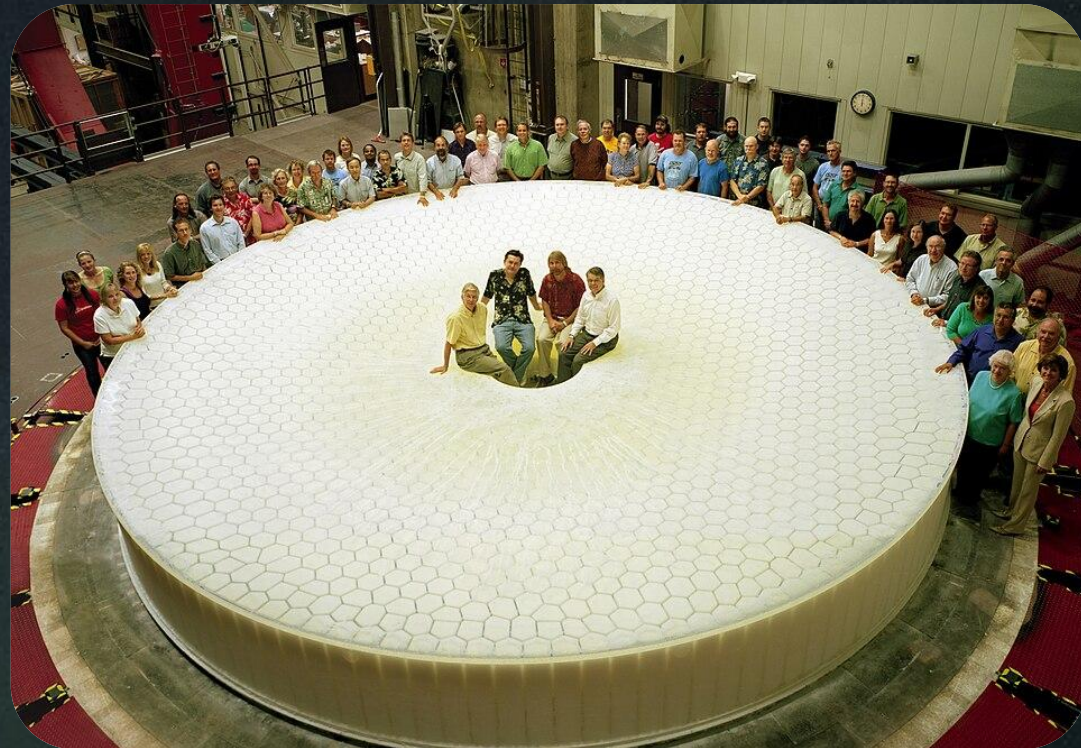
■ Le projet : Legacy Survey of Space and Time
(LSST)

- ✓ Relevé photographique complet du ciel austral pendant une durée de 10 ans,
- ✓ Cartographie de tout le ciel visible avec une rotation complète aux 2 à 3 nuits.
- ✓ Capacité optique jusqu'à une magnitude de 24,5 avec des temps d'exposition de 30 secondes

6) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin

- Miroir de 8,4 m
 - ✓ Poses rapides de 15 à 30 secondes

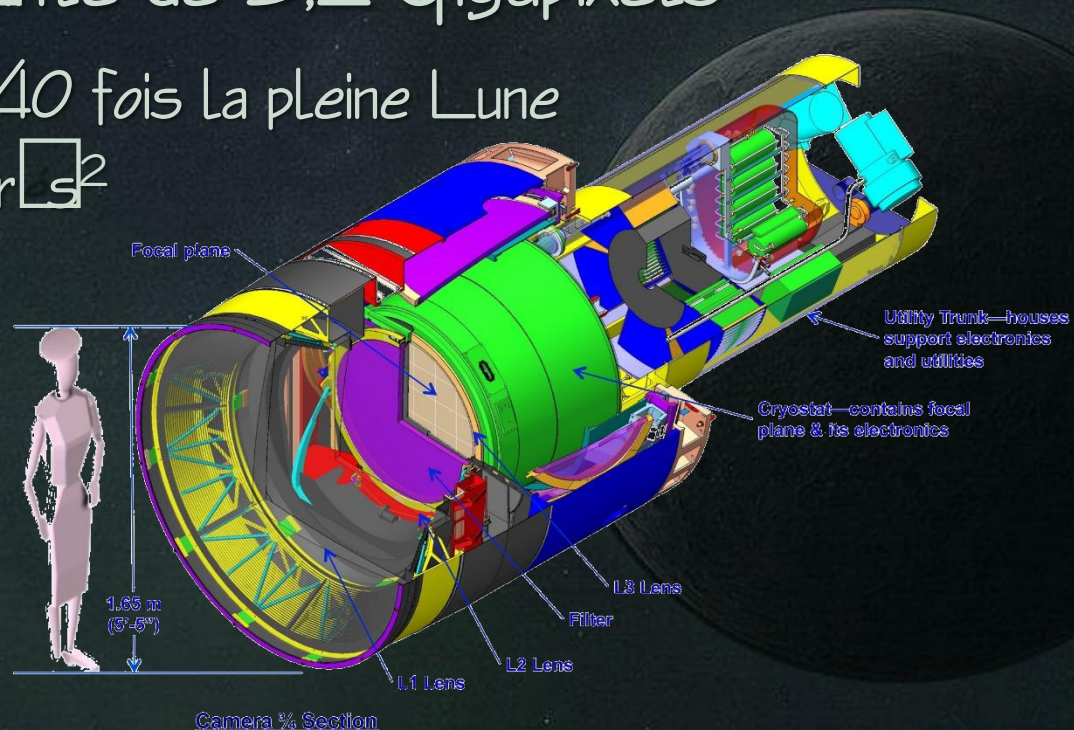


6) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin

- Caméra géante de 3,2 Gigapixels

- ✓ Champ de 40 fois la pleine Lune
ou $9,6 \text{ degrés}^2$



4) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin

- Permettra entre autres la détection des objets interstellaires aussi petits que 20 à 100 m.
- Chaque nuit, des millions d'objets seront "suivis" automatiquement grâce au système d'alerte.
- Tout objet ayant une orbite hyperbolique sera détecté en quelques heures.

4) On peut tu en voir plus

➤ Laissez-moi vous parler du télescope
Vera Rubin

- Permettra entre autres de découvrir des objets interstellaires au sein de notre système solaire.
- Chaque nuit, des centaines d'objets sont observés automatiquement grâce à un système d'alerte.

On espère découvrir jusqu'à 10 nouveaux objets interstellaires par année

- Tout objet ayant une orbite hyperbolique sera détecté en quelques heures.

4) On peut tu en voir plus

➤ Le télescope Vera Rubin aura beaucoup d'autres applications (à part le LSST) :

- Cartographie en profondeur de la Voie Lactée
 - ✓ Recensement colossal d'étoiles ad $m=27$ en combinant les images
 - ✓ Cartographie 3D grâce aux étoiles variables
- Études des structures halogalactiques

6) On peut tu en voir plus

➤ Le télescope Vera Rubin aura beaucoup d'autres applications :

- Étude des mouvements stellaires
 - ✓ Va compléter les données de Gaïa
- Étude de la matière noire et de sa distribution
- Sensibilité exceptionnelle aux objets très faibles comme les naines brunes, etc.

6) On peut tu en voir plus

➤ Le télescope Vera Rubin aura beaucoup d'autres applications

- Étude des mouvements
✓ Va compléter la
- Étude de la matière noire et de sa distribution
- Sensibilité exceptionnelle aux objets très faibles comme les naines brunes, etc.

1I/Oumuamua n'a été détecté qu'après son passage au périhélie. Rubin l'aurait vu des semaines plus tôt.

6) On peut tu en voir plus

➤ Quand le télescope Vera Rubin sera-t-il opérationnel ?

- Le télescope est déjà en fonction depuis le 23 octobre 2025.
- Le LSST sera pleinement opérationnel au début 2026.

À suivre avec grande attention.

6) On peut tu en voir plus

➤ Beaucoup de plaisirs à venir pour les hurluberlus à l'imagination débordante



Merci

