

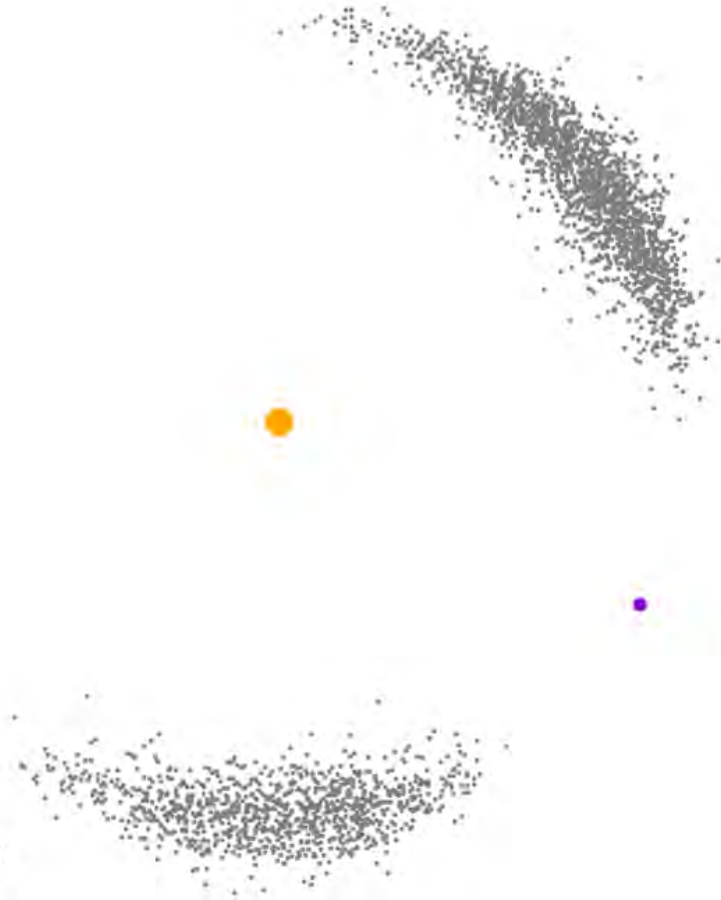
Les Troyens de Jupiter et la mission Lucy en route pour les explorer

Raphael Marschall

CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur,
Laboratoire J-L Lagrange, Nice, France

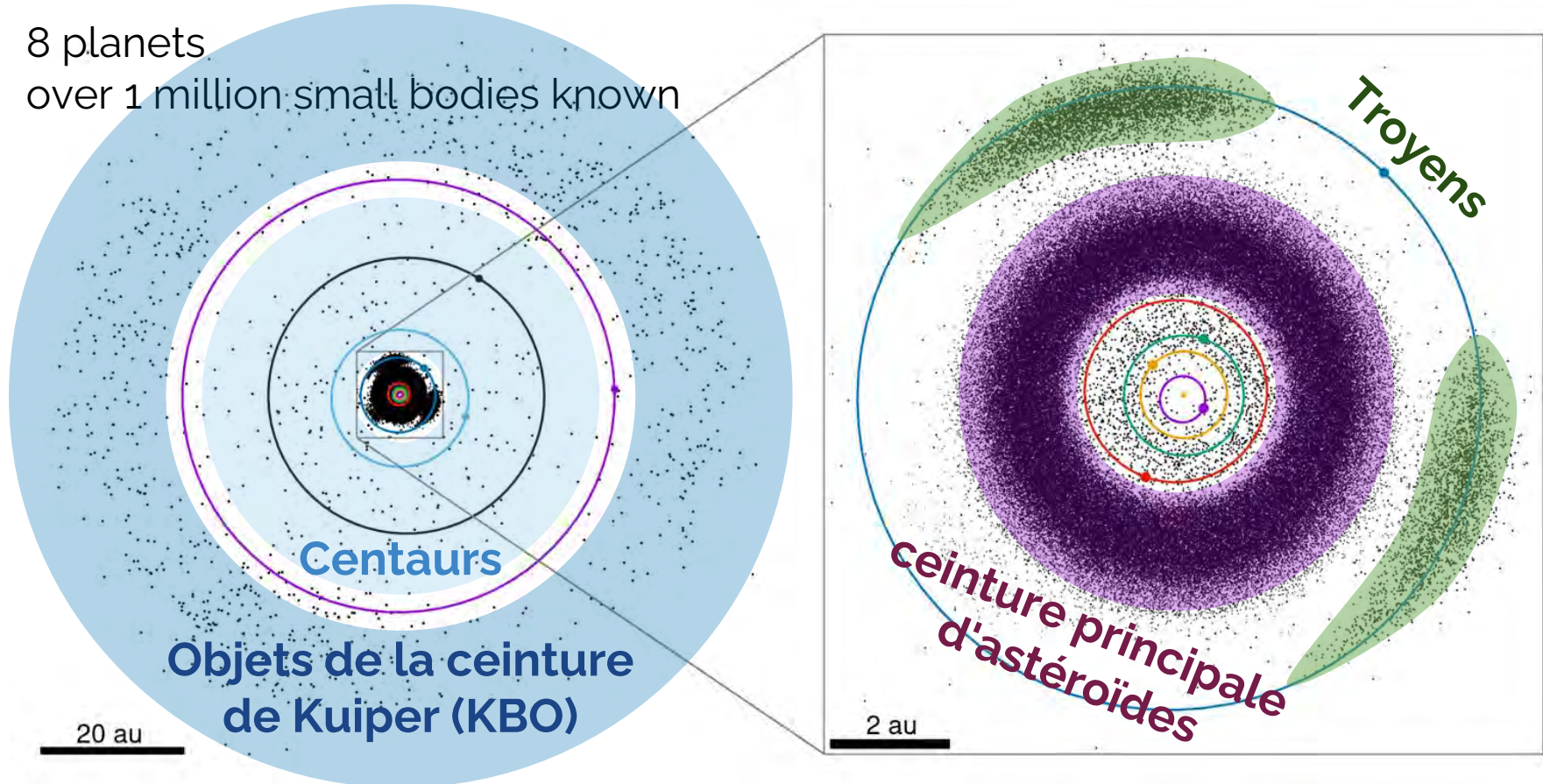
raphael.marschall@oca.eu
www.spaceMarschall.net
[@spaceMarschall](#)

Collège de France
November 6, 2024



Notre système solaire

8 planets
over 1 million small bodies known

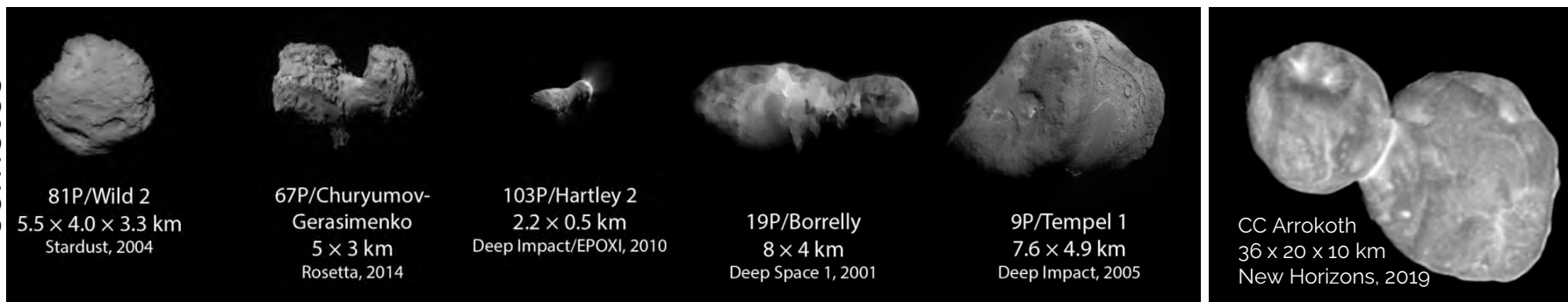


Les vestiges de la formation des planètes

astéroïdes



comètes



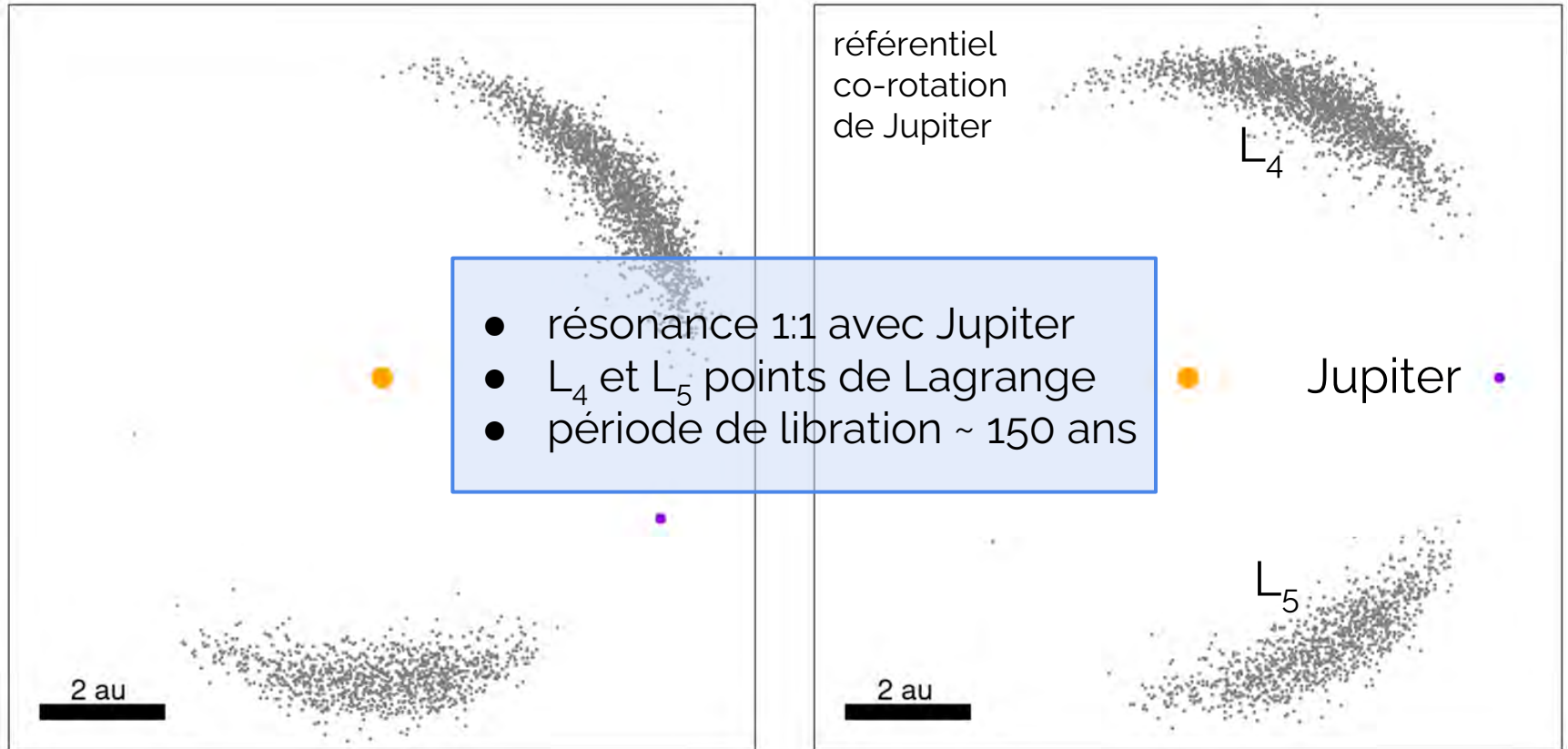
KBO

Plan de la présentation

1. Que savons-nous des Troyens ?
2. La mission Lucy
 - a. ses cibles et les questions auxquelles elle répondra
 - b. une trajectoire extraordinaire
 - c. premiers résultats - le système Dinkinesh

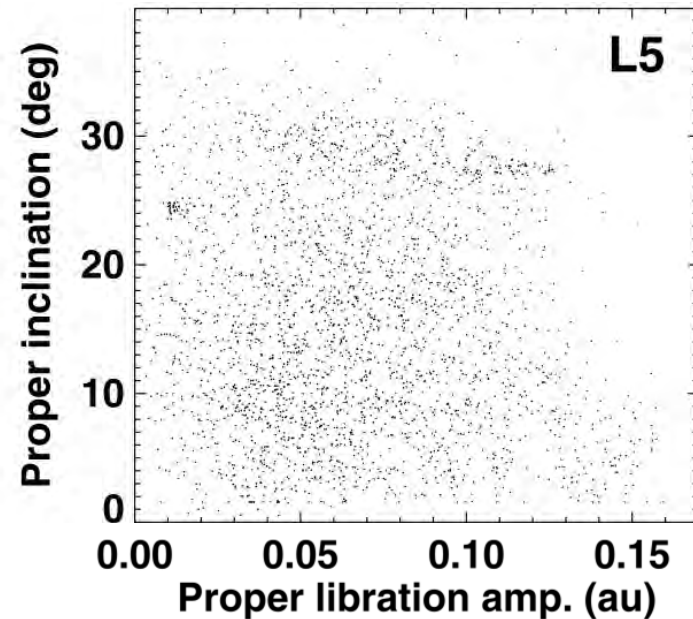
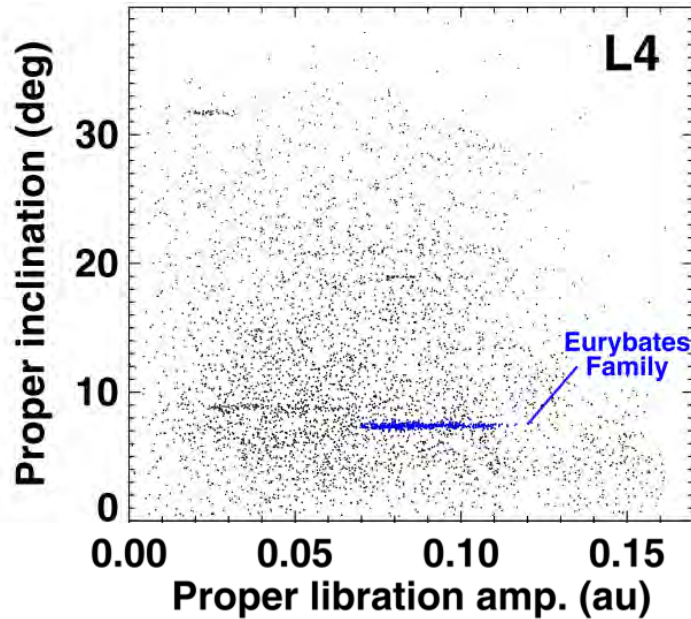
Que savons-nous des
Troyens ?

Les orbites



Les orbites

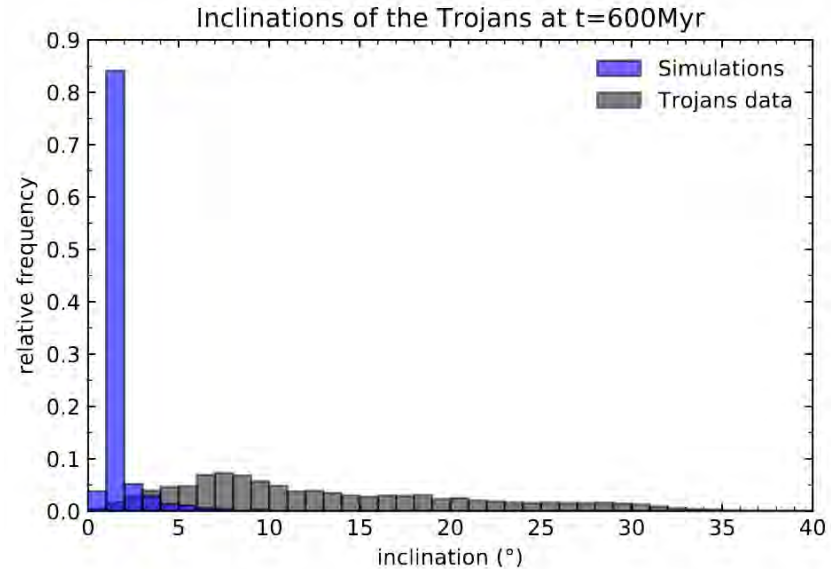
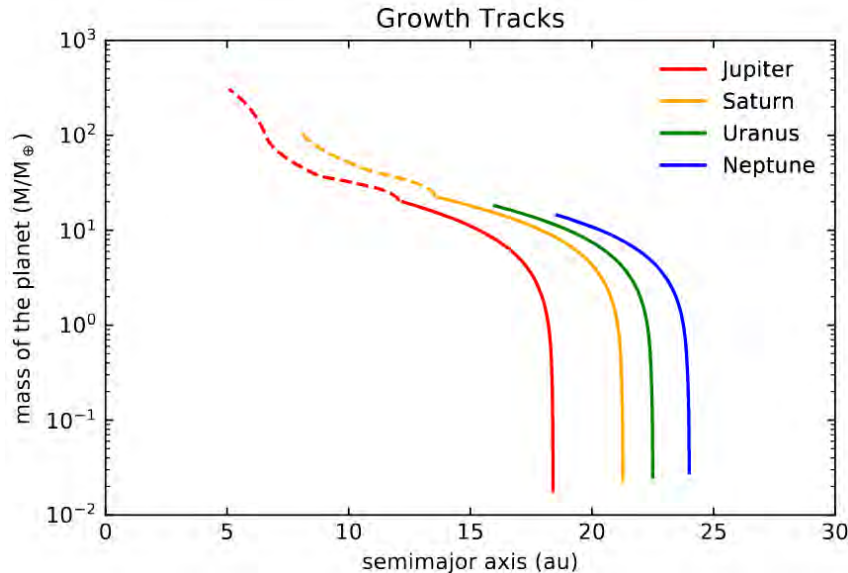
- Familles collisionnelles dans L_4 mais pas dans L_5
- Inclinaisons considérables



Bottke, Marschall, Nesvorný, Vokrouhlický 2023

Les orbites - inclinaisons

- Inclinaisons considérables (jusqu'à 30 degrés)
 - a) Impossible à expliquer s'ils avaient été capturés in-situ dans la phase du disque (amortissement des inclinaisons)
 - b) De même pour la capture pendant la migration de Jupiter dans le disque.

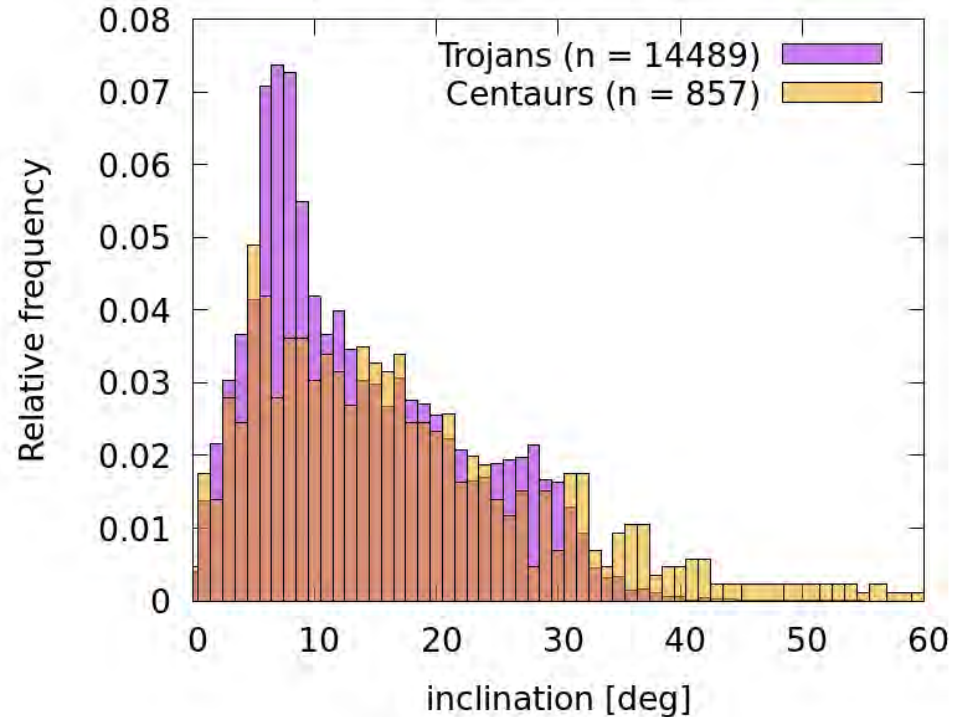


Pirani et al 2019

Les orbites - inclinaisons

Qu'est-ce qui pourrait expliquer les grandes inclinaisons ?

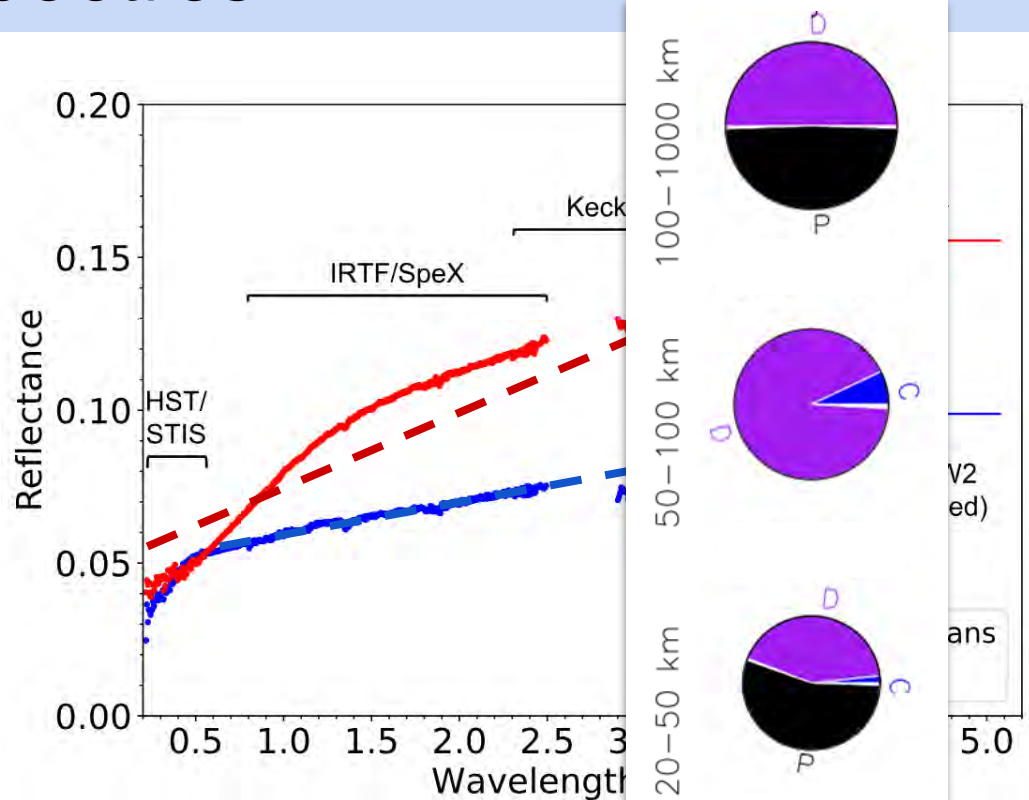
- Des grands embryons planétaires (~Pluton) auraient pu exciter les les inclinaisons des Troyens → comment éliminer ces embryons?
- Similitude entre les inclinaisons des Troyens et des Centaures
 - a) Les Centaures sont une population transitoire provenant de la ceinture de Kuiper.
→lien génétique entre la ceinture de Kuiper et les Troyens?



Un mécanisme produisant ce lien sera discuté la semaine prochaine et dans le cours 8.

Composition - les spectres

- Les spectres nous donnent des informations sur la composition
- Les troyens ont des spectres sans bandes caractéristiques
- Deux populations/types spectraux avec des pentes différentes
 - a) Types D, P, et quelques C

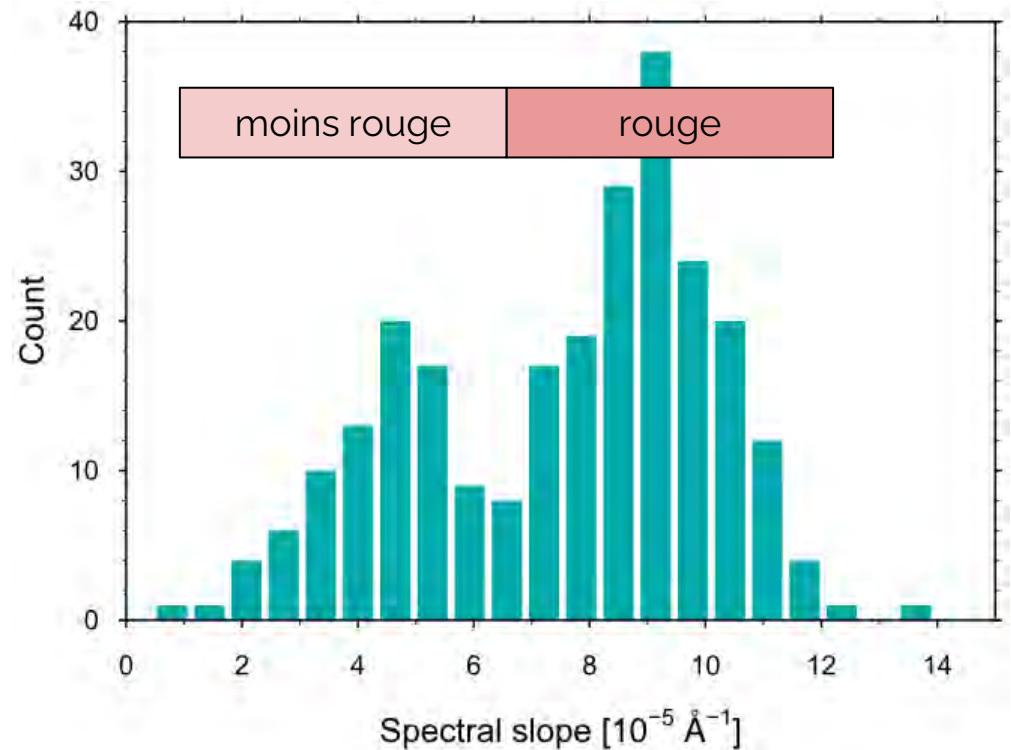


Emery et al. 2024; Emery et al. 2016;
Brown 2016; Wong et al. 2019

DeMeo & Carry 2014

Composition - les couleurs

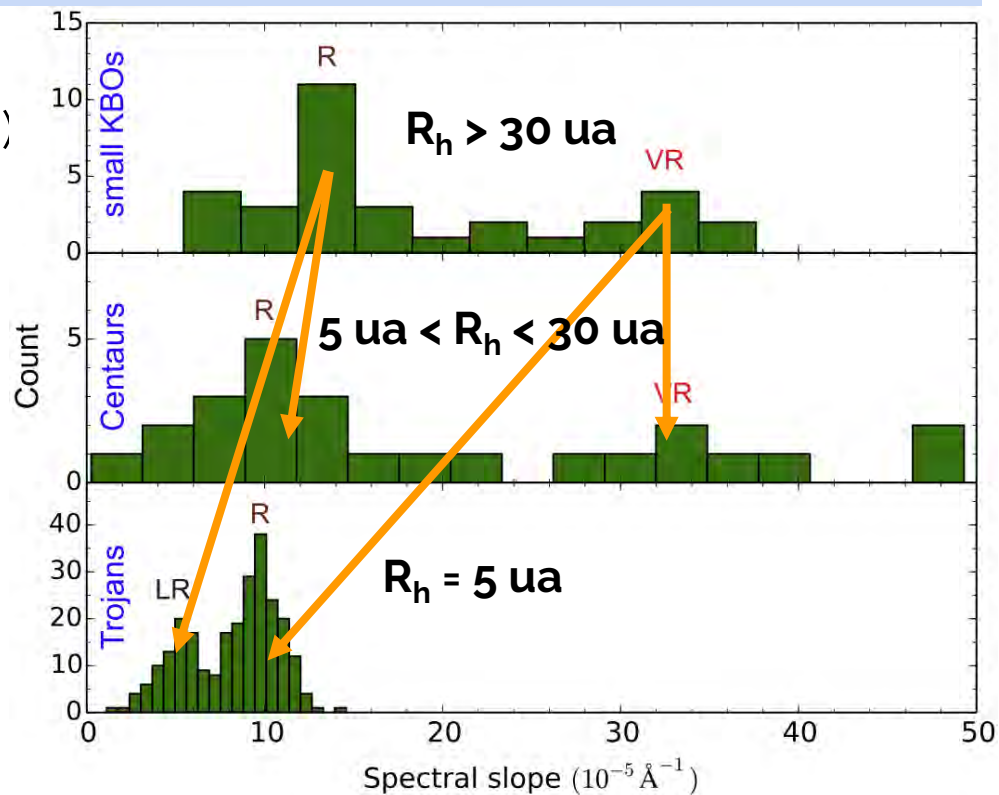
- 2 populations
 - a) moins rouge (less red)
 - b) rouge (red)
- Quelle est l'origine de cette variation de couleur?



Mottola et al. 2024 adapted from Wong, Brown, & Emery 2014

Comparaison avec les couleurs des TNOs

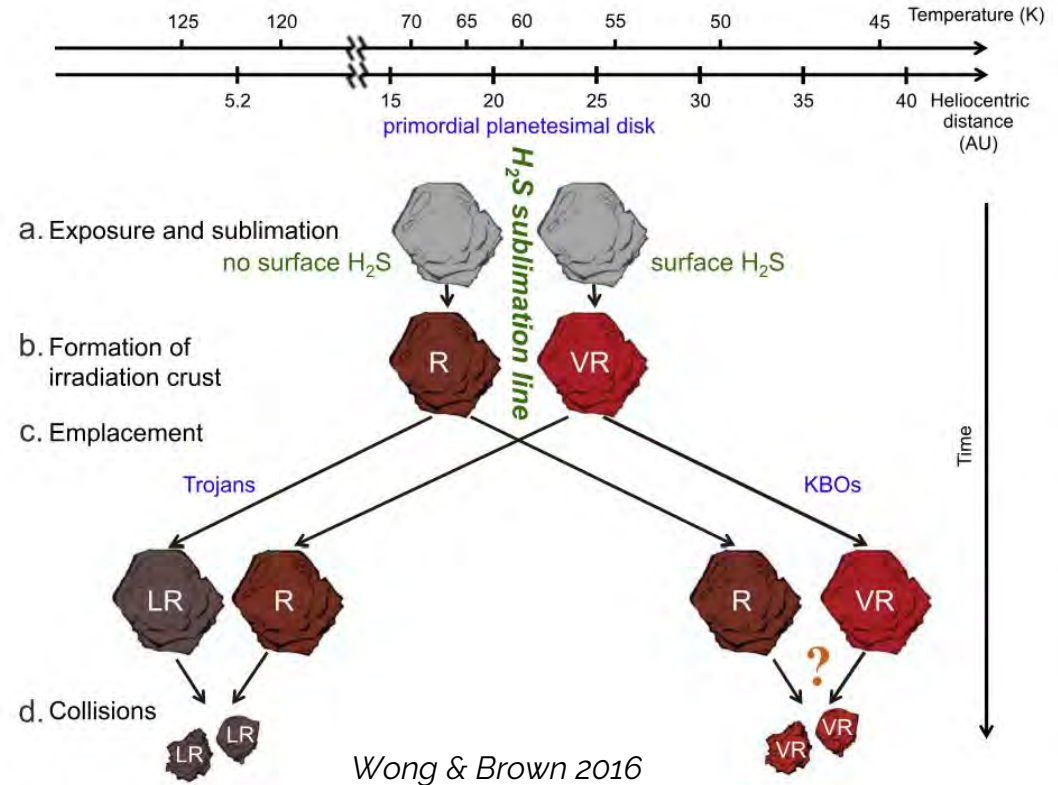
- 3 populations
 - a) moins rouge (less red/LR)
 - b) rouge (red/R)
 - c) très rouge (very red, VR)



Wong & Brown 2016

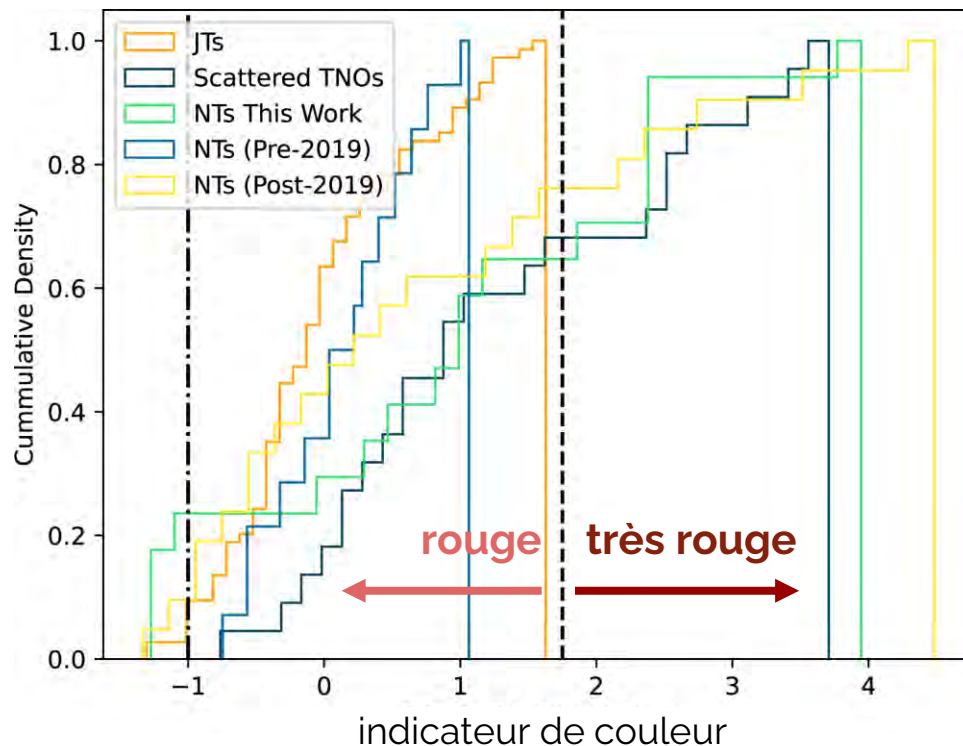
Composition - les couleurs

- Une évolution dictée par la distance héliocentrique (irradiation)?
- Evolution supplémentaire par collisions.



Les couleurs des Troyens de Neptune

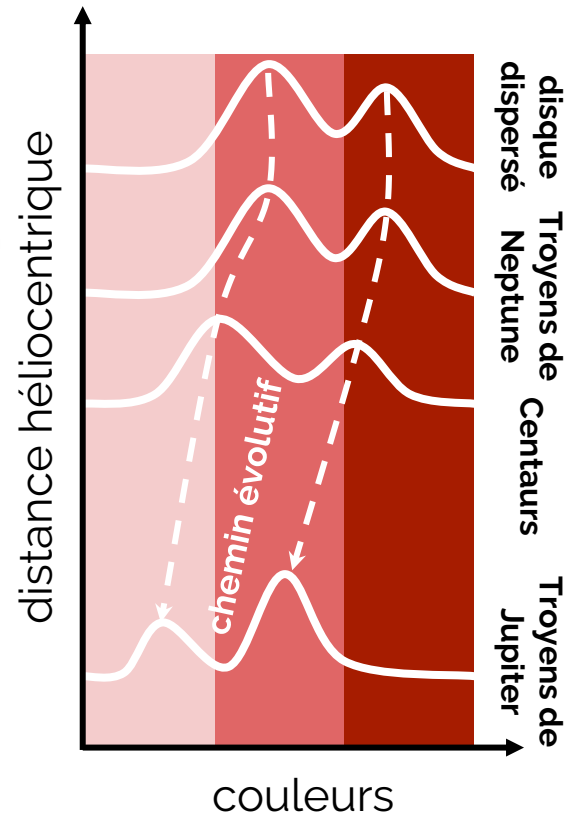
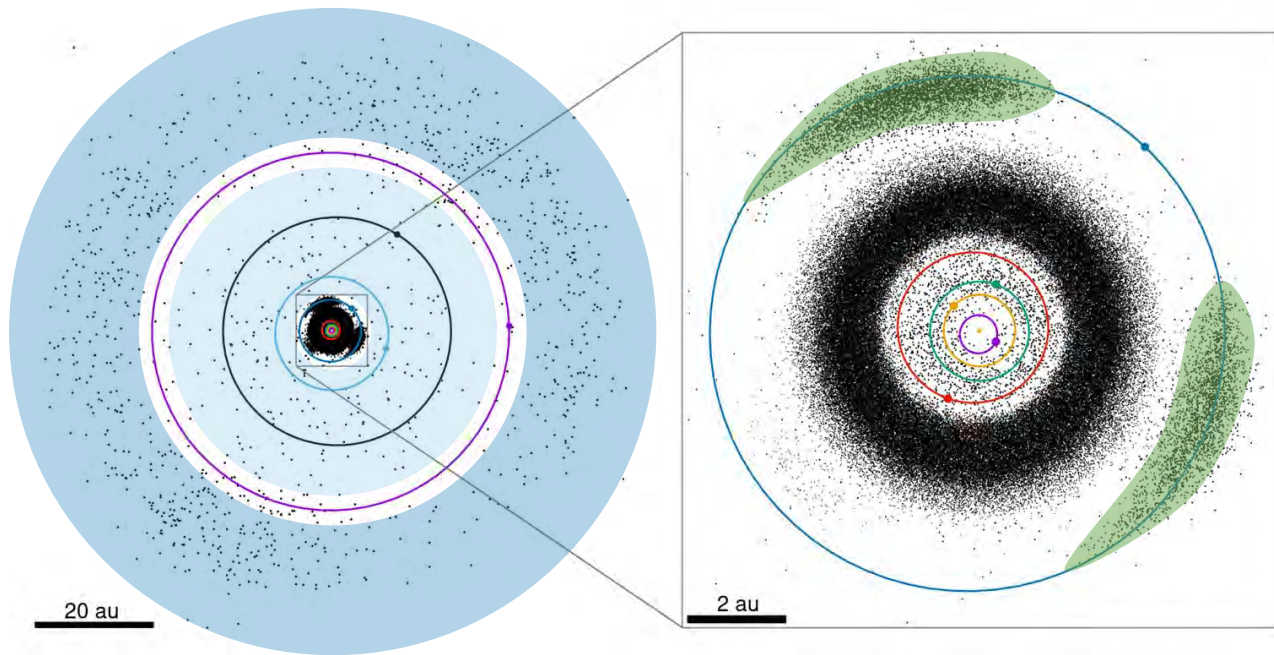
Un lien génétique entre tous les petits corps du système solaire externe ?



Markwardt et al. 2023

Composition - les couleurs

Un lien génétique entre tous les petits corps du système solaire externe ?



Albédo

La fraction relative de la lumière qui est réfléchiée par un objet.

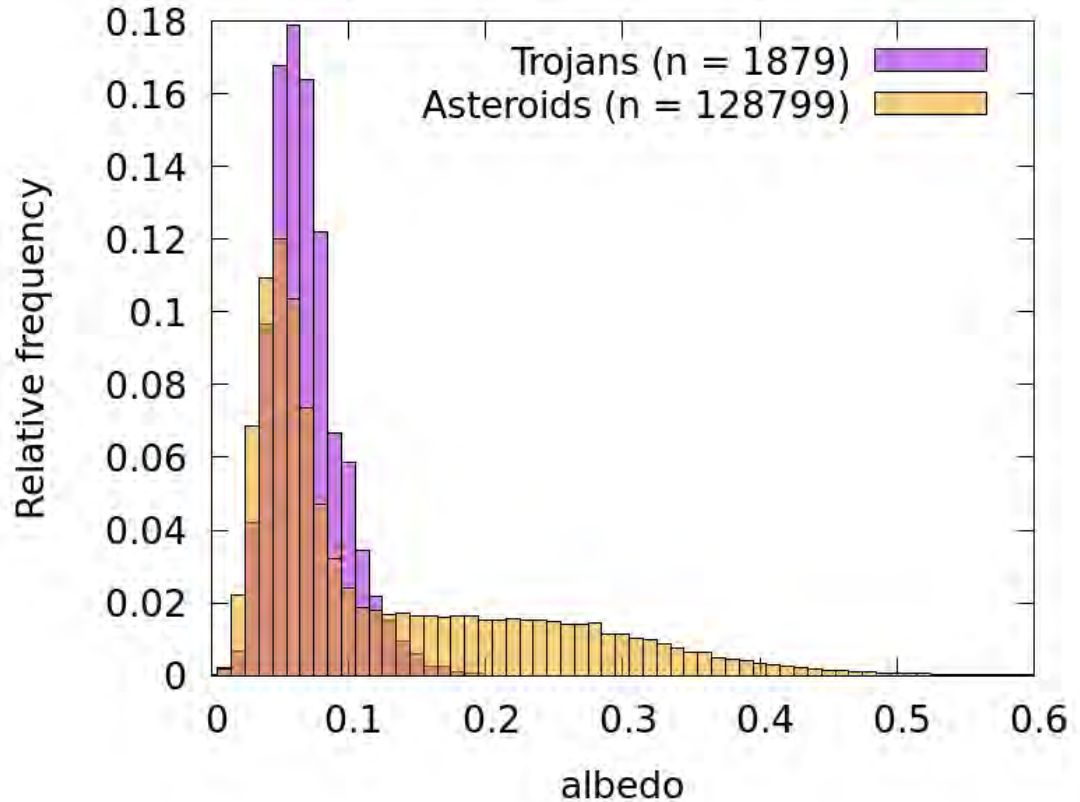
1 = toute la lumière est réfléchiée

0 = aucune lumière n'est réfléchiée

Troyens: 3-12% (moyenne 7%)

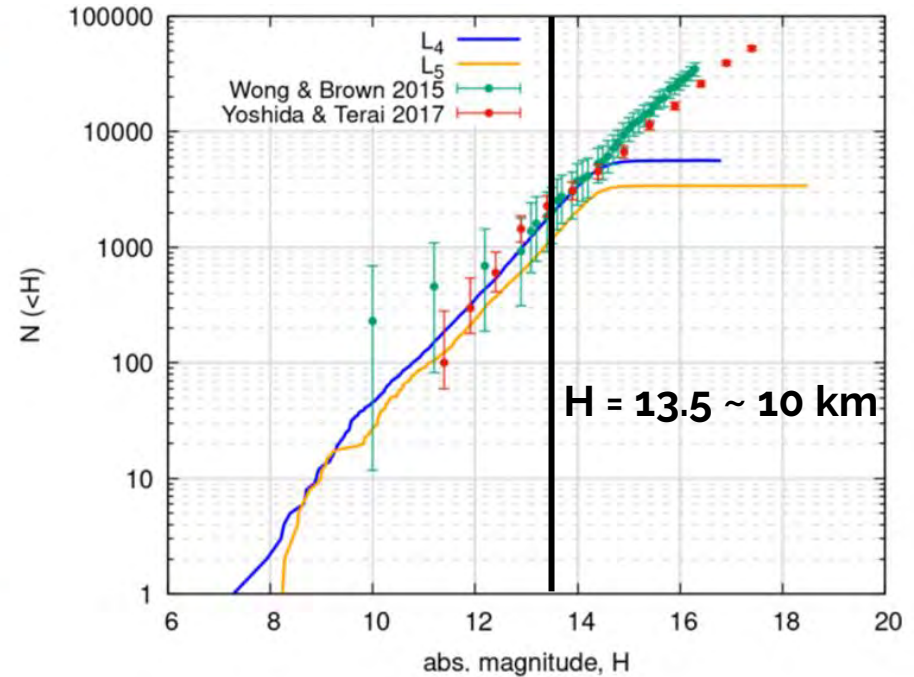
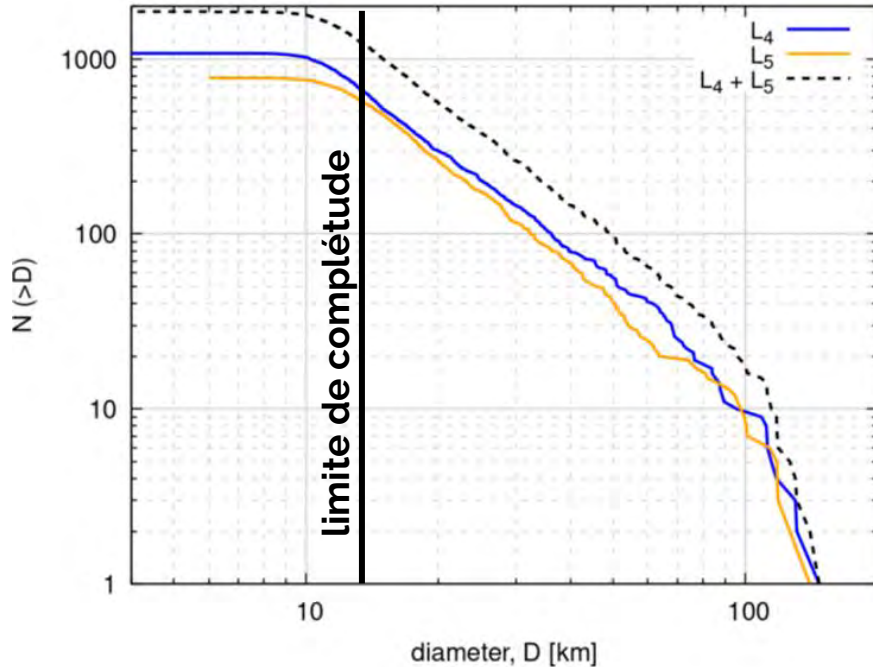
Similaire aux TNO mais avec peu de statistiques

Différents des astéroïdes



Distribution des tailles des Troyens

Pente raide > 100 km ; en dessous de 100 km, pente de -2 ; asymétrie L4-L5

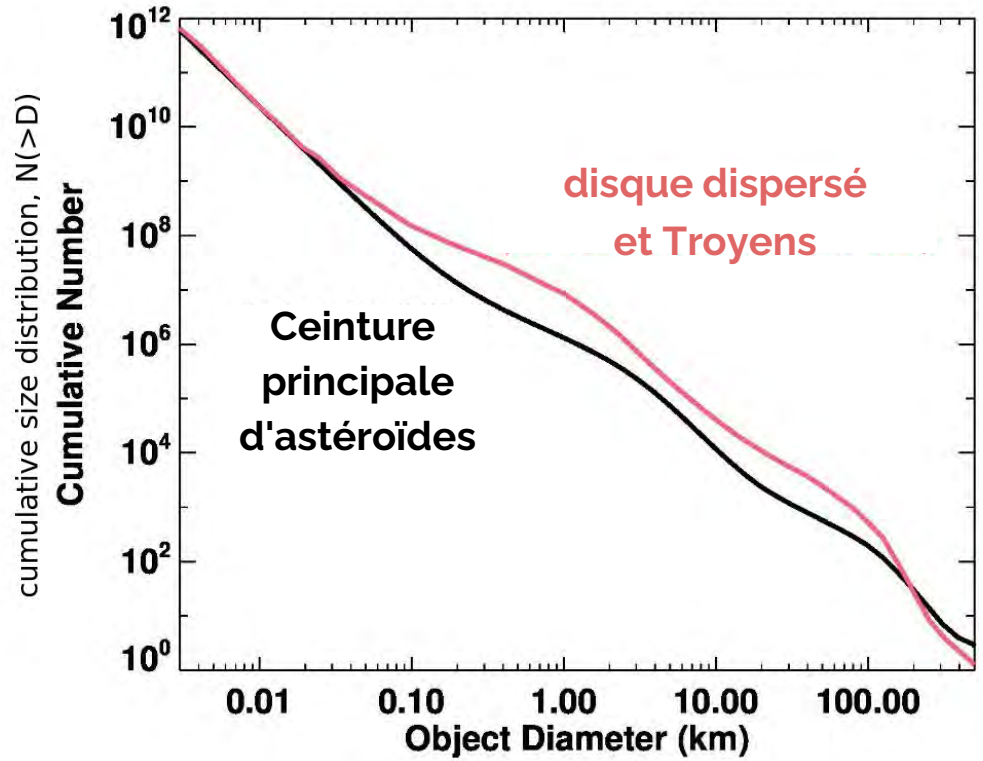


Marschall et al. 2022

Distribution des tailles des Troyens

Les modèles permettant d'expliquer la distribution des tailles des Troyens et du disque dispersé montrent des distributions très similaires.

Les couleurs et la distribution des tailles laissent envisager un lien génétique entre tous les petits corps du système solaire externe.



Adapted from Bottke, Vokrouhlický, Marschall et al. 2023

La mission Lucy et les premiers résultats

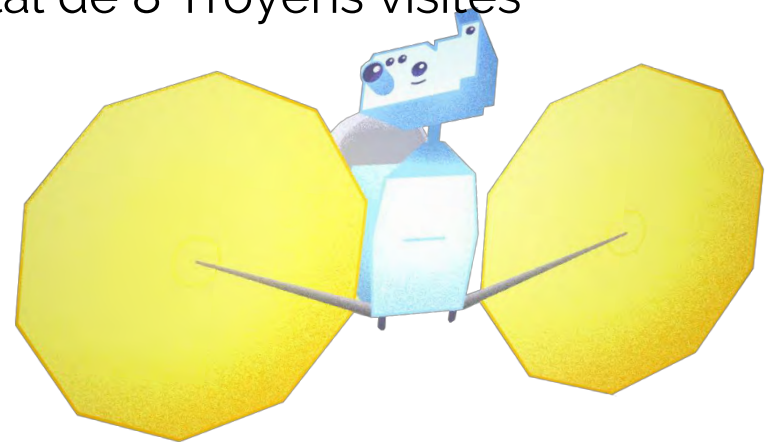
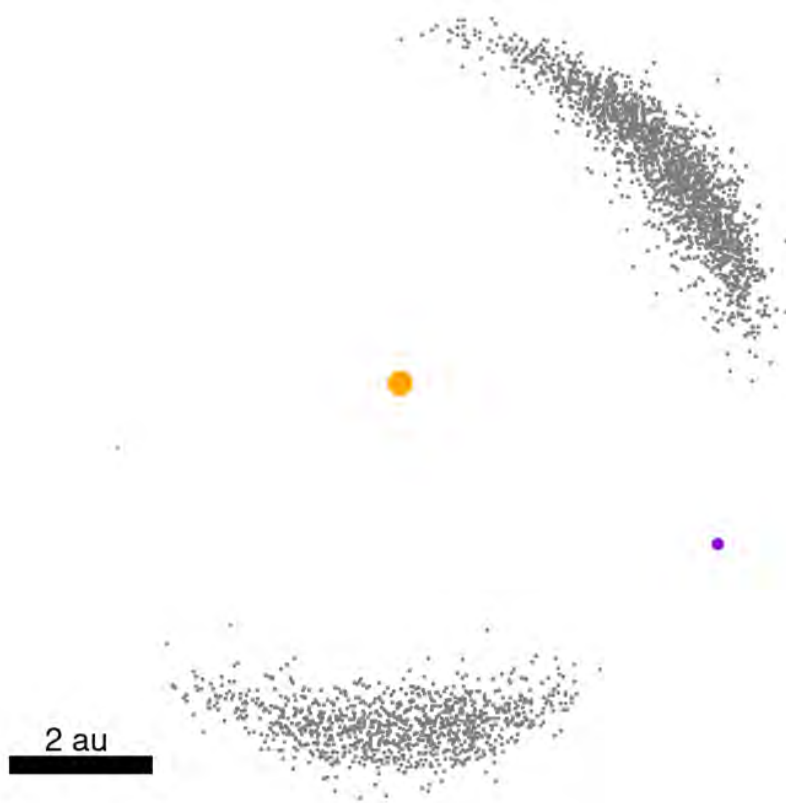


La mission en bref



Lucy est une mission vers les Troyens

- Lancée Oct 16, 2021 @ 5:34a ET
- 2 astéroïdes test: 2023 & 2025
- 5 rencontres avec les Troyens entre 2027-2033
 - Total de 8 Troyens visités





Lucy dans le contexte de la ceinture principale d'astéroïdes

Dans l'histoire de l'exploration robotique, 9 MBA ont été étudiés

→ Cela a révolutionné notre vision de cette population

Lucy étudiera presque autant de Troyens (8), le tout dans le cadre d'une mission Discovery de la NASA.



Motivation scientifique



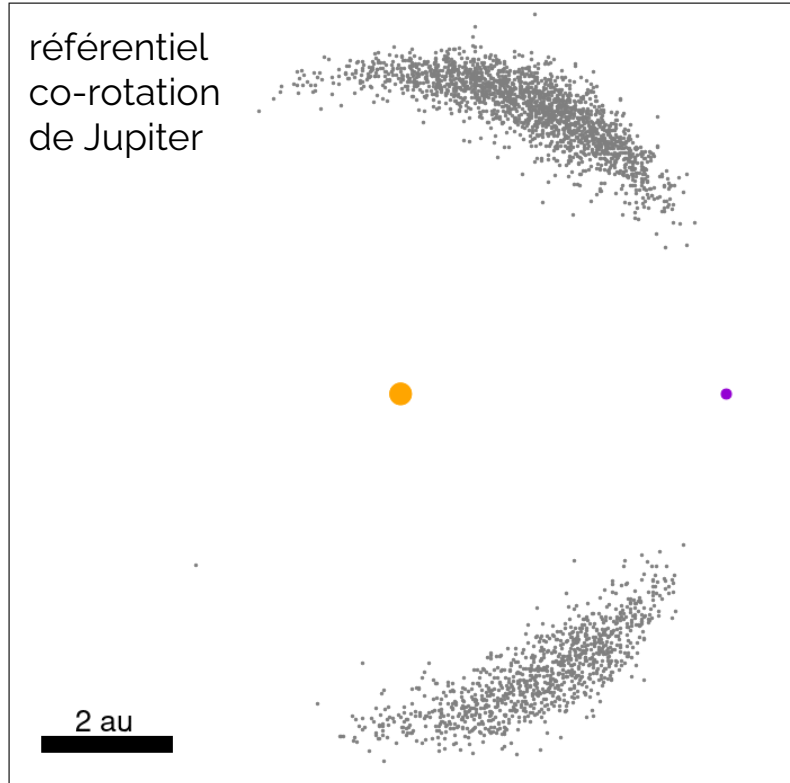
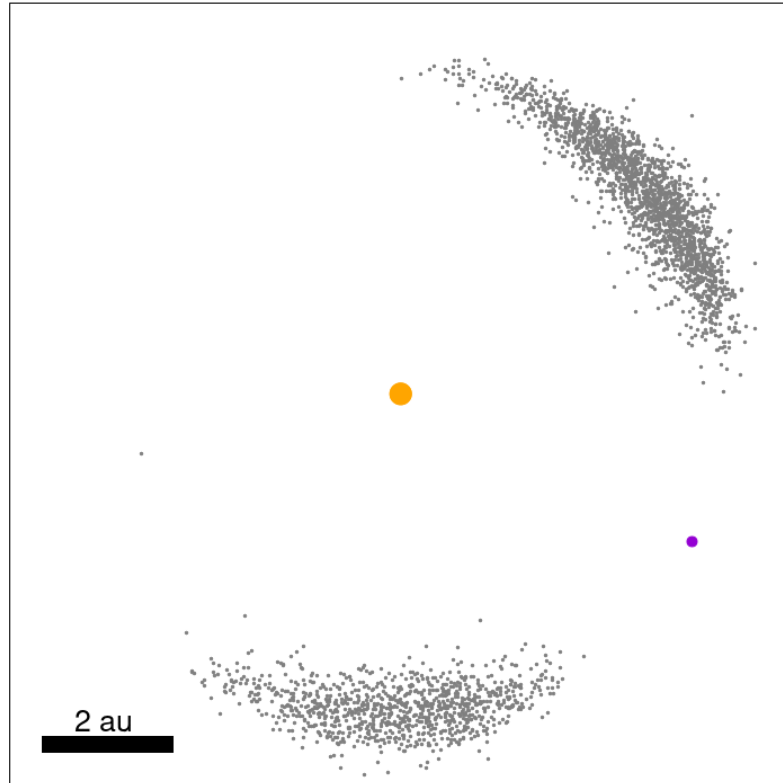
- Nous n'avons jamais vu un Troyen de près
 - Nous avons vu au moins un objet de toutes les autres populations de petits corps.
- Mais il ne s'agit pas d'une population homogène
 - Contient des types spectraux de type C, D et P

Cette diversité est le résultat de l'accrétion et de l'évolution dynamique des planètes externes. Les Troyens nous offrent donc une opportunité unique de contraindre les modèles de formation et d'évolution des planètes. Ce n'est qu'en échantillonnant leur diversité que l'on peut réaliser leur véritable potentiel scientifique.

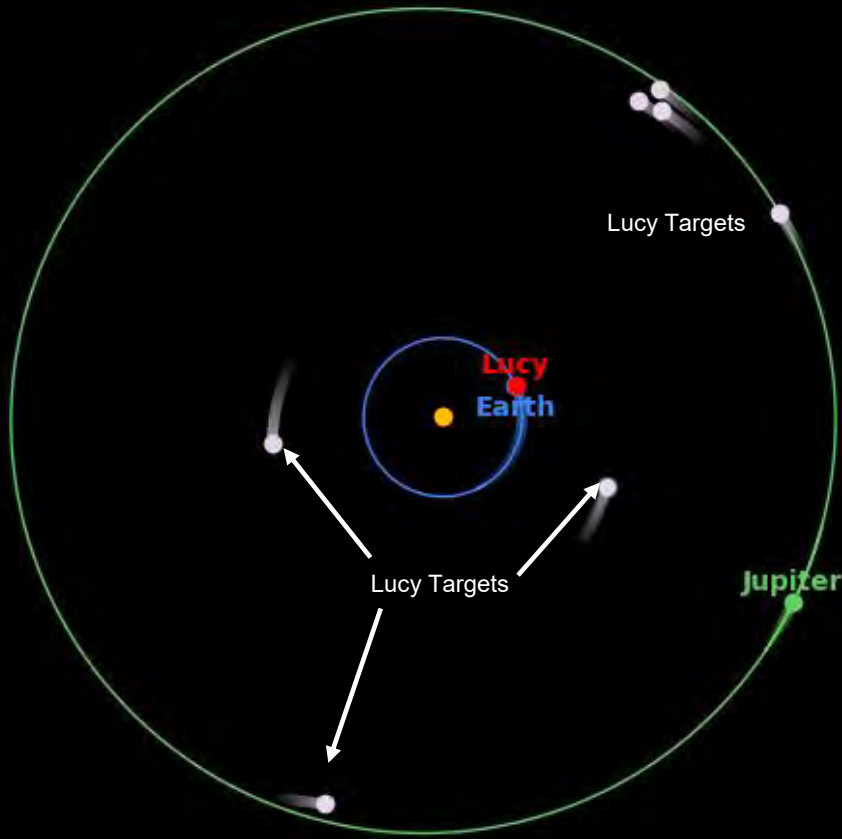
Une trajectoire extraordinaire



2021-10-28



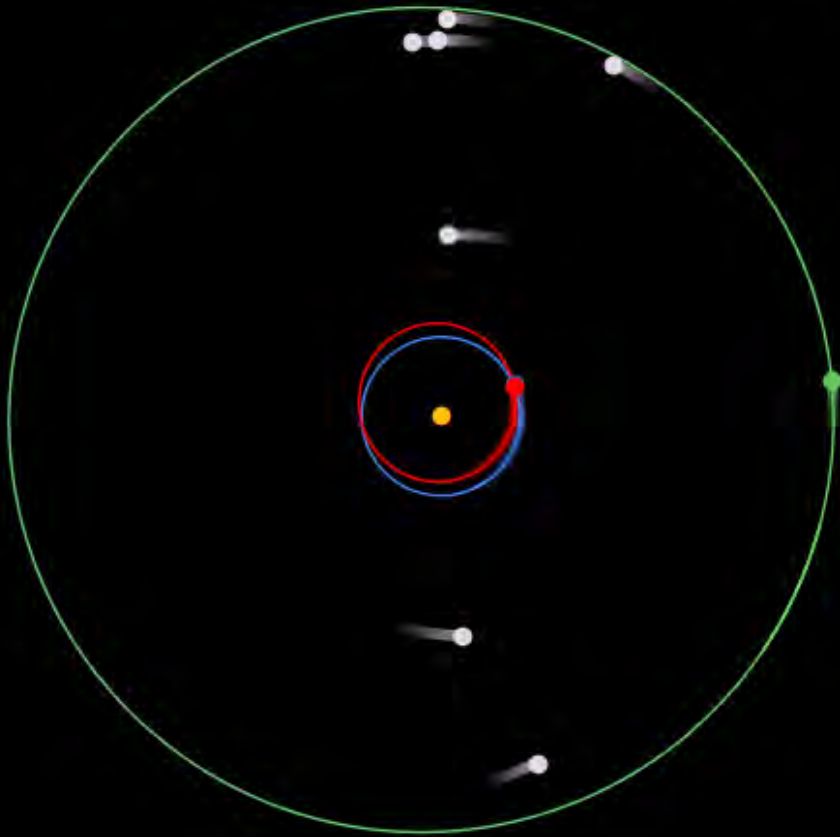
2021 OCT 17



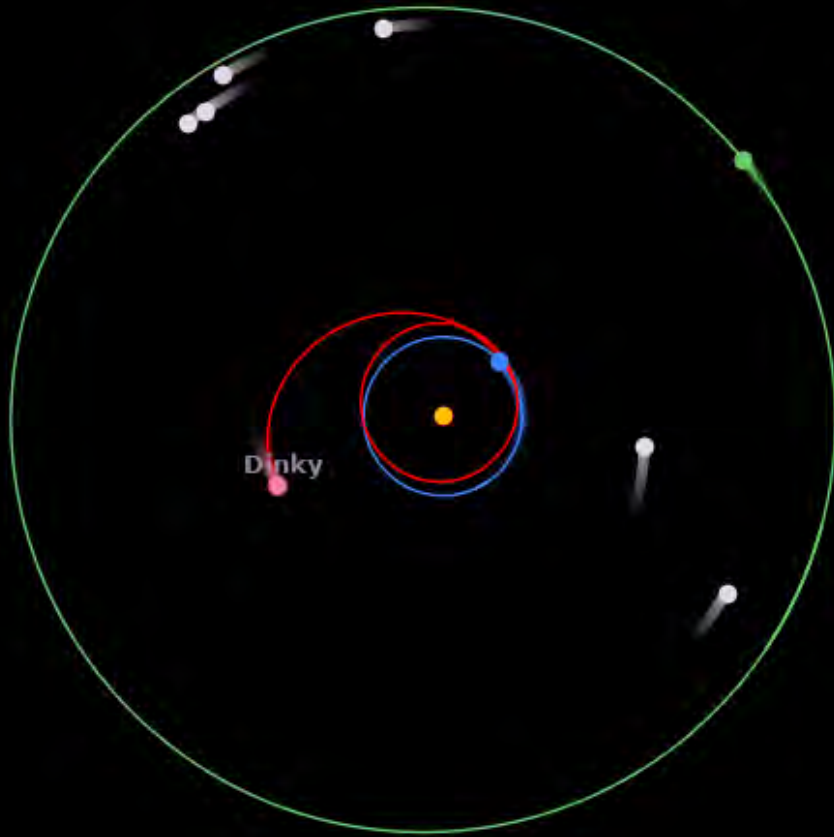
2021 OCT 17



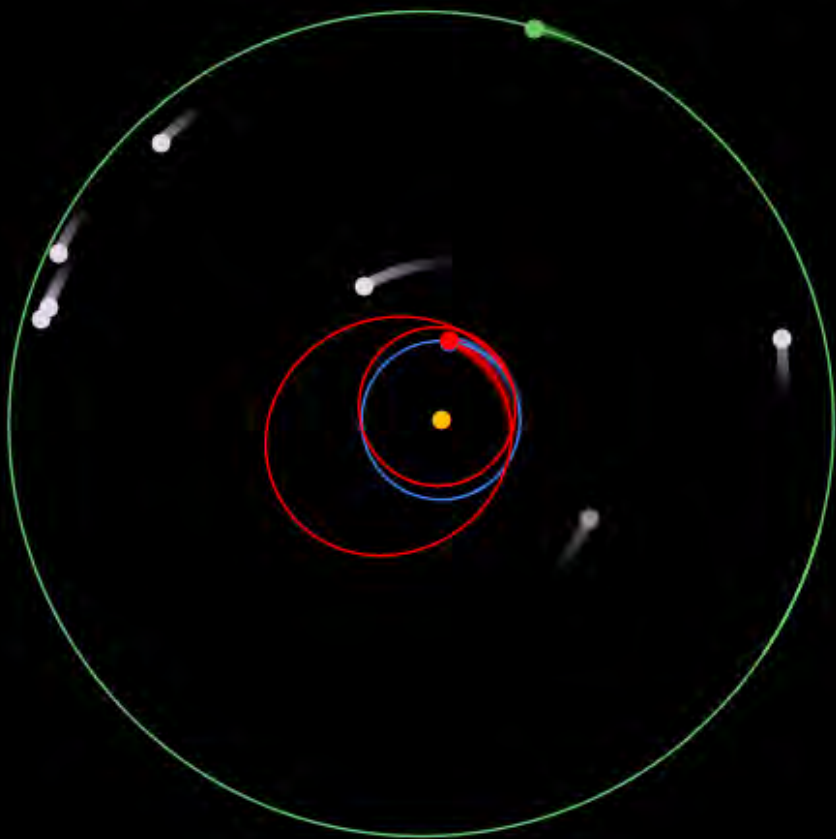
2022 OCT 16



2023 NOV 06



2024 DEC 15



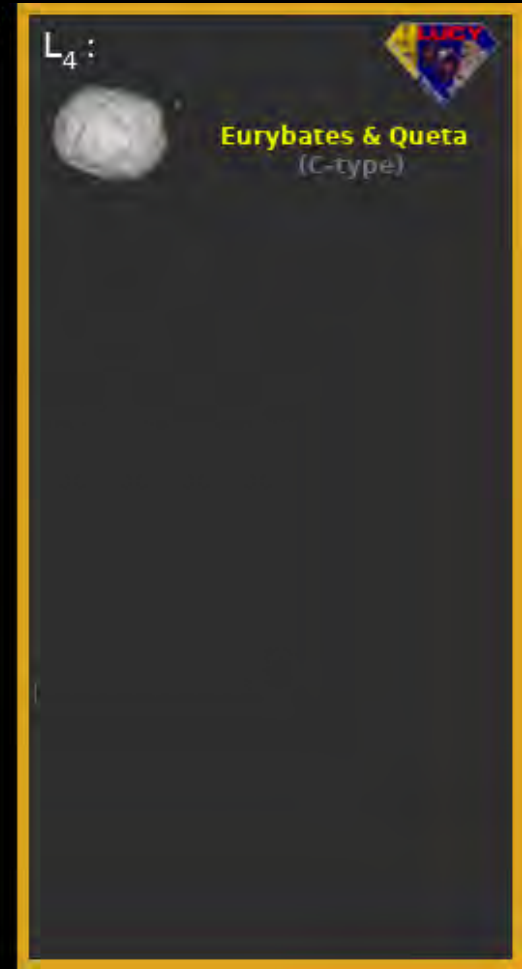
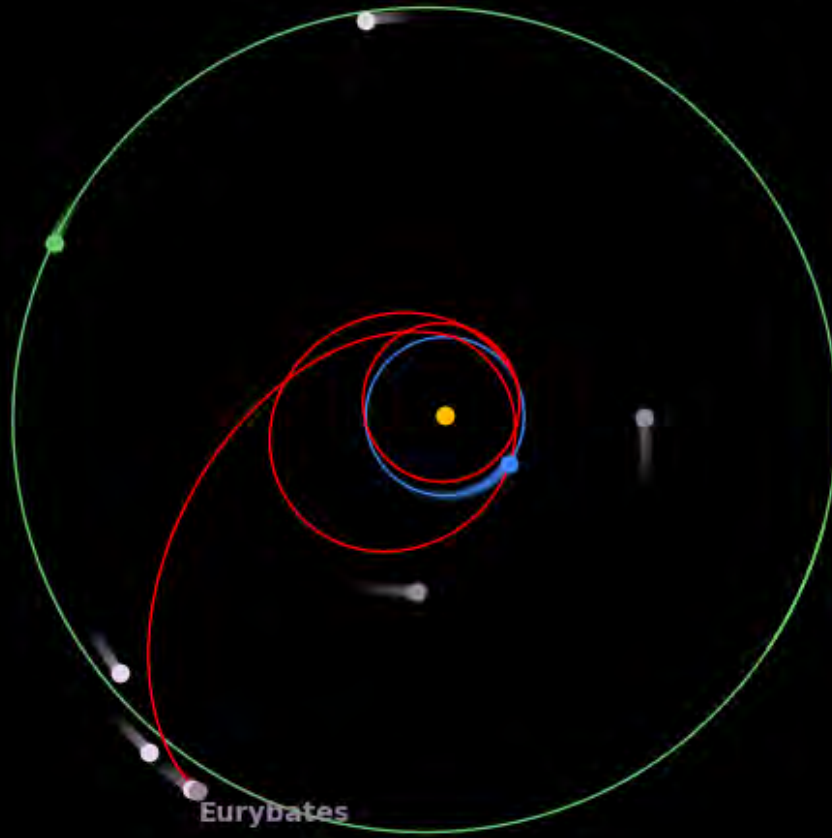
Artist Conception of Lucy Targets

2025 APR 22



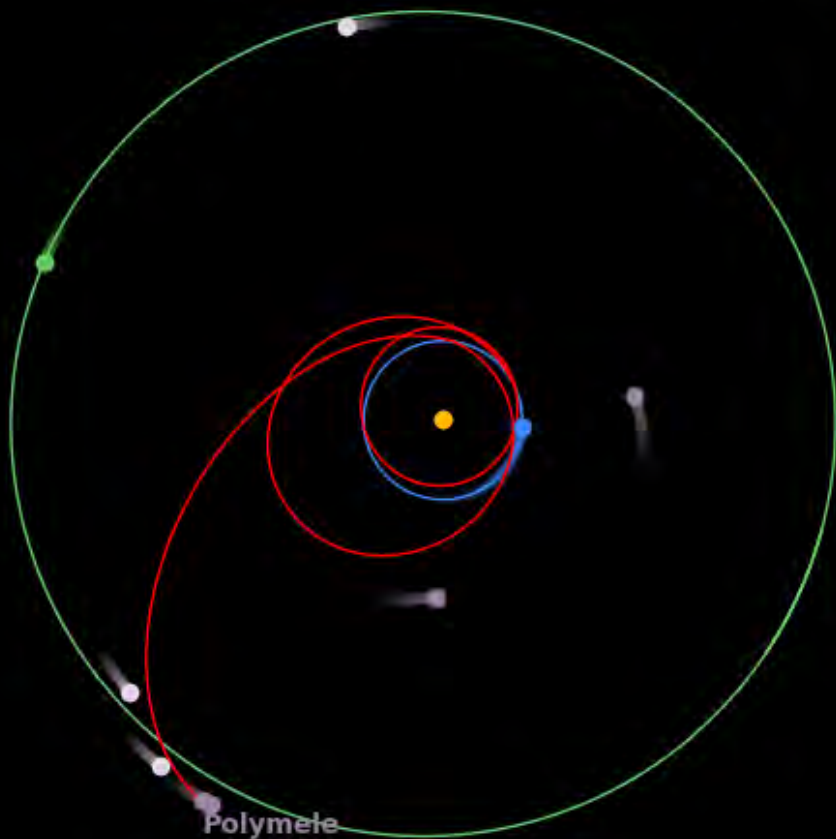
Artist Conception of Lucy Targets

2027 AUG 16




Artist Conception of Lucy Targets

2027 SEP 17



L_4 :



Eurybates & Queta
(C-type)


Polymele & 'Shaun'
(D-type)




Artist Conception of Lucy Targets

2028 APR 22



L_4 :



-  **Eurybates & Queta**
(C-type)
-  **Polymele & 'Shaun'**
(P-type)
-  **Leucus** (D-type)

Artist Conception of Lucy Targets

2028 NOV 13



L₄:



Eurybates & Queta
(C-type)



Polymele & 'Shaun'
(P-type)



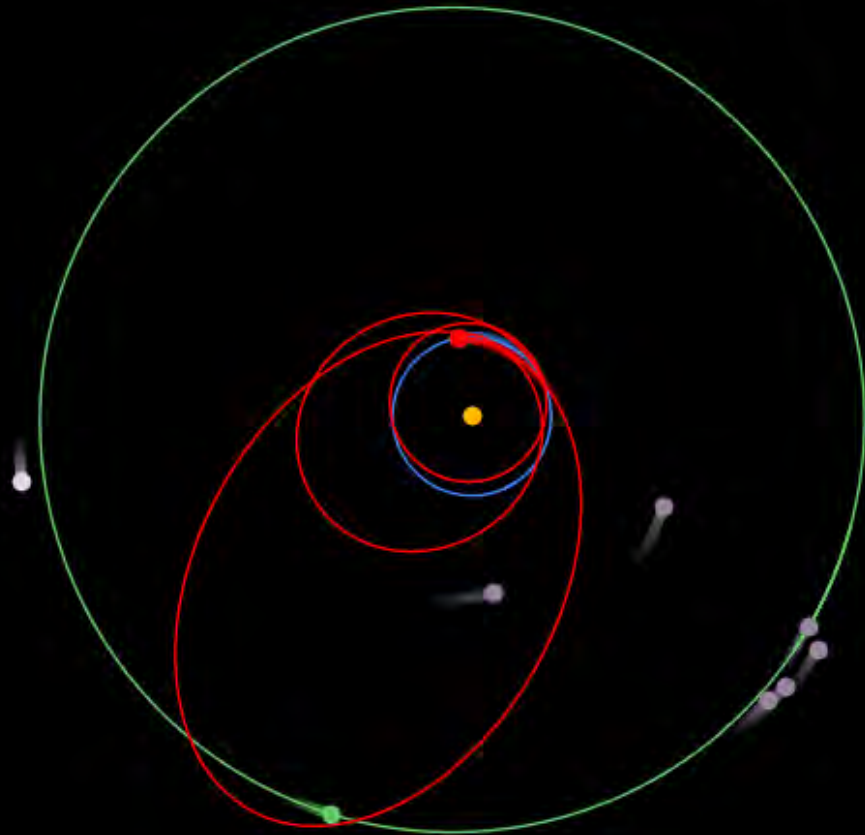
Leucus (D-type)



Orus (D-type)

Artist Conception of Lucy Targets

2030 DEC 31



L₄:



Eurybates & Queta
(C-type)



Polymele & 'Shaun'
(P-type)



Leucus (D-type)



Orus (D-type)

Artist Conception of Lucy Targets

2033 MAR 06



Patroclus/Menoetius

L₄ :



Eurybates & Queta
(C-type)



Polymele & 'Shaun'
(P-type)



Leucus (D-type)



Orus (D-type)

L₅ :



Patroclus/Menoetius
binary
(P-type)



Artist Conception of Lucy Targets

Plus d'informations sur Eurybates



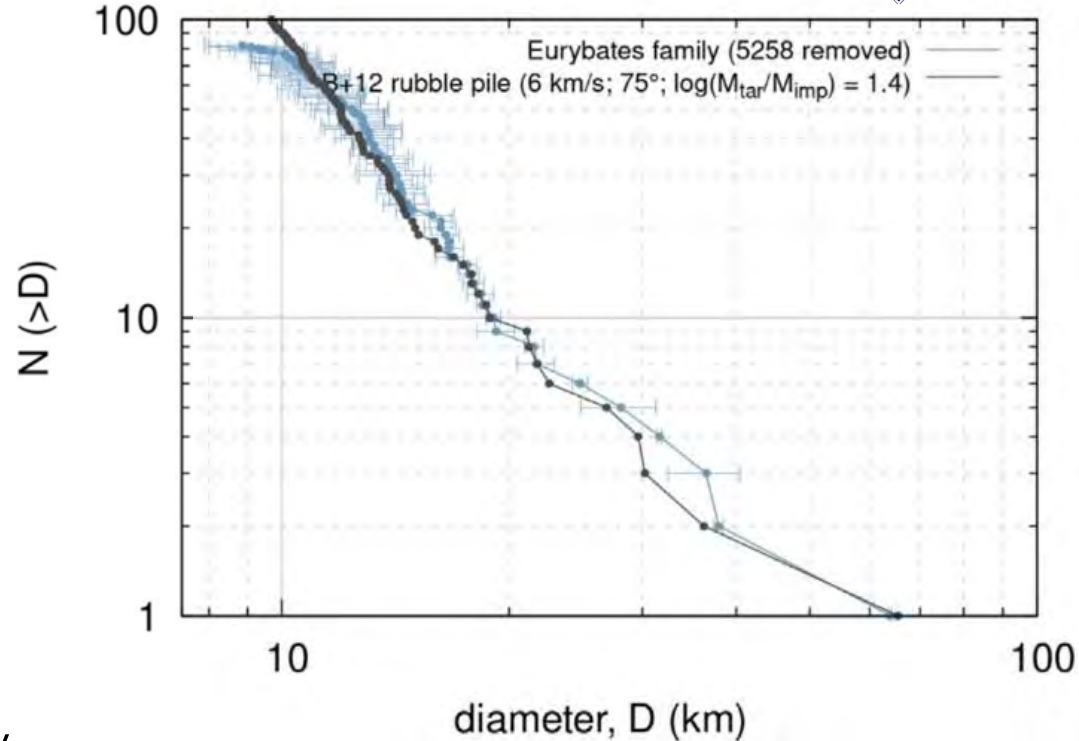
$D \sim 65$ km

Le plus grand membre de la famille collisionnelle d'Eurybates.

Le Troyen d'origine était $D \sim 100$ km et a été impacté par un Troyen de 35 km à une vitesse de 6.5 km/s.

Collision il y a 1 - 3.7 Gyr.

Troyen le plus jeune de Lucy



Marschall et al. 2022

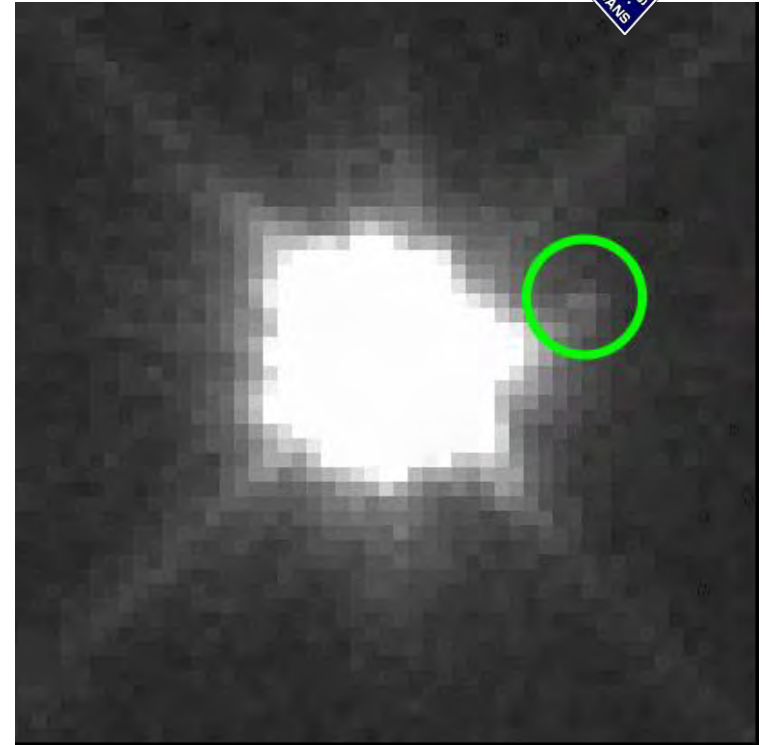
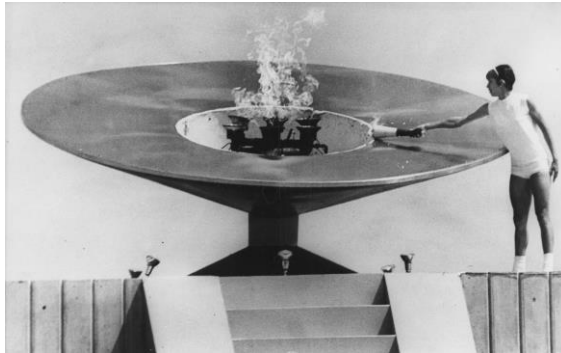
Plus d'informations sur Eurybates



En 2020, un satellite a été découvert dans les données de Hubble et nommé Queta.

Queta:

- Diamètre: 1.2 ± 0.4 km
- Demi-grand axe: 2350 ± 11 km
- Probablement formé lors de la collision qui a donné naissance à la famille d'Eurybates



Brown et al. 2021

Plus d'informations sur Polymele

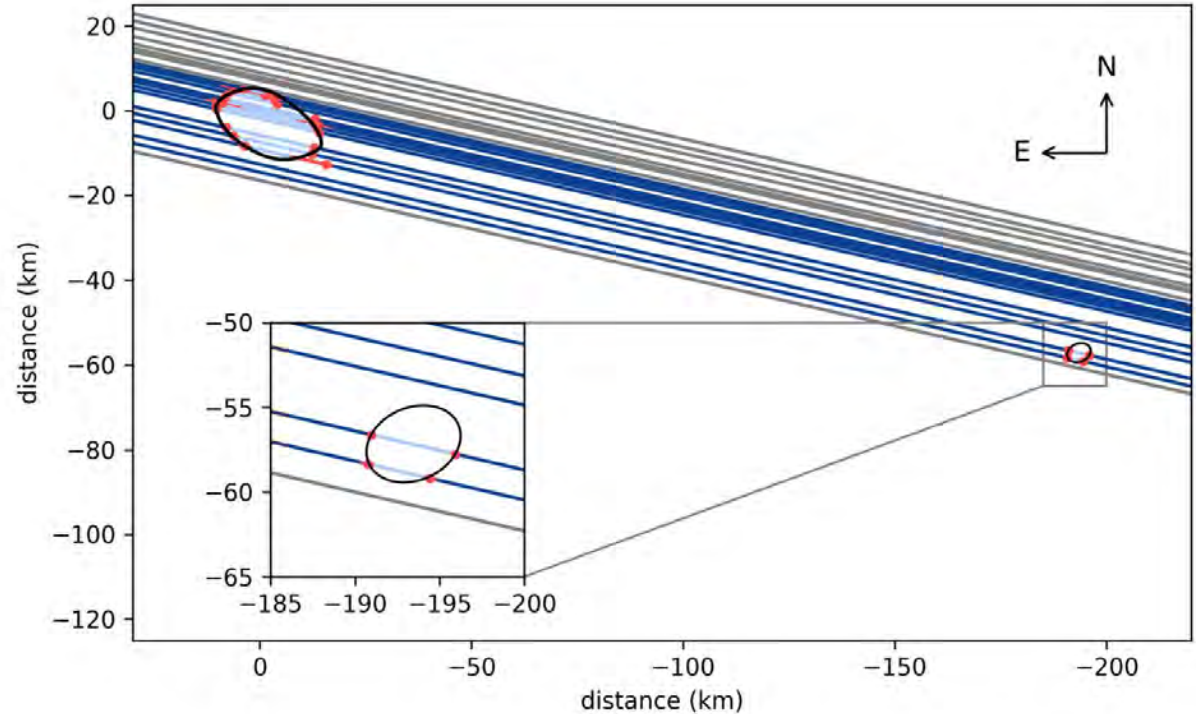


Dimensions: 27.0 × 24.4 × 10.4 km

En 2022, un satellite
a été détecté par une
occultation.

Pas encore de nom
définitif.

Provisoirement
« Shaun ».



Plus d'informations sur Leucus



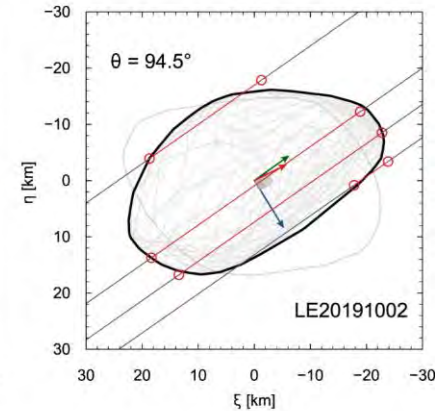
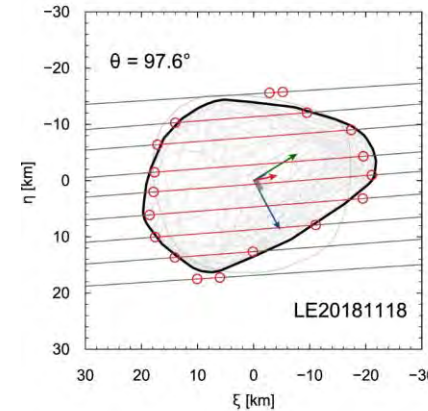
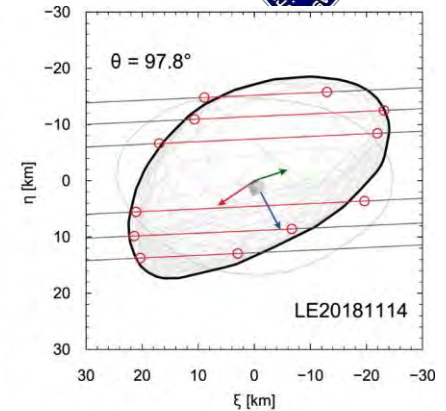
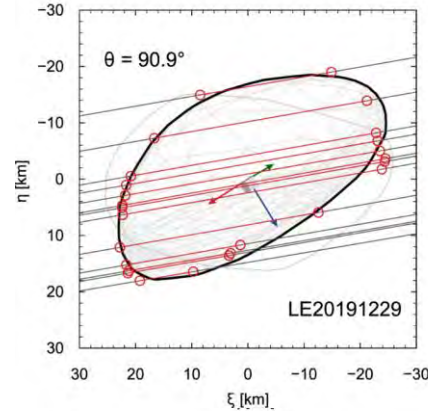
Dimensions:

60.8 × 39.2 × 27.8 km

Période de rotation:

445.683 ± 0.007 h

Les occultations et les courbes de lumière suggèrent un objet extrêmement asphérique avec de grands cratères.



Mottola et al. 2020

Plus d'informations sur Patroclus & Menoetius



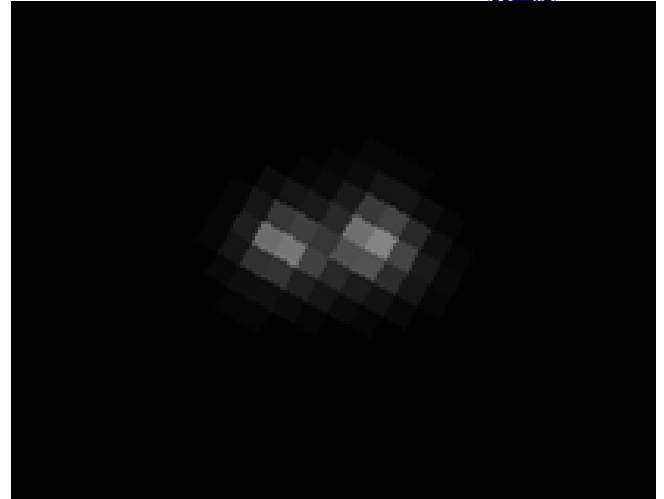
Deux objets de ~110 km en orbite l'un autour de l'autre

Probablement une binaire primordiale intacte.

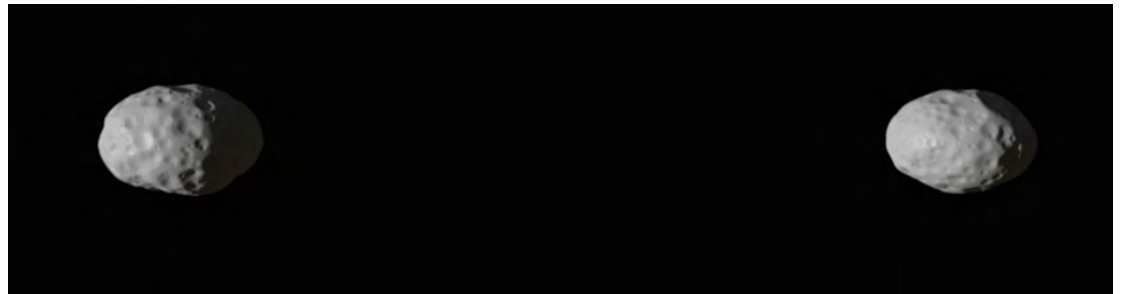
(Nesvorný et al. 2018)

Peut-être un très grand cratère sur Menoetius.

(Pinilla-Alonso et al. 2022)



Hubble Space Telescope/Keith S. Noll 2017



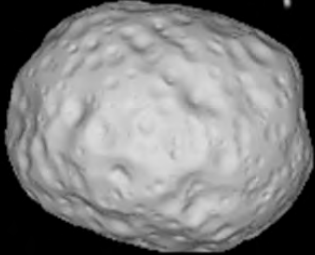
Les riches cibles des Troyens de Lucy



MBA Rehearsals:

Eurybates + Queta

C-type
Aug. 2027



Polymele + 'Shaun'

P-type
Sept. 2027



Dinkinesh

Nov. 2023

Donald Johanson

Apr. 2025

Leucus

D-type
Apr. 2028



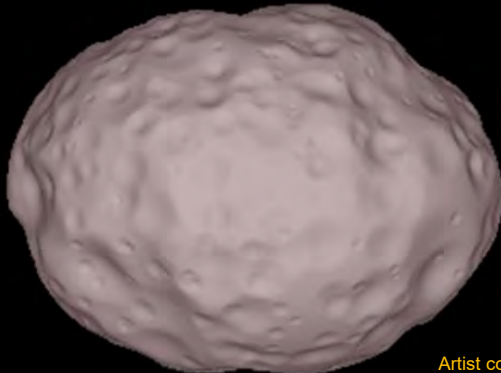
Orus

D-type
Nov. 2028



Patroclus

Binary & P-type



Menoetius

Binary & P-type



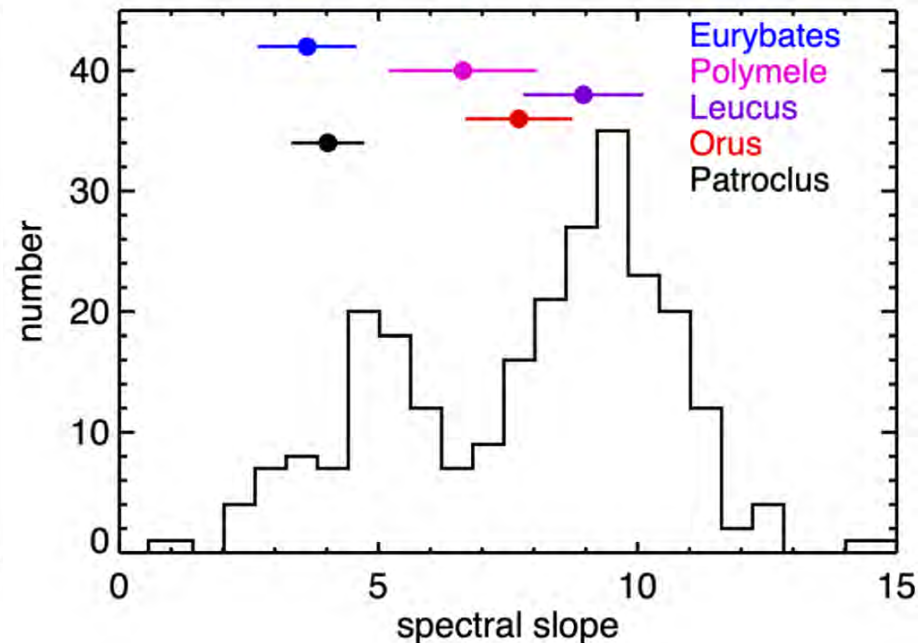
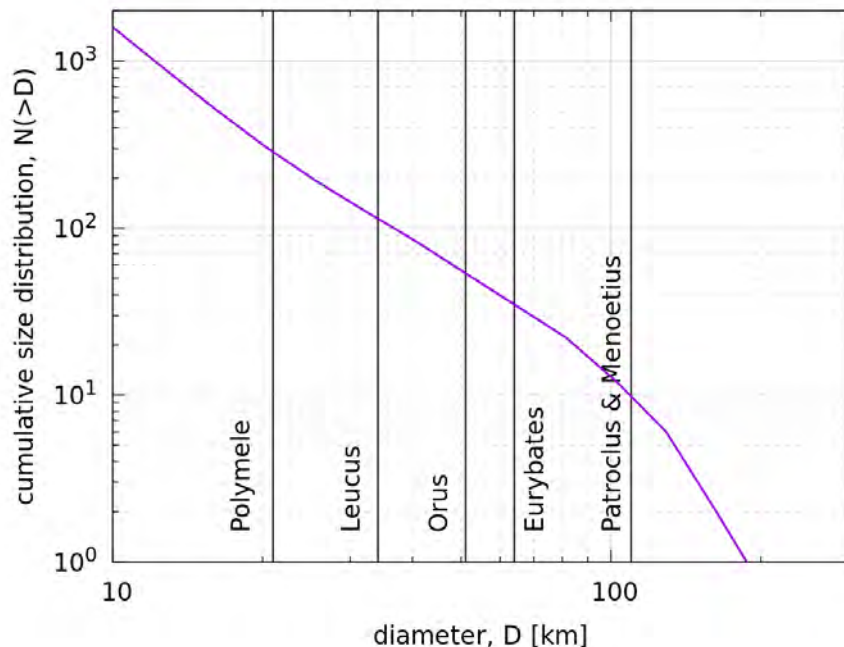
Mar. 2033

- Tous les types spectraux connus
- Les essaims L4 et L5
- Vestige de collisions
- Binaire de masses presque égales (primordiale ?)
- Sphéroïde plat et oblat
- Large échantillon de tailles

Sélection de la diversité des Troyens



Différentes tailles, couleurs et types spectraux



Adapted from Marschall et al. 2022

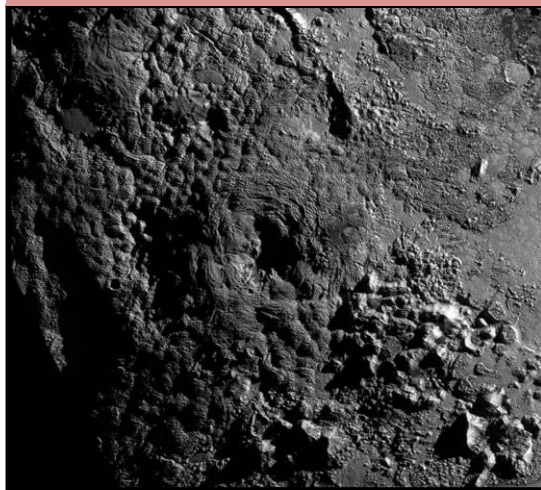
Levison et al. 2021

Les observations de Lucy

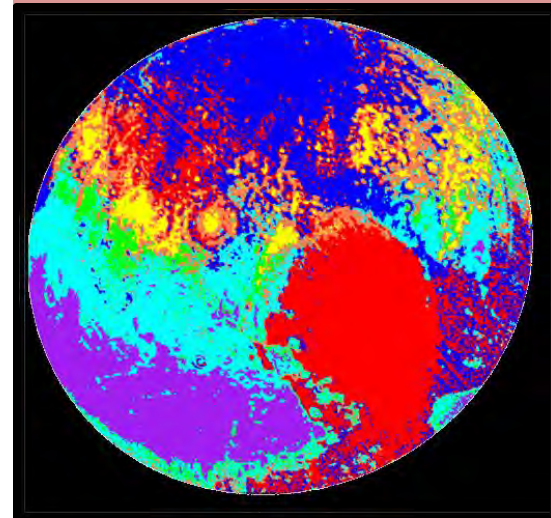


Les instruments de télédétection de Lucy fourniront des informations sur les éléments suivants:

Géologie de surface



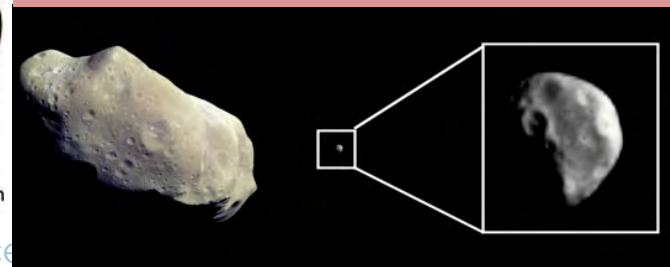
Couleur et composition de la surface



Intérieur



Satellites et anneaux



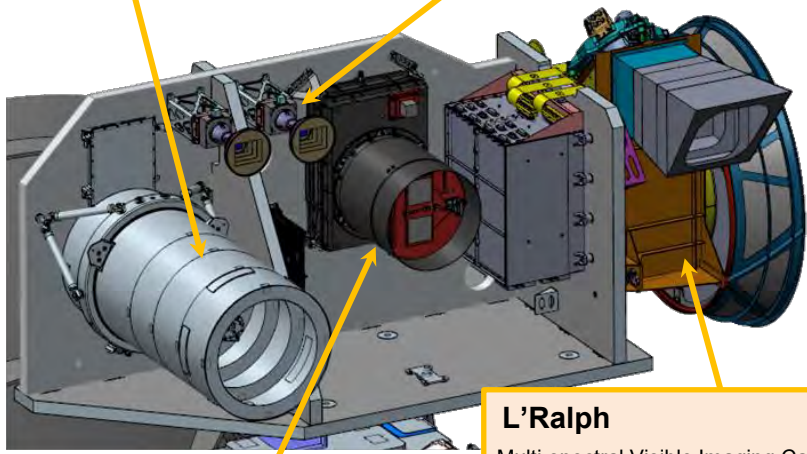
Instruments et vaisseau spatial



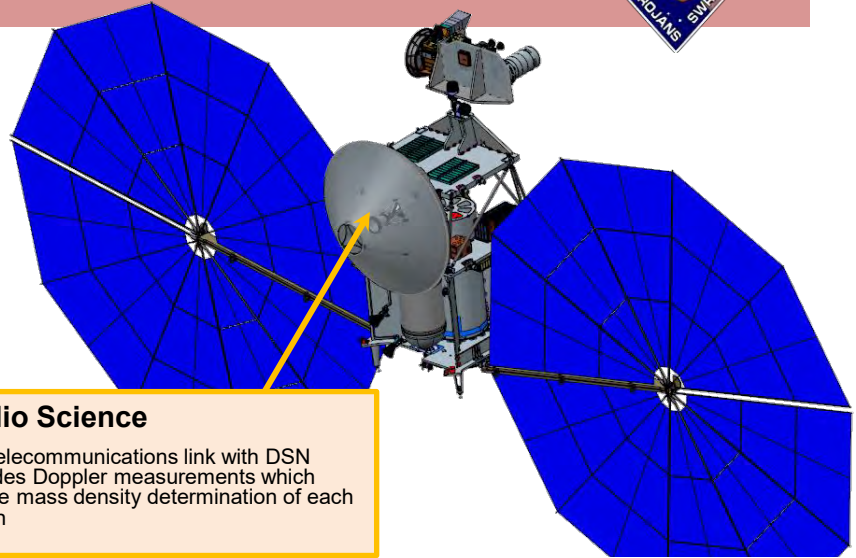
L'LORRI
L'ong Range Reconnaissance Imager (LORRI)
High spatial resolution visible imager
Supplier: APL



TTCam
Terminal Tracking Camera (TTCam)
Visible imager used for target centroiding
Supplier: Malin Space Systems



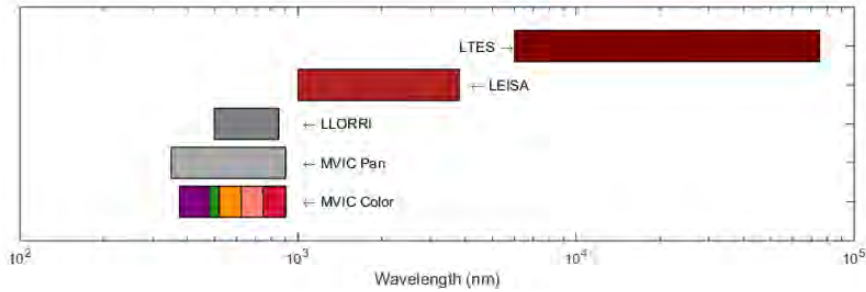
Radio Science
SC Telecommunications link with DSN provides Doppler measurements which enable mass density determination of each Trojan



L'TES
Thermal Emission Spectrometer (TES)
Point FTIR spectrometer
Supplier: ASU



L'Ralph
Multi-spectral Visible Imaging Camera (MVIC)
Linear Etalon Imaging Spectral Array (LEISA)
Color visible imager (MVIC) and infrared imaging spectrometer (LEISA)
Supplier: GSFC



Instruments et vaisseau spatial



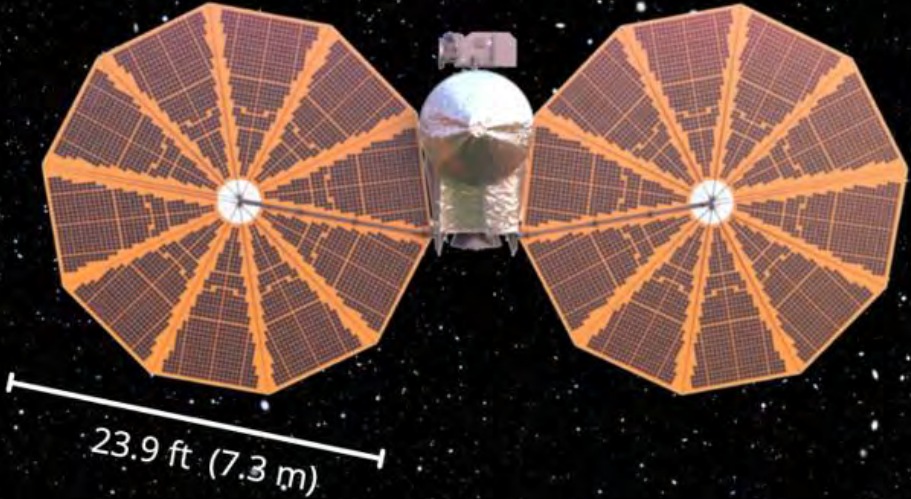
L'LO
LOng Range Reconnaissance Imager
(LORRI)
High speed camera
Supplier



24.6 ft
(7.5 m)



L'TES
Thermal Emission Spectrometer
Point and Track Sensor
Supplier



23.9 ft (7.3 m)

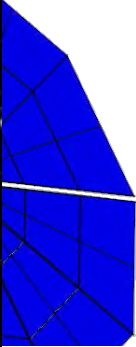
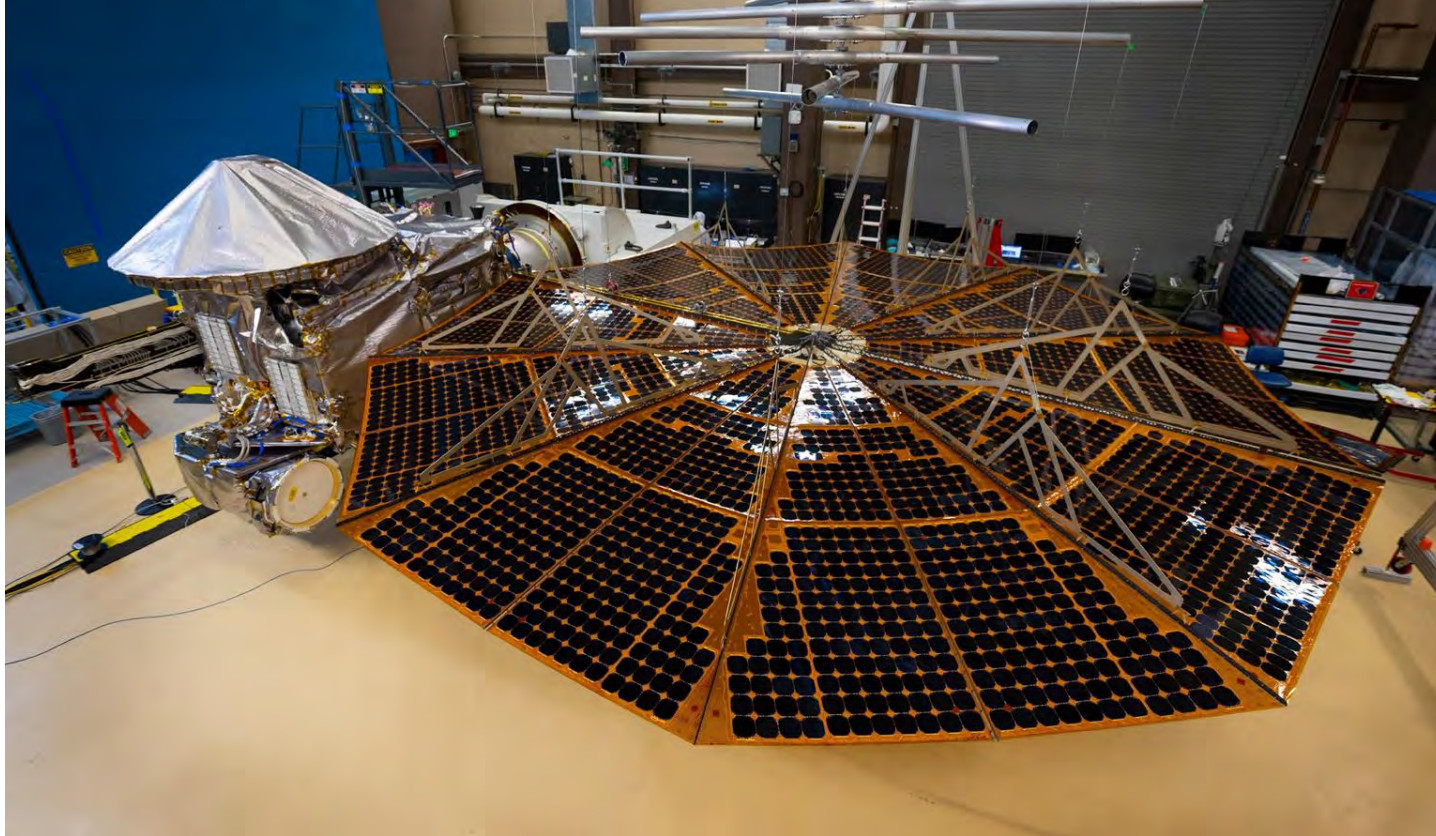


Image Credit: Disney, NASA/GSFC; graphic by David Dezell Turner

Quelques photos - le vaisseau spatial



@LM, south
Denver

-Y Wing
Fully
Deployed

Quelques photos - vaisseau spatial & coiffe

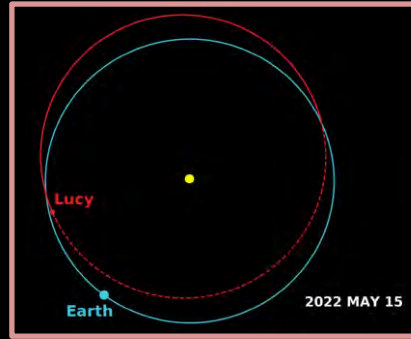


Quelques photos - lancement - 16 Oct. 2021



Quelques données ! Lucy a observé l'éclipse de lune du 15.5.21

- Taken with L'LLORI
- From 0.7 AU way



Earth



Moon

**Time lapse covering almost 3 hours
Video repeats**

Only the first half of the eclipse was observed

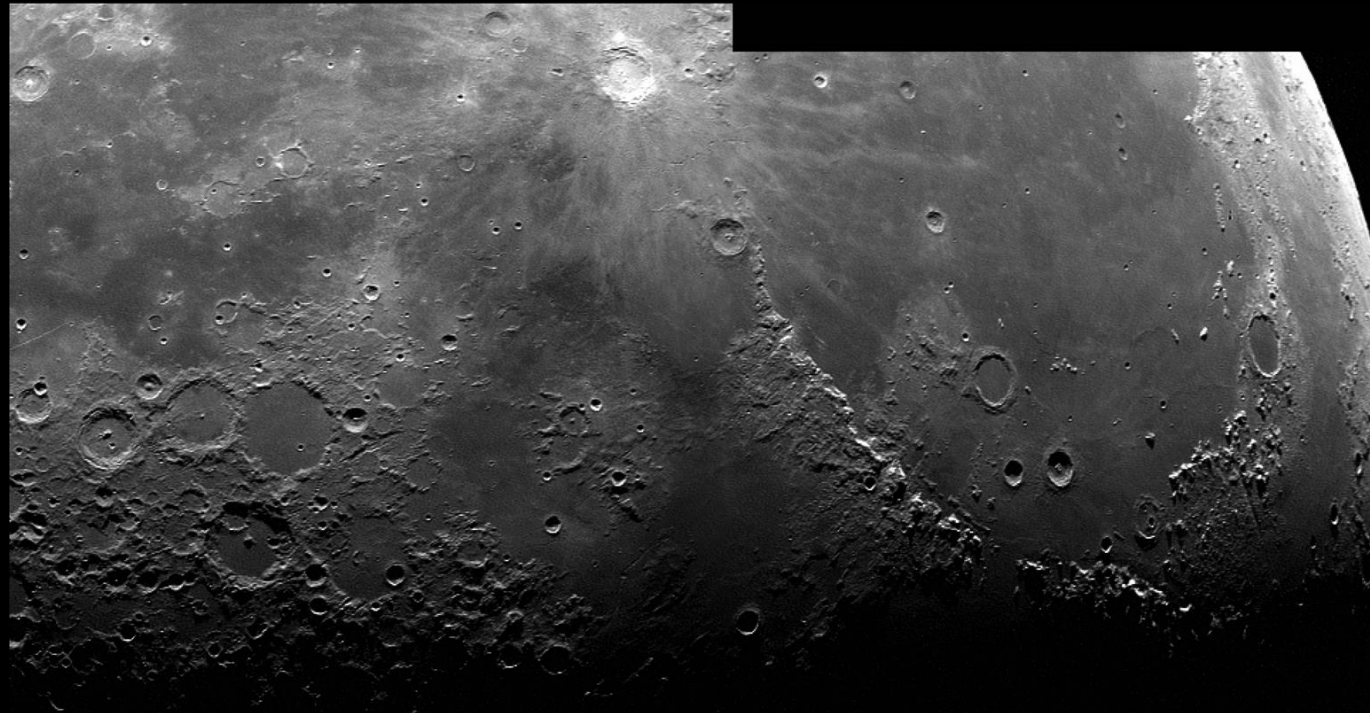
EGA1 observations 16.10.2022



L'LORRI Imaging of the Moon

Gorgeous composite of
two L'LORRI images
taken during the lunar
scan on Oct 16
(DOY 289)

Raw L'LORRI images
were deconvolved and
mosaiced by
collaborator Tod Lauer
(NOIRLab)



Rencontre avec l'astéroïde Dinkinesh



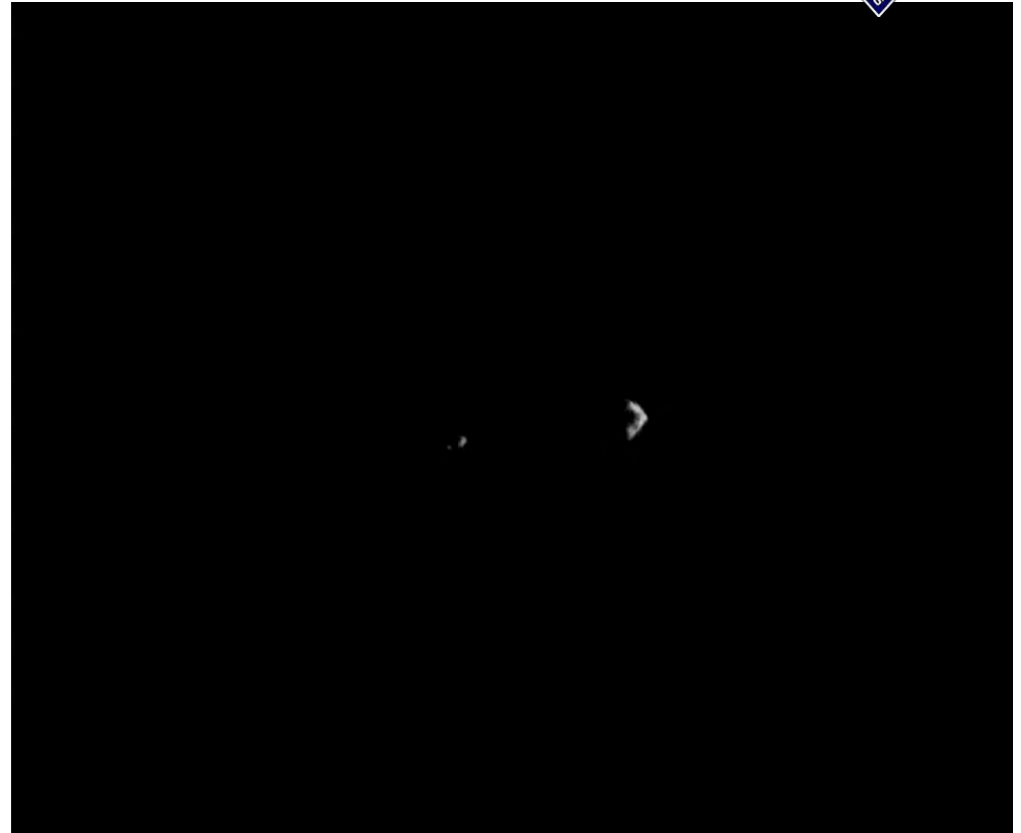
Nov. 1, 2023

Avant la rencontre:

- astéroïdes dans la ceinture principale
- petit (0.5 - 1 km)
- Type S

Et puis deux surprises:

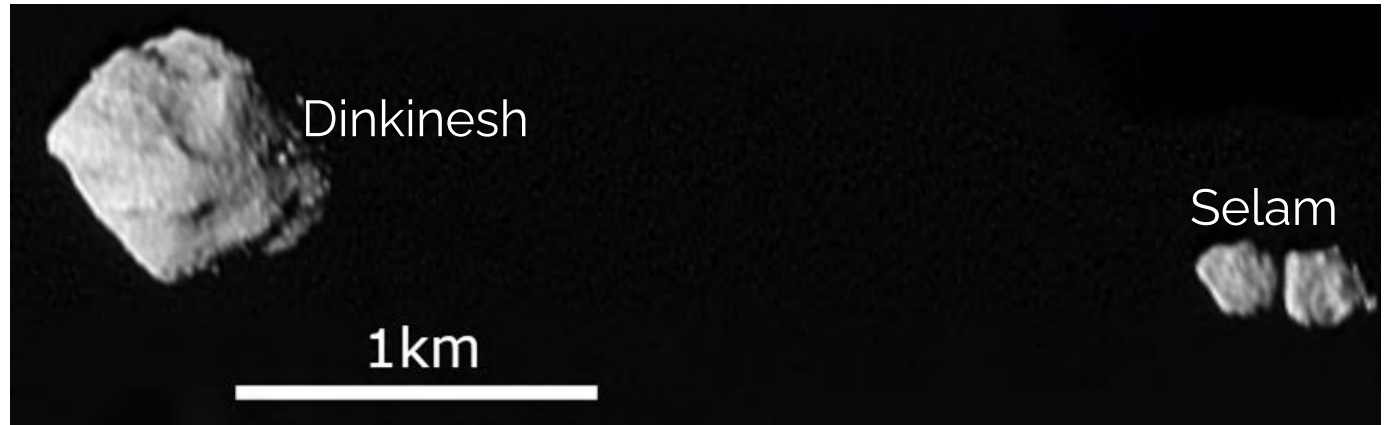
1. un système binaire
2. la lune est un binaire de contact (jamais vu auparavant)



Rencontre avec l'astéroïde Dinkinesh



Dinkinesh (720 m); Selam (210 m et 230 m); séparation 3.1 km; période orbitale de Selam (52.7 hr)



Levison et al. 2024

Rencontre avec l'astéroïde Dinkinesh



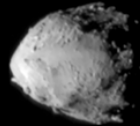
Premier petit astéroïde observé dans la ceinture principale. Les autres ont été observés à proximité de la Terre

Small Asteroids visted by Spacecraft

Near Earth Asteroids



162173 Ryugu
1,000 × 880 m
Hayabusa2, 2018-2019



65803 Didymos
851 × 849 × 620 m
DART, 2022



101955 Bennu
565 × 535 × 508 m
OSIRIS-REX, 2018-2020



25143 Itokawa
535 × 294 × 209 m
Hayabusa, 2005



152830 Dinkinesh
~790 m
Lucy, 2023

Main Belt

Image credit: 162173 Ryugu: ISAS/JAXA; 152830 Dinkinesh: NASA/Goddard/SwRI/Johns Hopkins APL/NOAO; 65803 Didymos: NASA/Johns Hopkins APL; 101955 Bennu: NASA/Goddard/University of Arizona; 25143 Itokawa: ISAS/JAXA

Raphael Marschall, @spaceMarschall

Rencontre avec l'astéroïde Dinkinesh

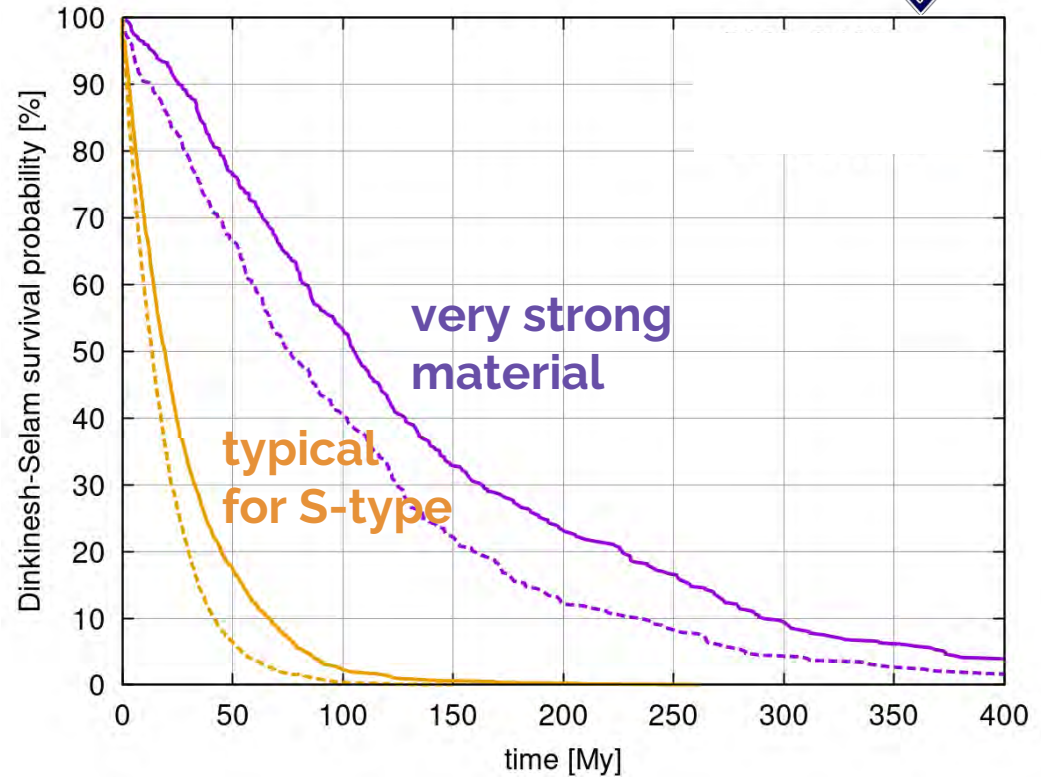


Dinkinesh & Selam sont impactés par d'autres astéroïdes qui peuvent détruire le système : Demi-vie de ~15 Myr !

→ Un système jeune !

→ Ces systèmes devraient être fréquents!

Comment se forment ces systèmes ? Rotation + transfert de masse?



Raphael Marschall

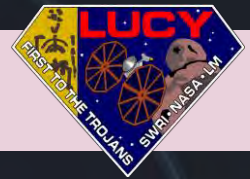
Rencontre avec l'astéroïde Dinkinesh



$t = 0.0 \text{ d}$



Where is Lucy? → wherelsLucy.space



Site web
interactif pour
voir la
trajectoire de
Lucy

150 million km



Résumé

- Les Troyens sont une population unique en résonance 1:1 avec Jupiter.
 - Ils ont une distribution de couleur bi-modale qui est similaire à celle du disque dispersé mais décalée vers le bleu.
 - La distribution des tailles des Troyens est également similaire à celle du disque dispersé.
 - Il pourrait donc y avoir un lien génétique entre les Troyens et la ceinture de Kuiper → leçons 4 et 8.
- La mission Lucy de la NASA visitera 8 Troyens entre 2027 et 2033.
 - Nous visiterons toute la diversité des Troyens (taille, types spectraux, binarité, fragments collisionnels)
 - Un survol de l'astéroïde Dinkinesh a permis de découvrir le premier petit astéroïde binaire de la ceinture principale d'astéroïdes et la première lune binaire de contact.



