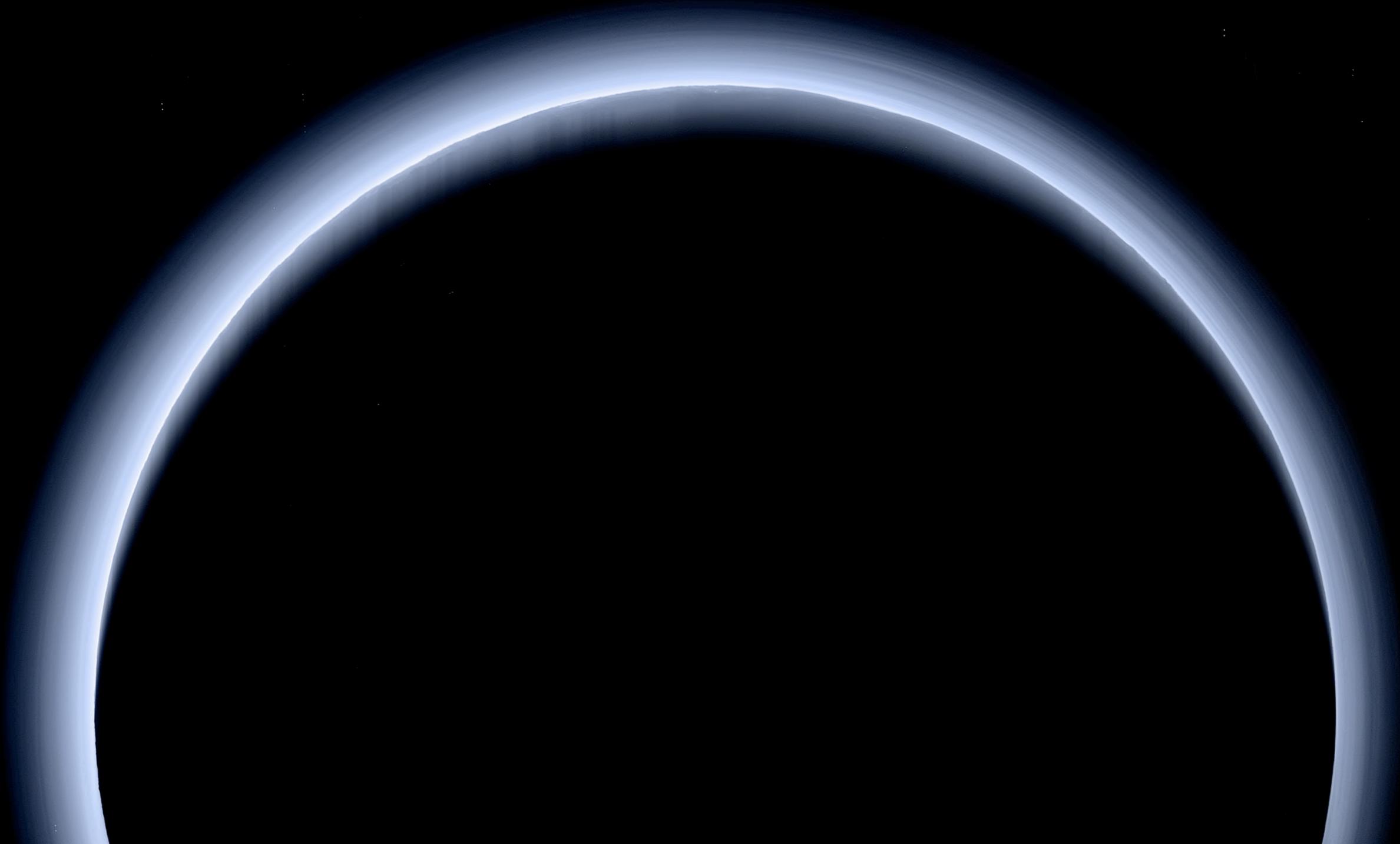


# Pluton

(et les confins du Système Solaire)



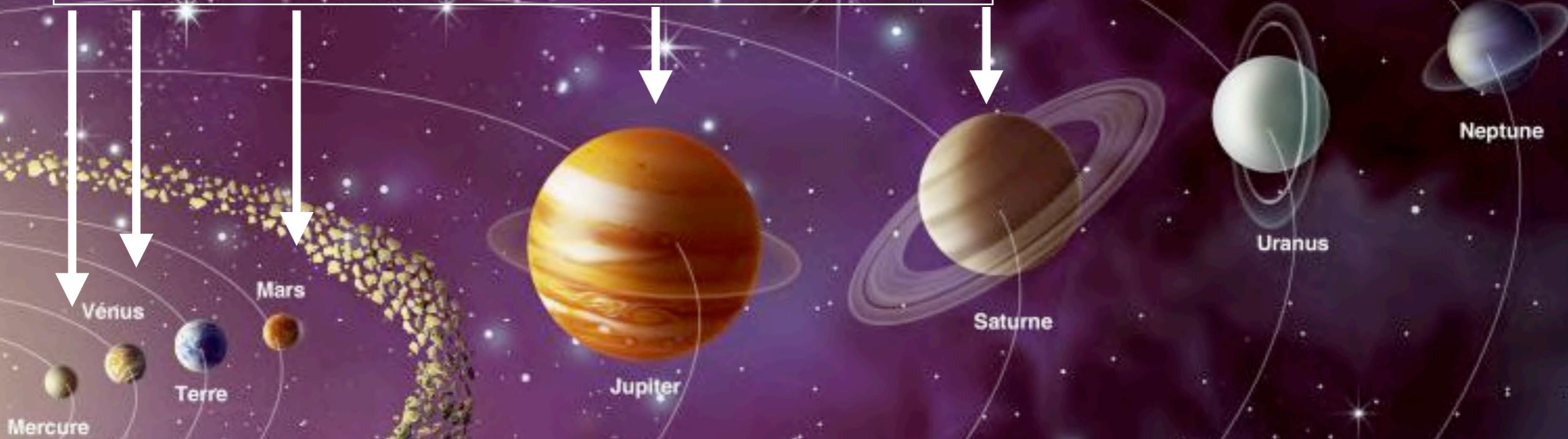
---

# Historique

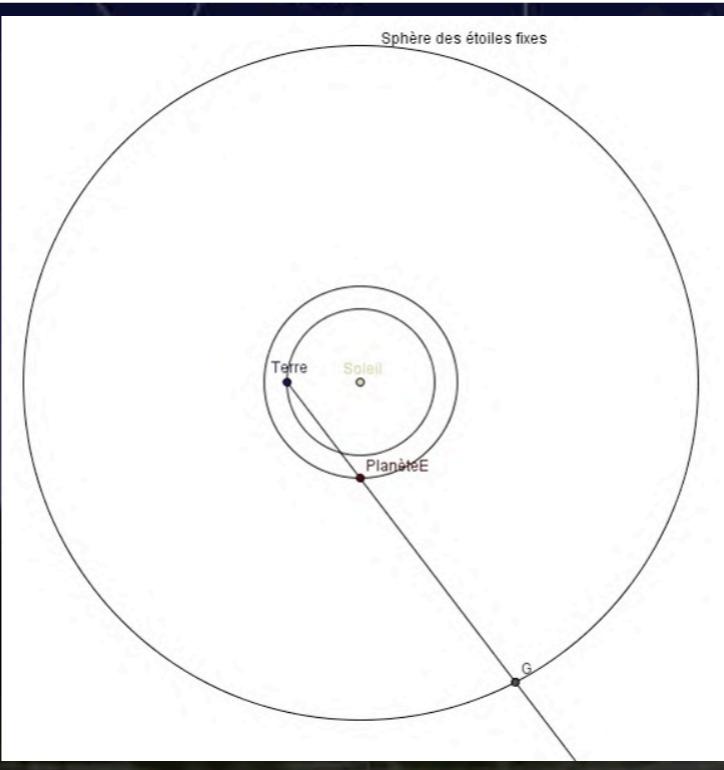
---

# Le Système Solaire

Découvertes dans l'Antiquité



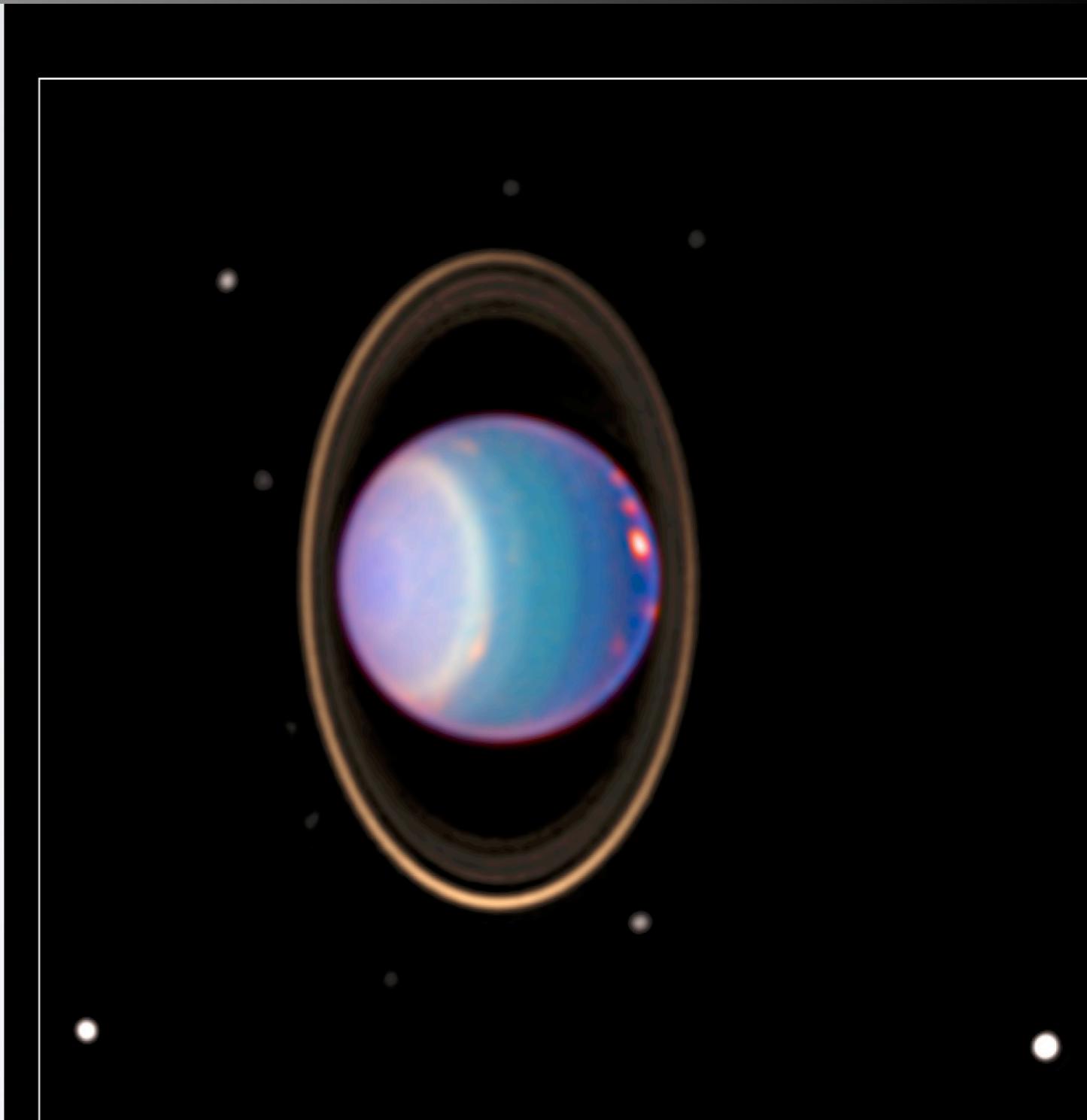
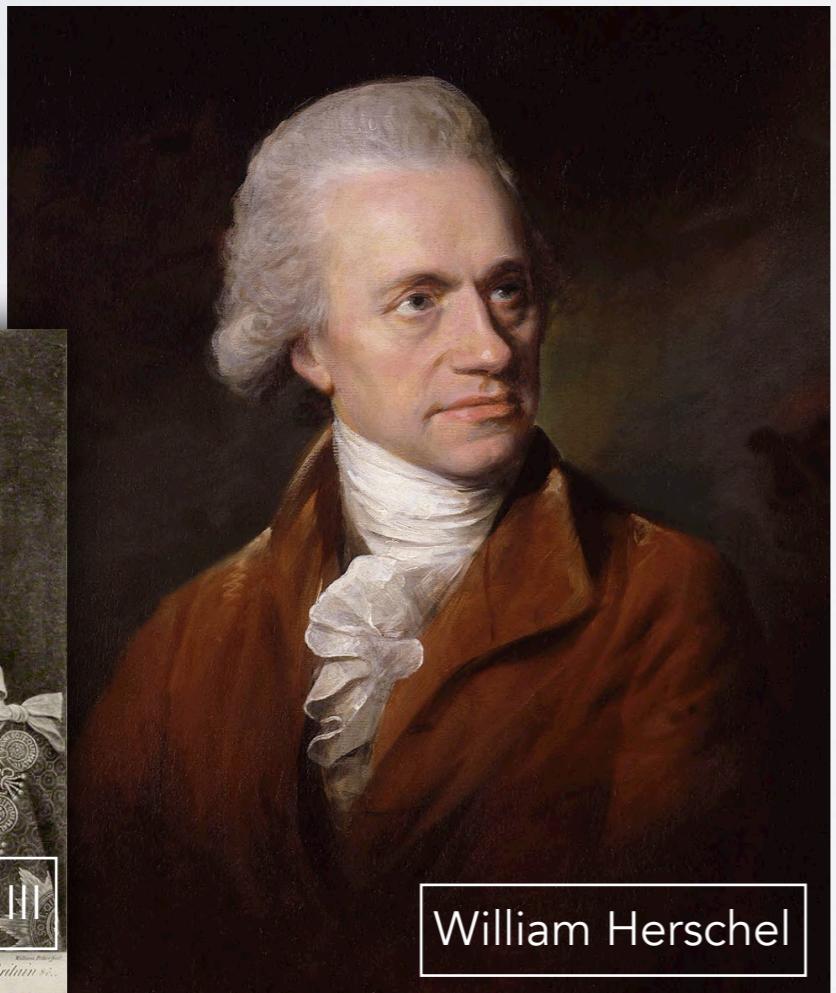
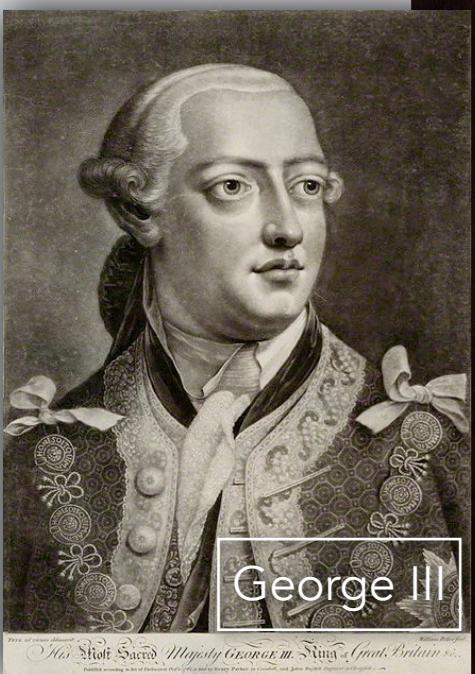
# Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, et Saturne



# Uranus

Découverte par **William Herschel** en 1781

- Dans son jardin, avec un télescope
- Au départ, pensait que c'était une comète
- Premier nom proposé: "étoile de George"



Uranus • August 8, 1998  
Hubble Space Telescope • NICMOS

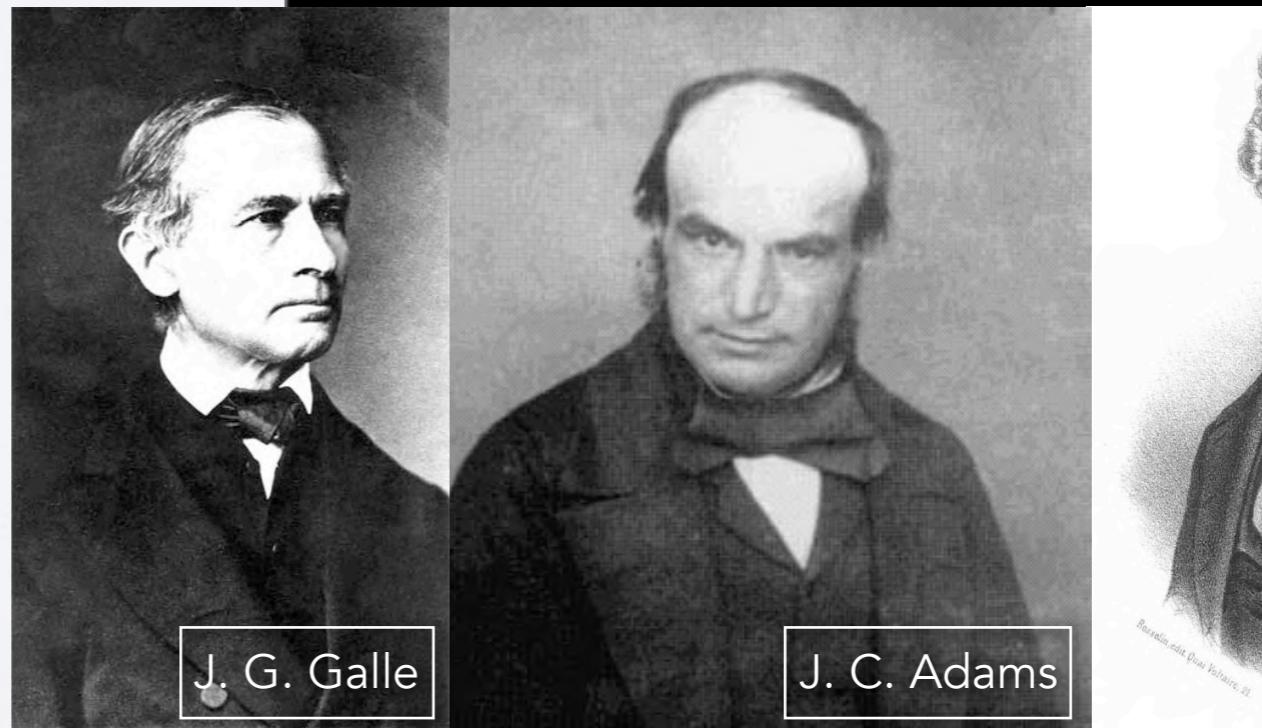
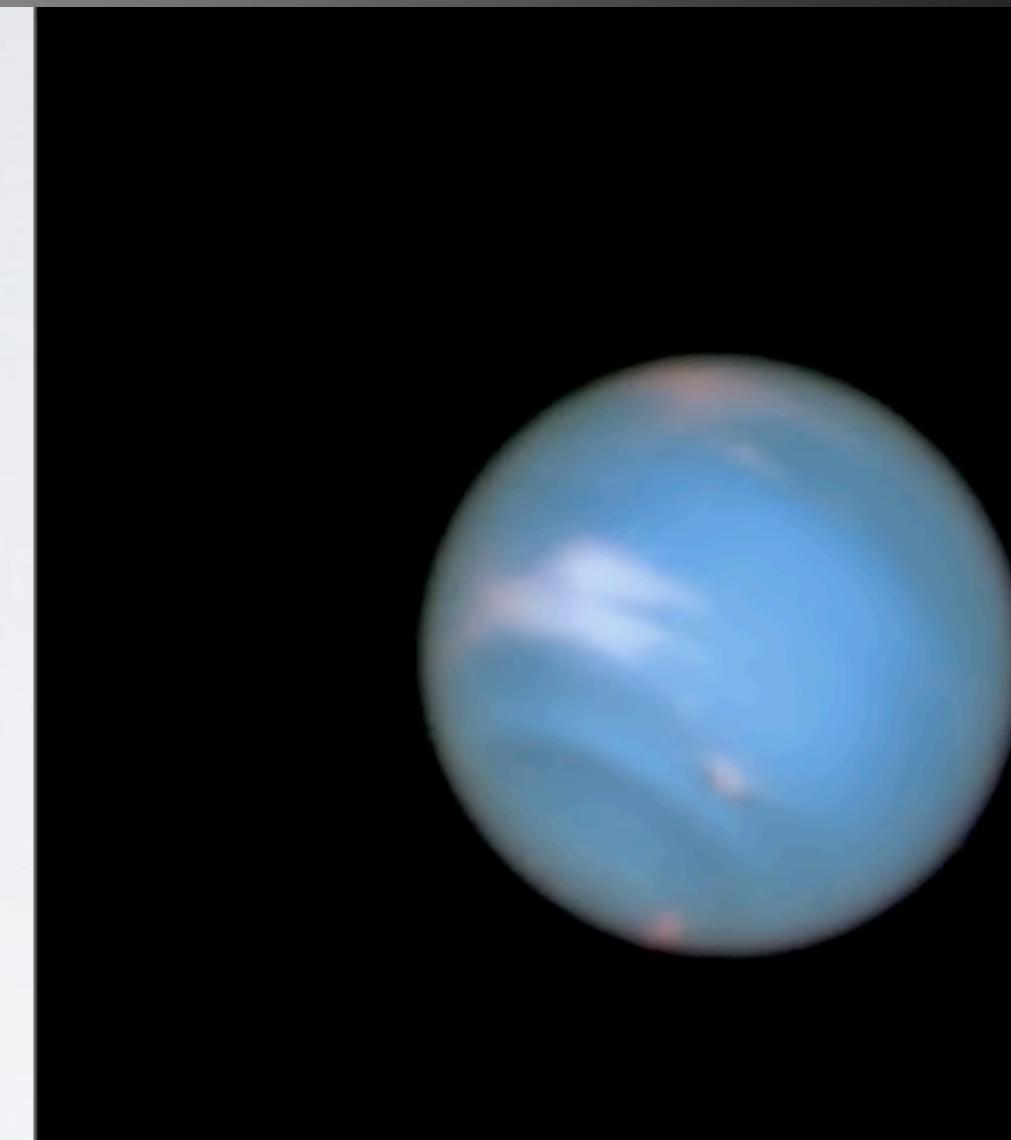
PRC98-35 • ST Scl OPO • October 14, 1998 • E. Karkoschka (University of Arizona) and NASA

# Neptune

Orbite d'Uranus perturbée!

- Soit la théorie de la gravitation n'est pas correcte...
- ...soit il existe un autre planète, plus loin qu'Uranus, qui perturbe son orbite!
- 1845-1846: **John Couch Adams** et **Urbain Le Verrier** prédisent sa position dans le ciel...
- 1846: **Johann Gottfried Galle** pointe son télescope à l'endroit indiqué par Le Verrier...
- ...et trouve Neptune!

Triomphe de la théorie de la gravitation de Newton!



J. G. Galle

J. C. Adams

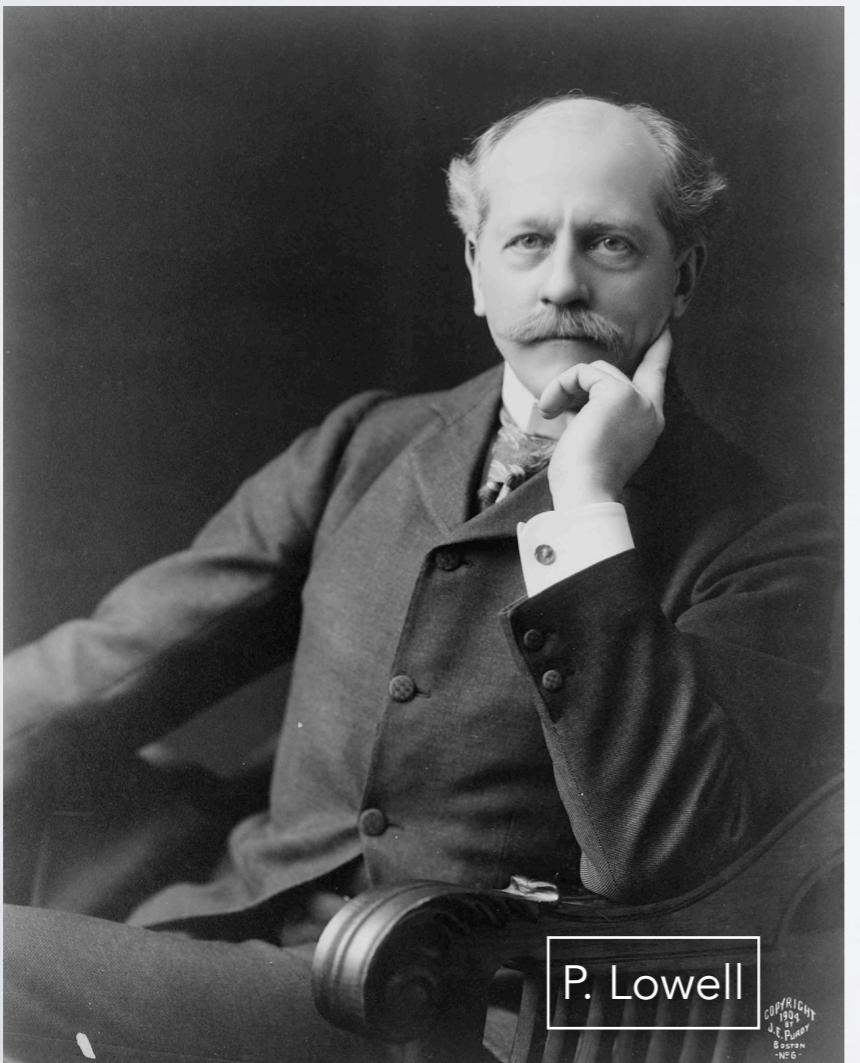
Boswell, d'après Voltaire, 21

U. Le Verrier

# Découverte de Pluton

L'orbite de Neptune semble être (aussi) perturbée!

- **Percival Lowell:** Il doit y avoir une "planète X"!
- 1894: Fait construire un observatoire et cherche cette planète... mais sans succès
- Meurt en 1916



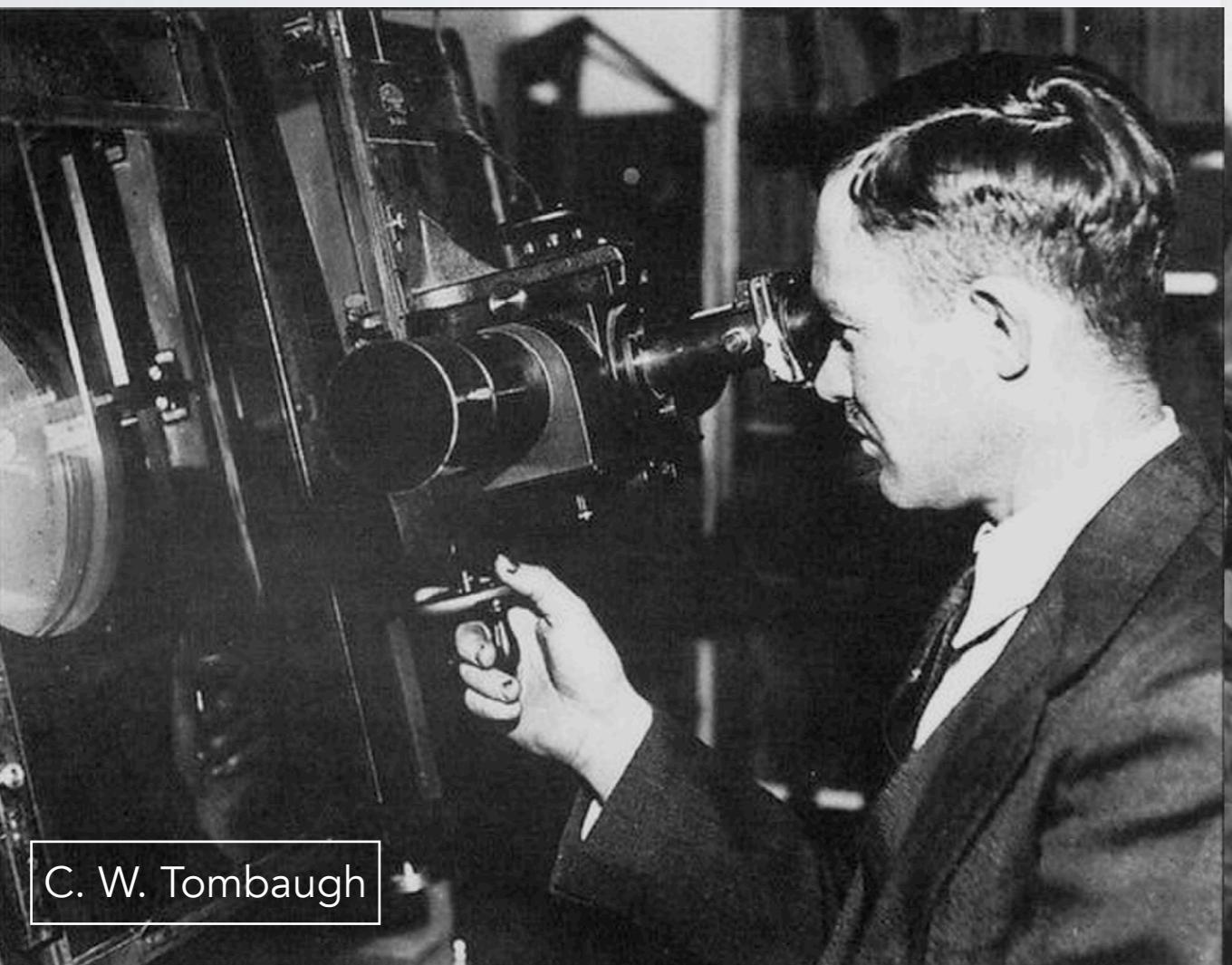
P. Lowell



Observatoire Lowell

# Découverte de Pluton

- Les recherches continuent à l'observatoire de Lowell...
- 1926: Construction d'un nouveau télescope, piloté par **Clyde Tombaugh**
- 1930: Découverte d'une nouvelle planète!



C. W. Tombaugh



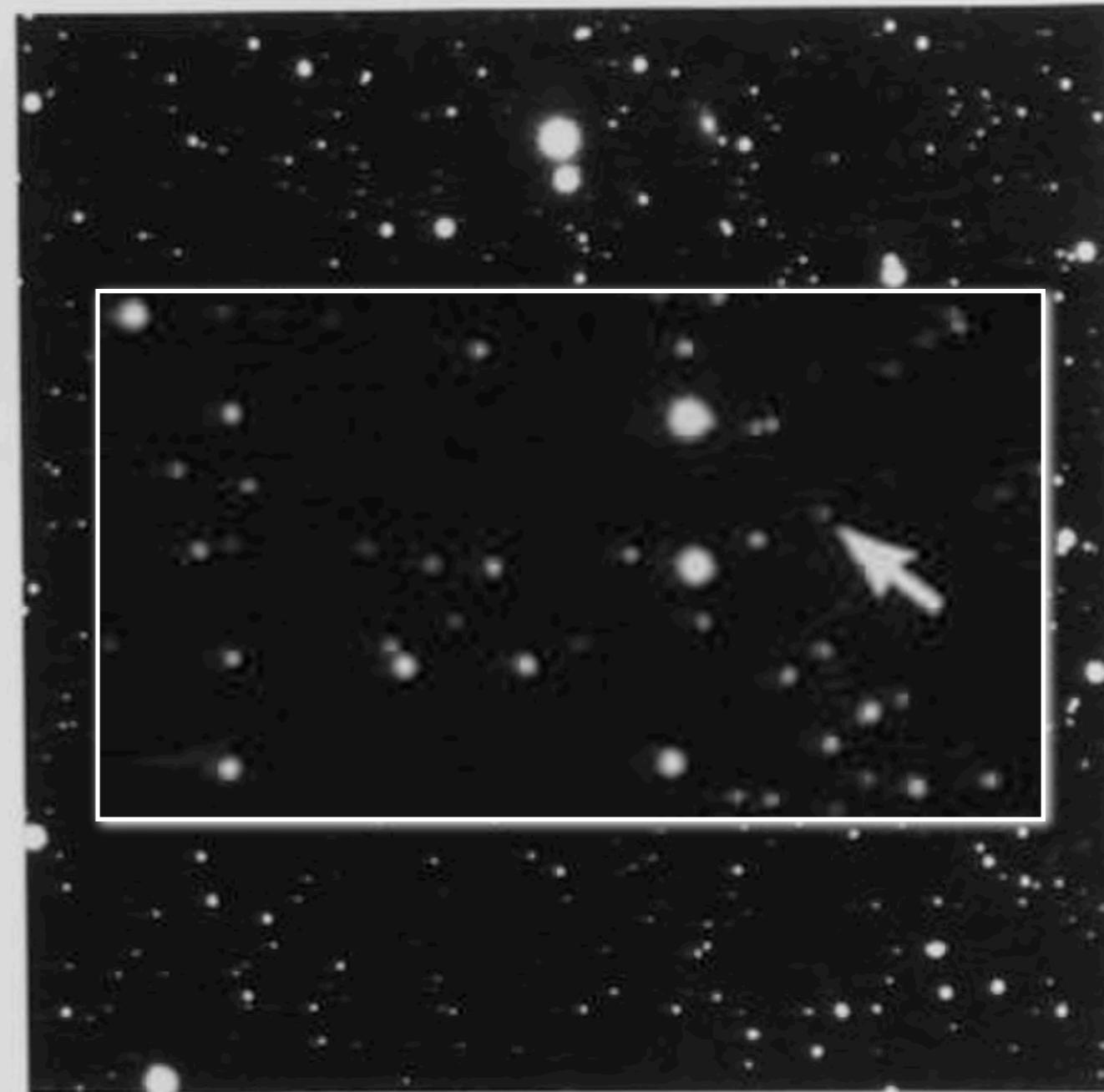
C. W. Tombaugh

# Découverte de Pluton

## DISCOVERY OF THE PLANET PLUTO



January 23, 1930



January 29, 1930

# Quel nom lui donner?

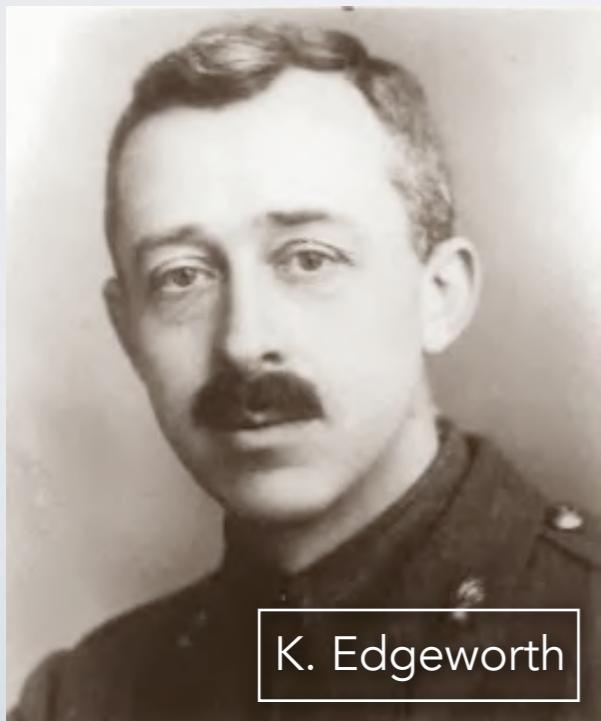
Le directeur de l'Observatoire de Lowell, Vesto Slipher, est chargé de nommer cette nouvelle planète...

- Beaucoup de propositions ("Zeus", "Lowell", "Minerve", "Hercules")... mais certains étaient déjà le nom d'astéroïdes
- Le nom "Pluton" fut proposé par une jeune Anglaise de 11 ans, **Venetia Burney**
- **Vesto Slipher**, aime l'idée (initiales de Percival Lowell!)
- 1930: Le nom "Pluton" fut formellement approuvé



# Fin de l'histoire...?

- Planète apparemment très petite (donc peu massive)...
- Sans doute insuffisante pour expliquer les perturbations de l'orbite de Neptune!
- Clyde Tombaugh (et d'autres) cherchent une autre "planète X"
- ...sans succès :(
- **Kenneth Edgeworth**: "Et s'il y avait pleins d'autres petits corps au delà de l'orbite de Neptune?"
- **Gerard Kuiper**: "Bonne idée! Appelons cette zone 'la ceinture de Kuiper'!"
- Confirmée en 1992! (voir plus loin...)



K. Edgeworth



G. Kuiper



- Voyager 2: "La masse de Neptune est moins grande que prévue"
- Conclusion: pas d'anomalies dans la trajectoire de Neptune!
- Pluton fut découverte à partir d'une fausse prédition!

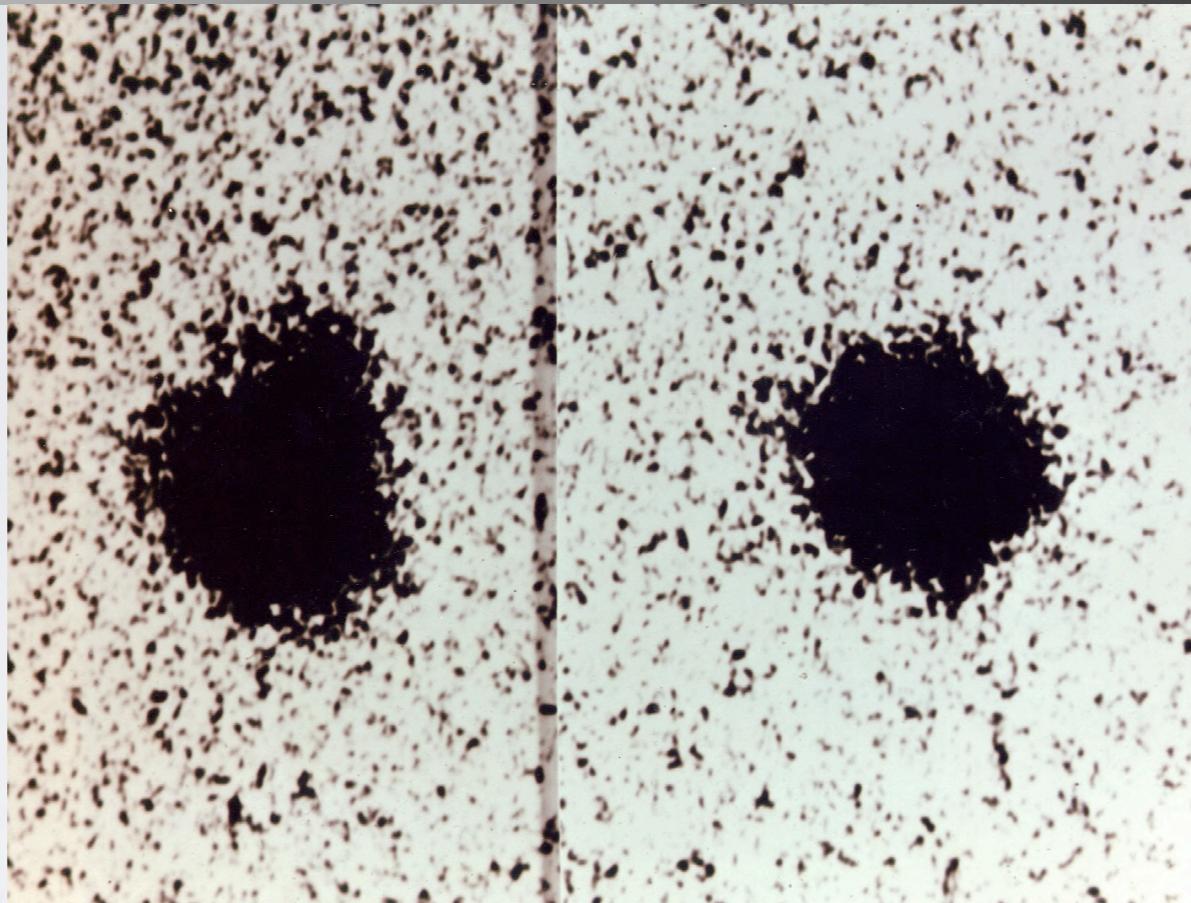
---

Pluton (...avant 2006)

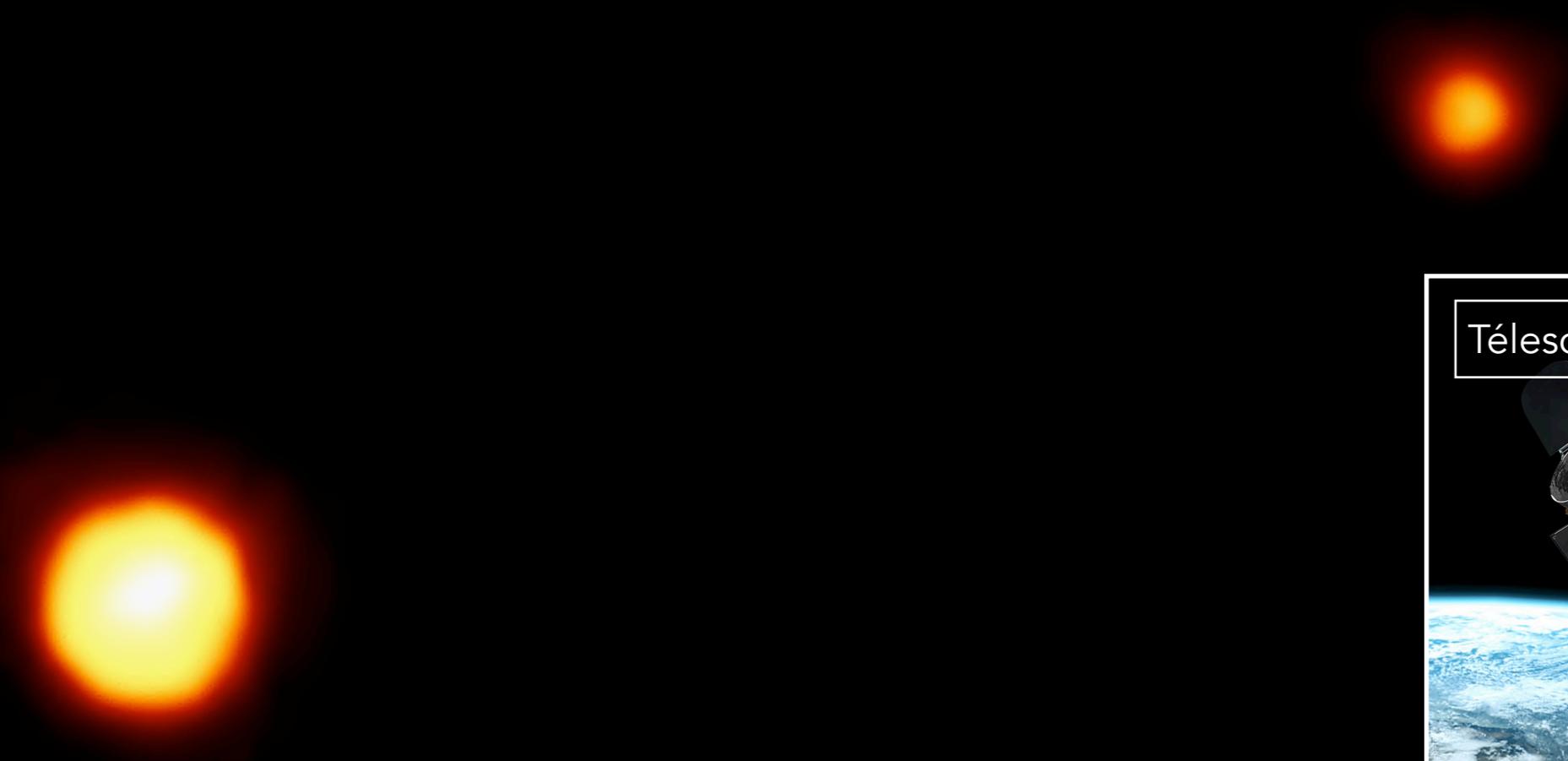
---

# Pluton... et Charon

- Pluton a une lune:  
Charon
- Découverte en  
1978 par  
**James Christy**



J. Christy

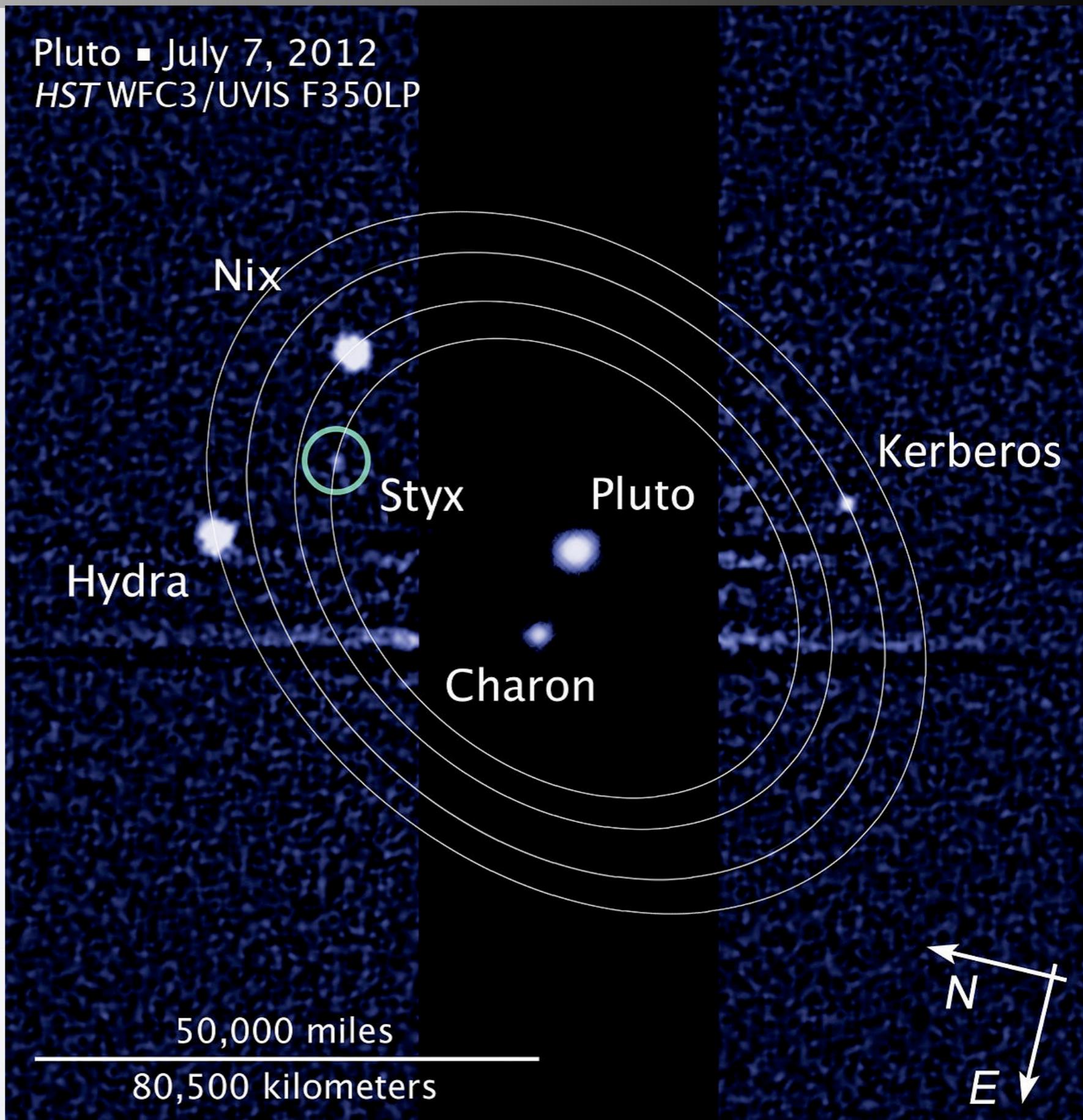


Télescope spatial Hubble

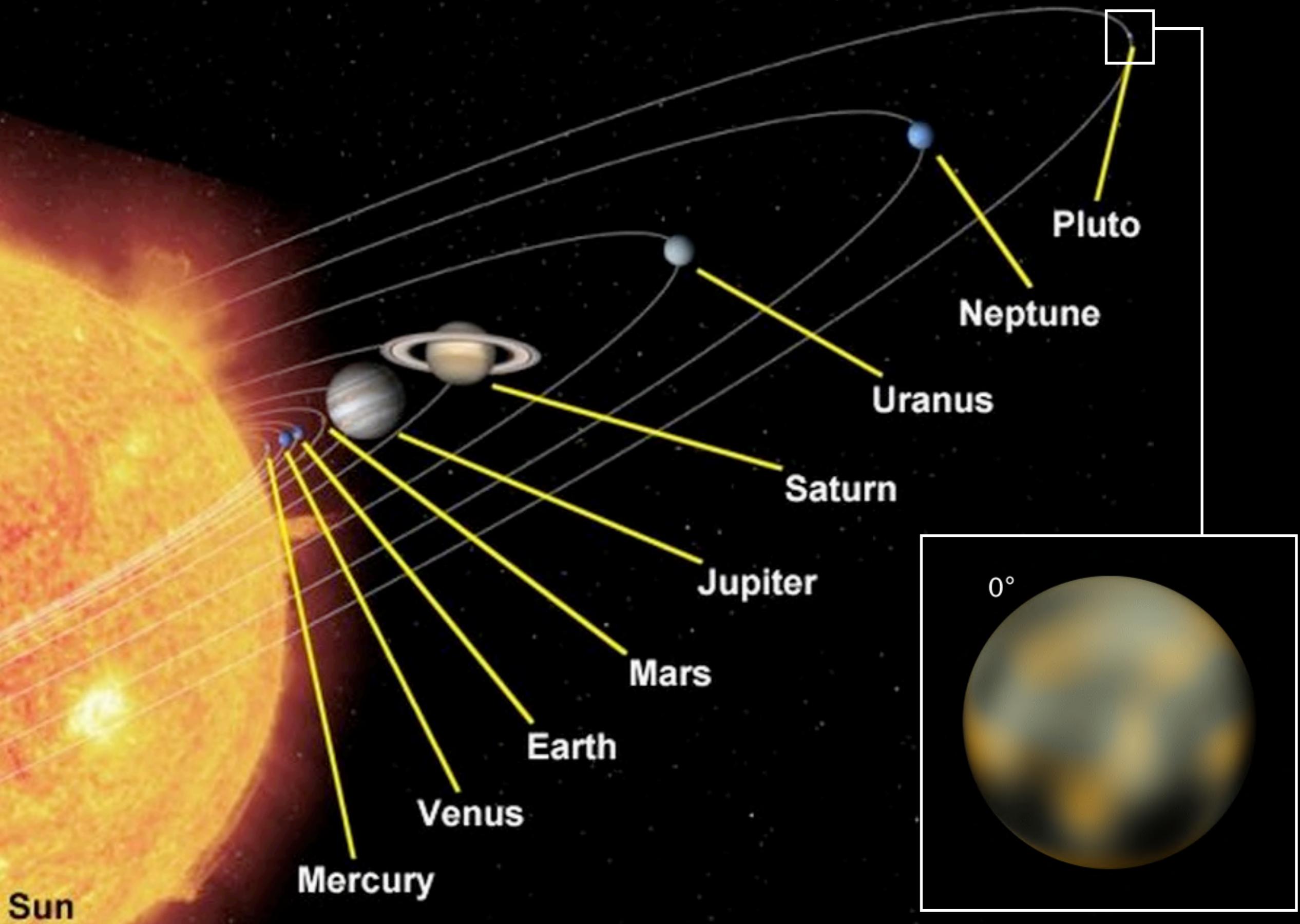


# Le Système Plutonien

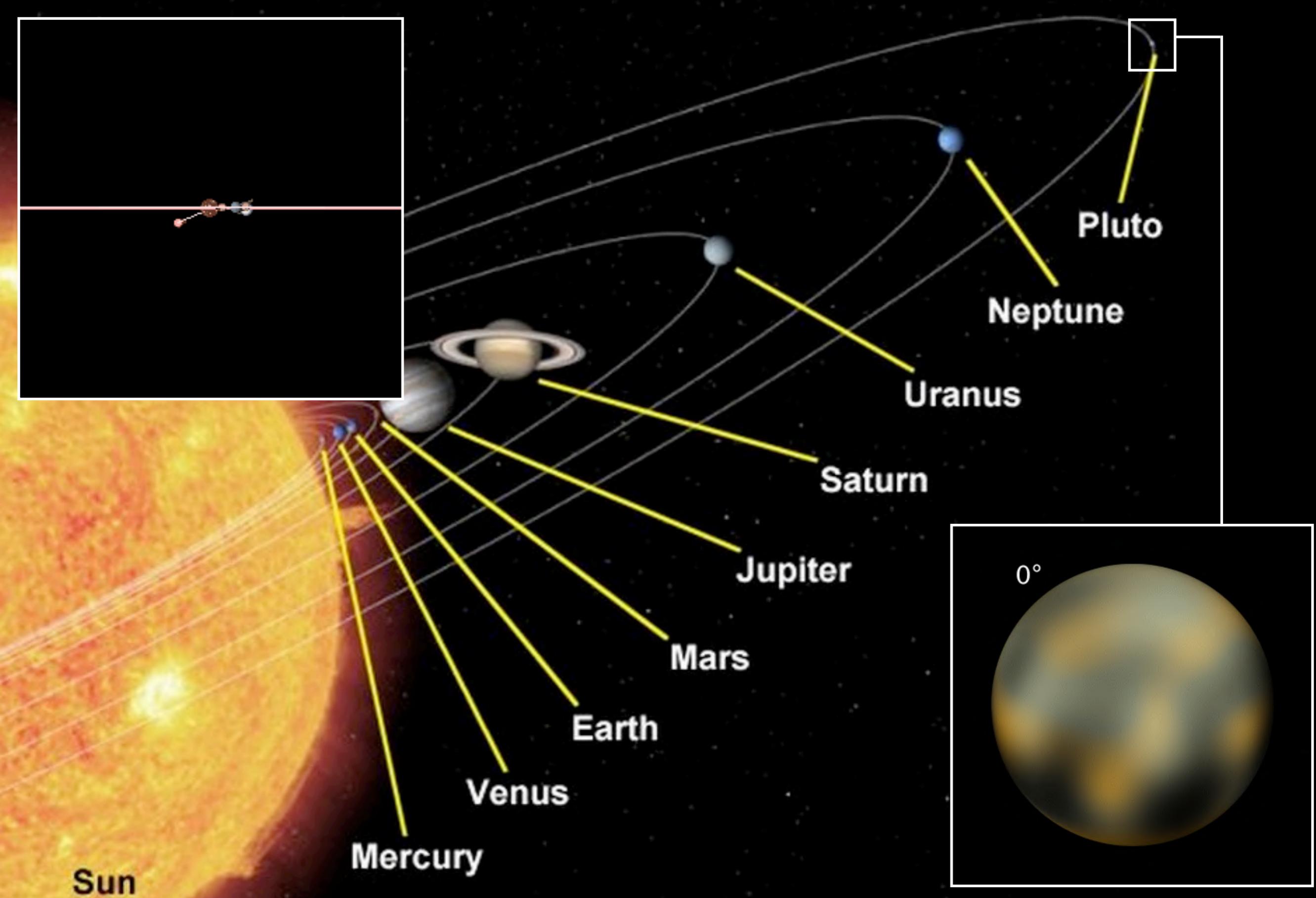
- Charon n'est pas le seul satellite!
- 2005: Hydre et Nix
- 2011: KerbérOS
- 2012: Styx



# Pluton dans le Système Solaire



# Pluton dans le Système Solaire

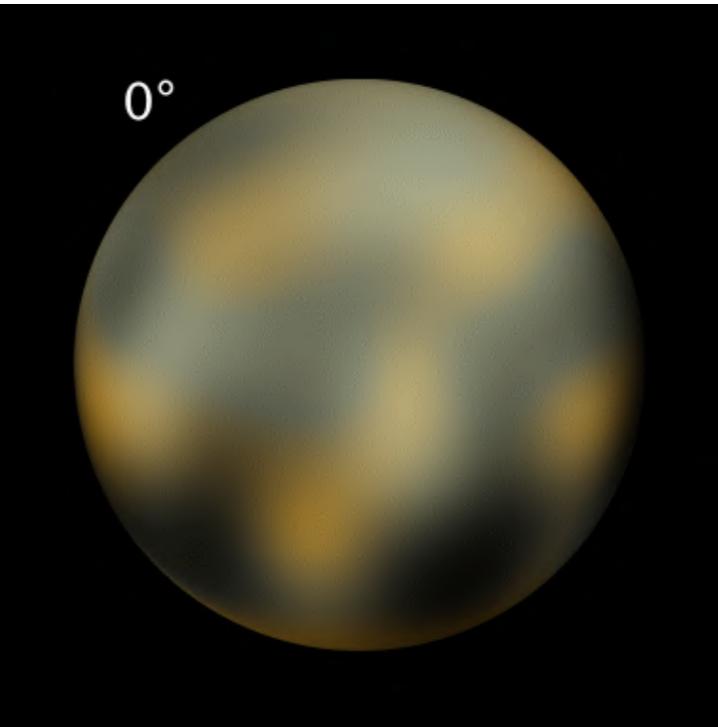


# Quelques chiffres...

## Pluton

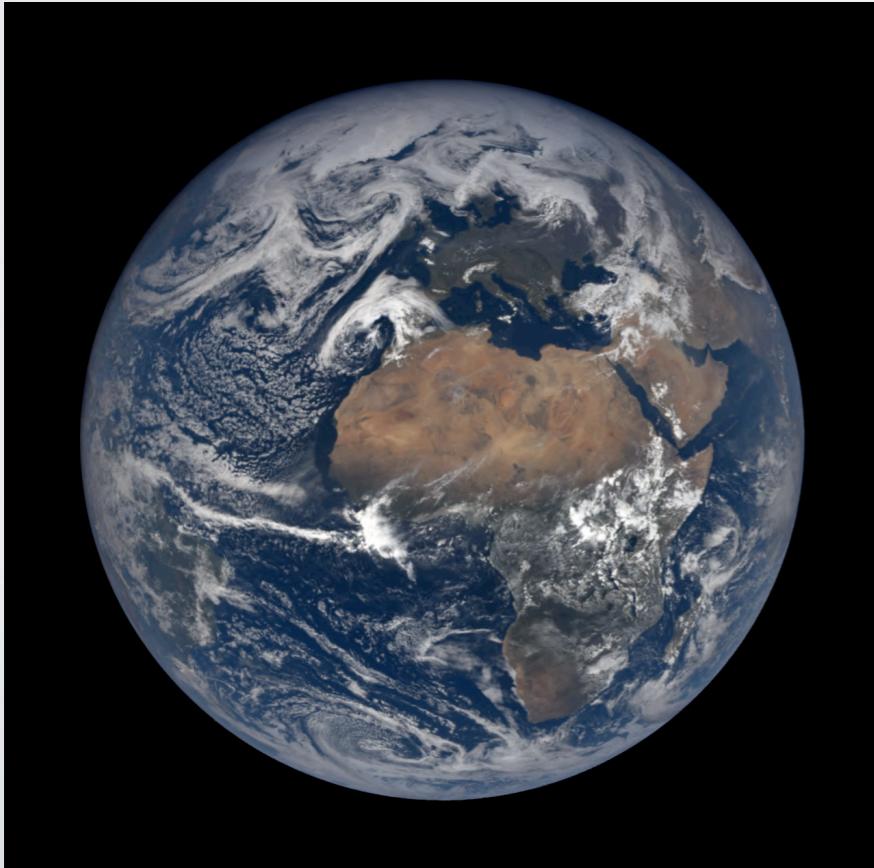
- Demi-grand axe: 5 900 898 440 km
- Période de révolution: 90 487 jours
- Inclinaison: 17°
- Rayon (équatorial): 1 185 km
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg
- Période de rotation: 6,4 jours
- Température de surface: 48 K

0°



## Terre

- Demi-grand axe: 149 597 887 km (= 1 u.a.)
- Période de révolution: 365,26 jours
- Inclinaison: 0° (par définition :))
- Rayon (équatorial): 6 378 km
- Masse:  $5,97 \times 10^{24}$  kg
- Période de rotation: 1 jours
- Température de surface: 288 K



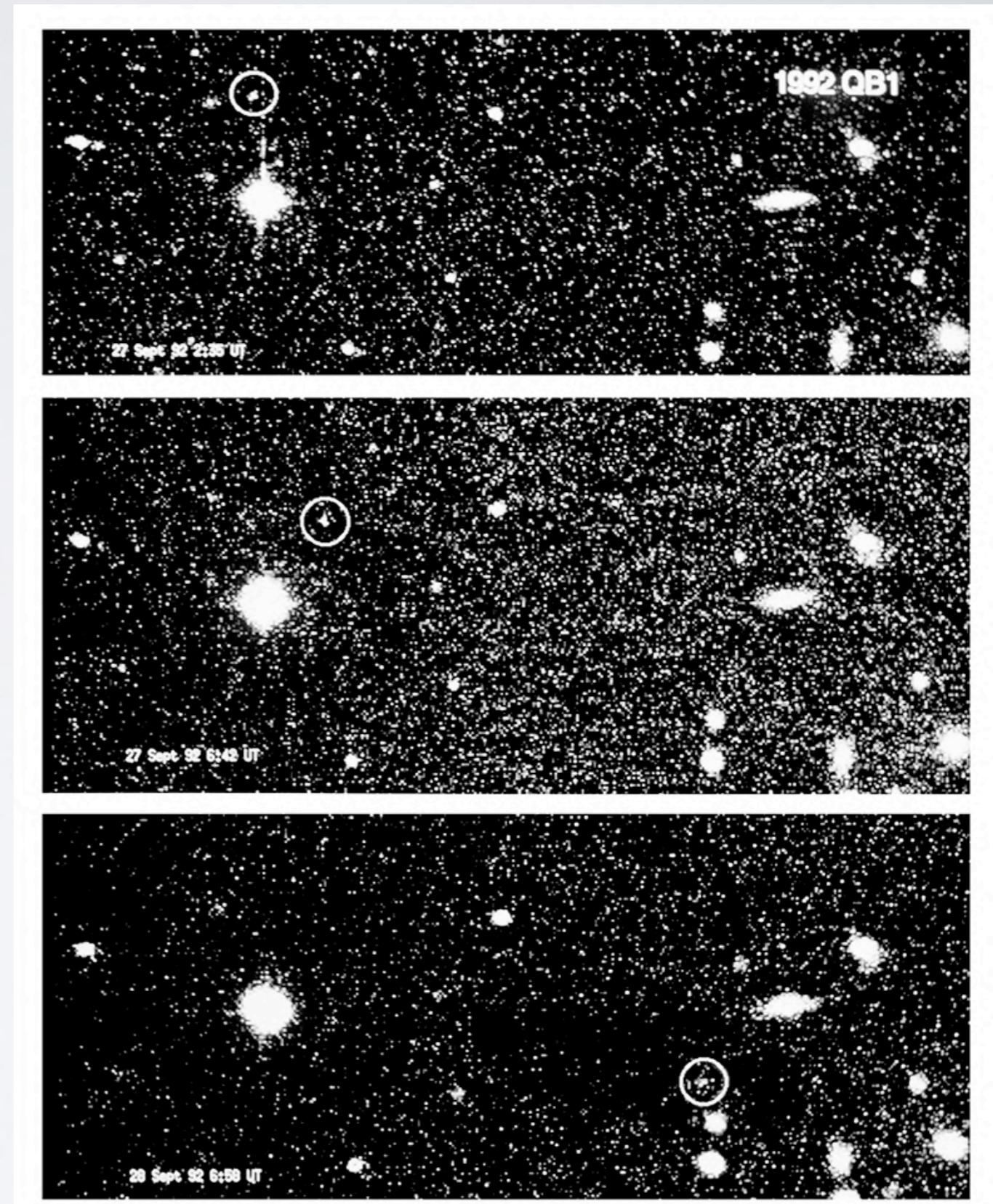
---

Pluton est-elle une planète?

---

# Découverte des objets transneptuniens

- 1992: 1992QB1 -> **Albion**
  - Premier objet confirmé de la ceinture de Kuiper!
  - Diamètre: 110-170 km
  - Demi-grand axe: 43 u.a.



Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg

# Découverte des objets transneptuniens

- 2000: **Varuna**
  - Premier "gros" objet transneptunien découvert!
  - Diamètre: 670 km
  - Masse:  $5,9 \times 10^{20}$  kg
  - Demi-grand axe: 43 u.a.
  - (Presque) aussi gros que Cerès!

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg



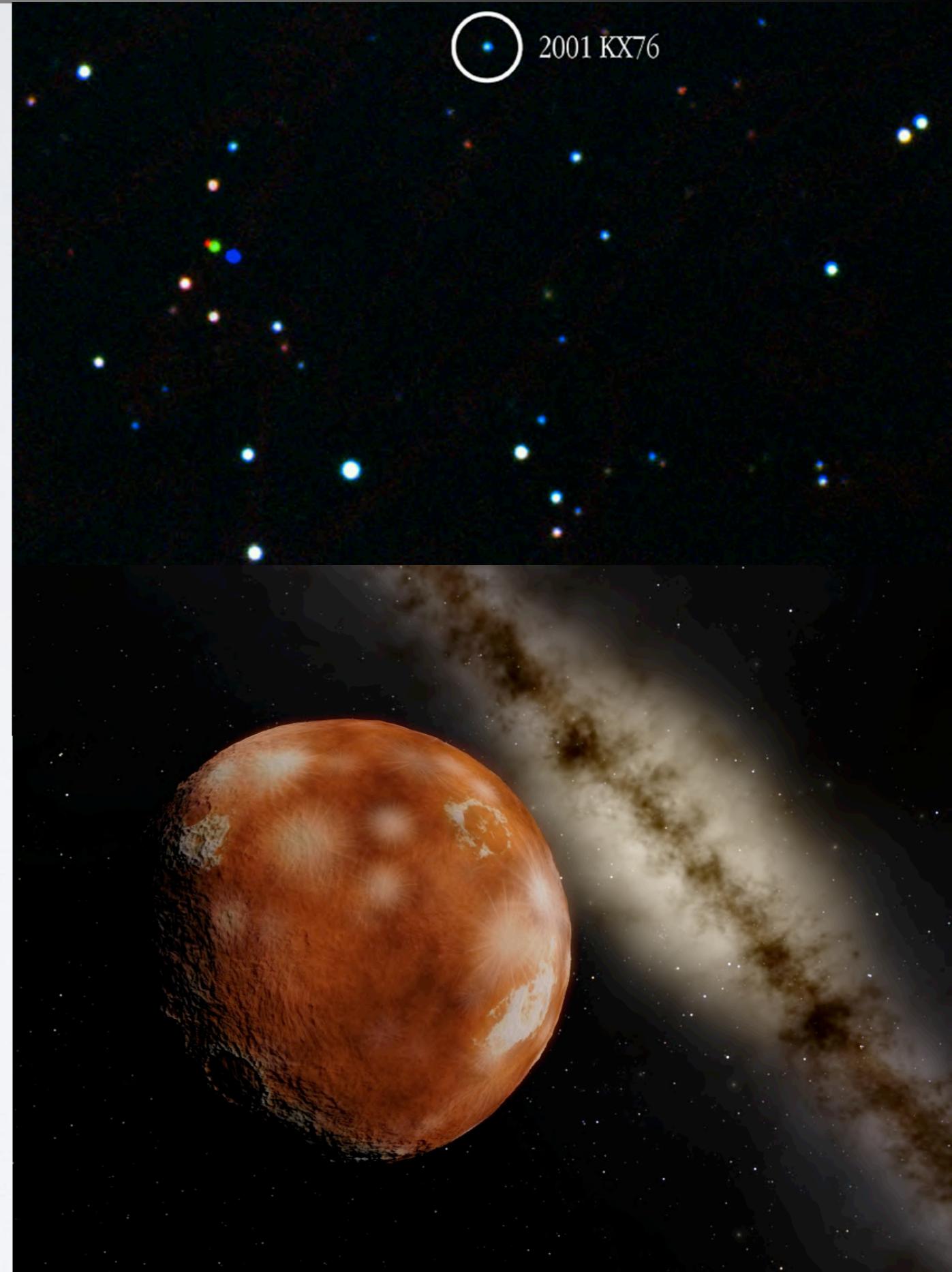
# Découverte des objets transneptuniens

- **2001: Ixion**

- Diamètre: 759 km
- Masse:  $2,3 \times 10^{20}$  kg
- Demi-grand axe: 39 u.a.

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg



# Découverte des objets transneptuniens

- 2002: **Quaoar**
  - Diamètre: 1110 km
  - Masse:  $1 \times 10^{21}$  kg
  - Demi-grand axe: 43 u.a.

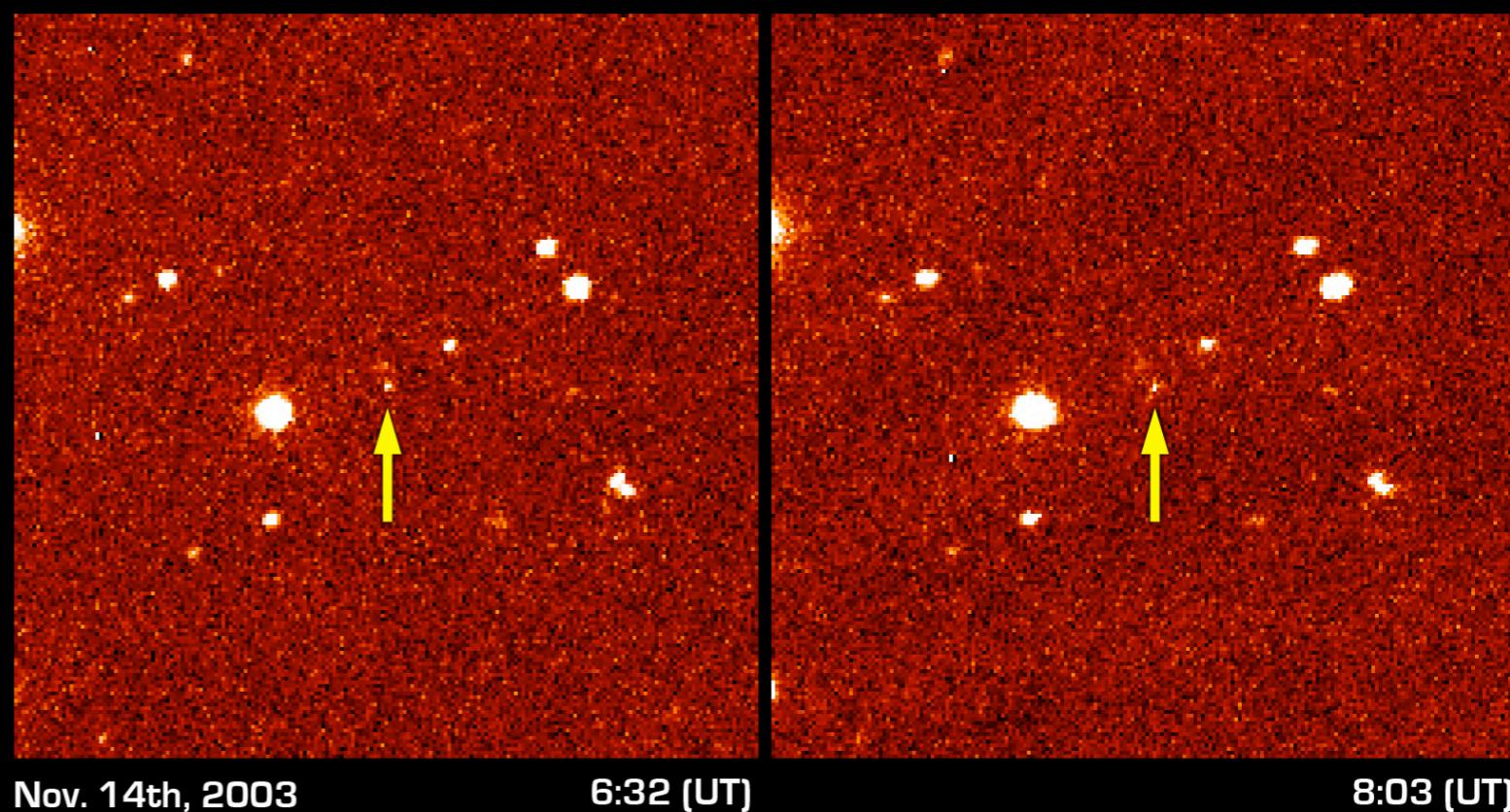
Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg



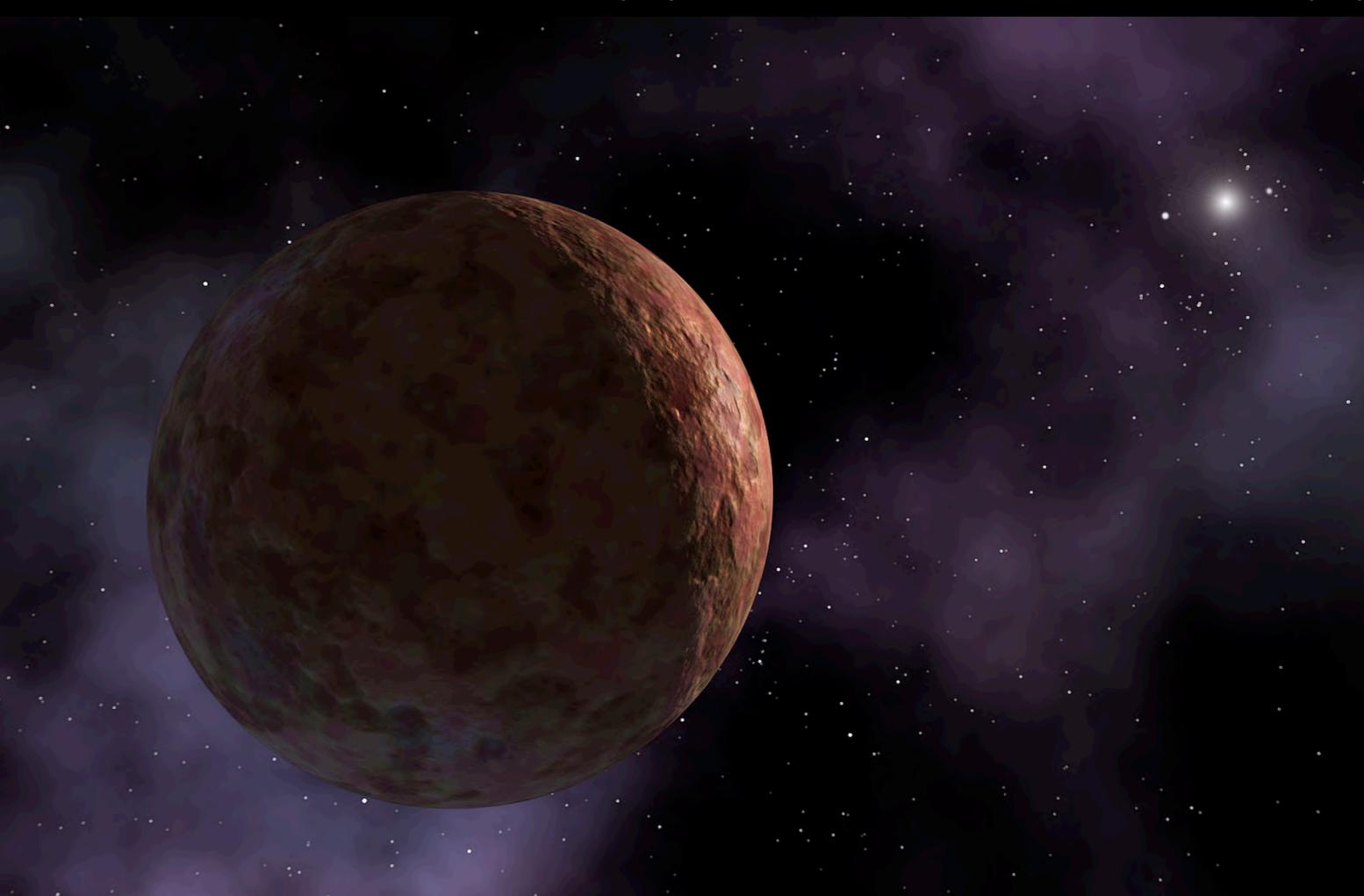
# Découverte des objets transneptuniens

- 2003: **Sedna**
  - Diamètre: 995 km
  - Masse:  $1 \times 10^{21}$  kg
  - Demi-grand axe: 515 u.a.!!



Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg

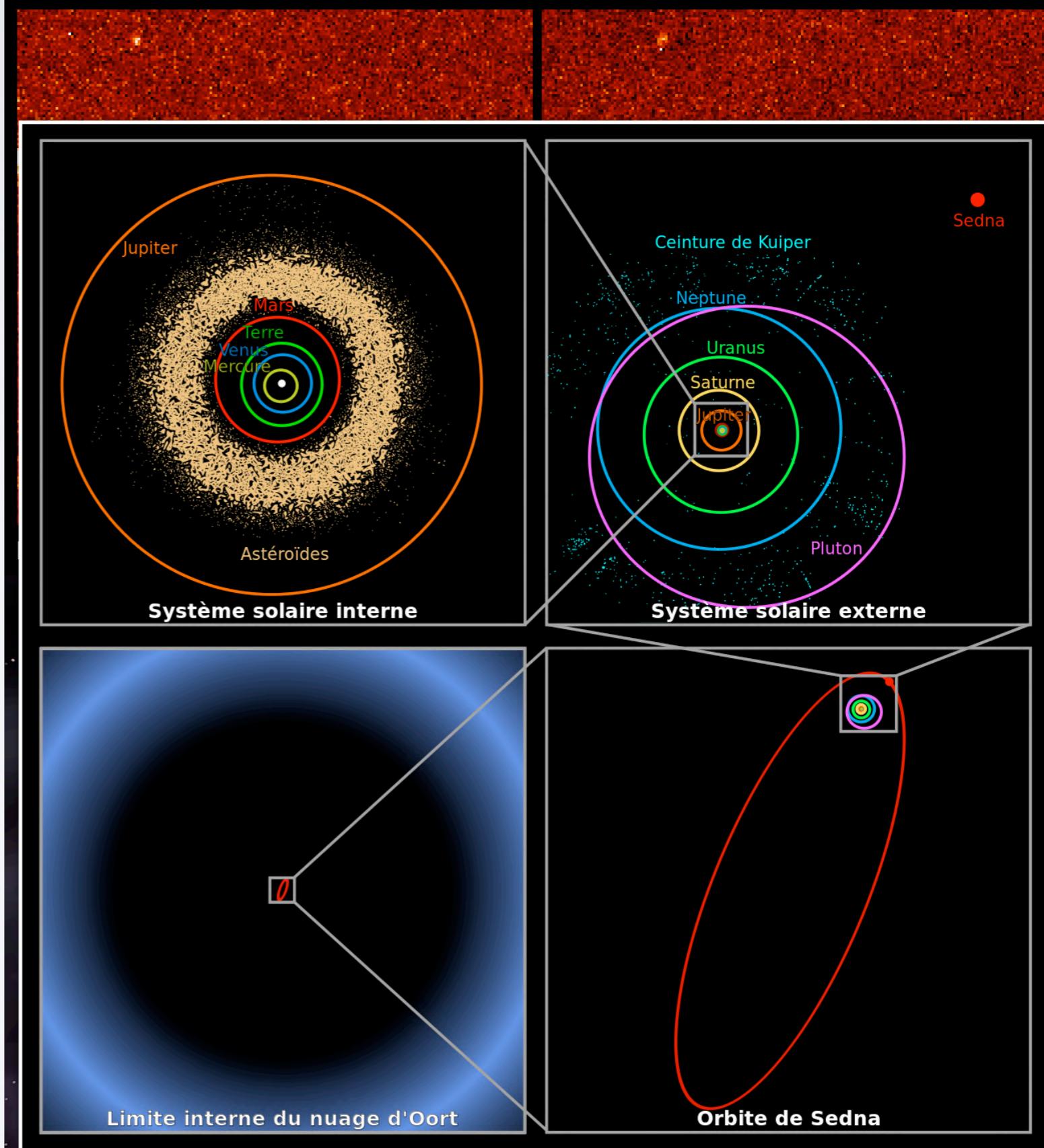


# Découverte des objets transneptuniens

- 2003: **Sedna**
  - Diamètre: 995 km
  - Masse:  $1 \times 10^{21}$  kg
  - Demi-grand axe: 515 u.a.!!

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg



# Découverte des objets transneptuniens

- 2004: **Orcus**
  - Diamètre: 946 km
  - Masse:  $7 \times 10^{20}$  kg
  - Demi-grand axe: 39 u.a.

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg

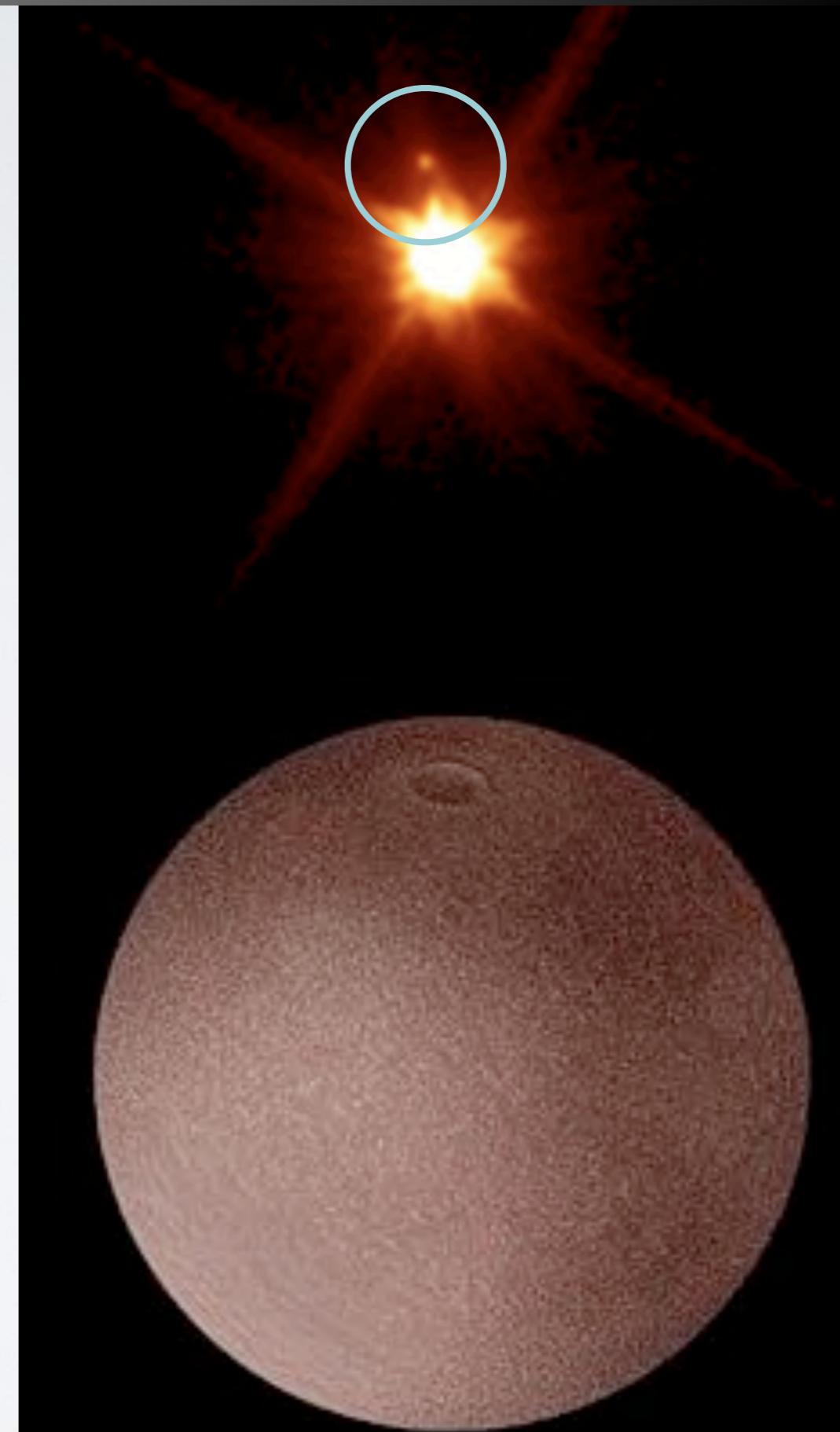


# Découverte des objets transneptuniens

- 2005: **Makémaké**
  - Diamètre: 1430 km
  - Masse:  $4,4 \times 10^{21}$  kg  
(~34% de la masse de Pluton)
  - Demi-grand axe: 46 u.a.

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg



# Découverte des objets transneptuniens

- 2005: **Hauméa**
  - Diamètre:  $1960 \times 1518 \times 998$  km,
  - Masse:  $4,2 \times 10^{21}$  kg
  - Demi-grand axe: 43 u.a.

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg

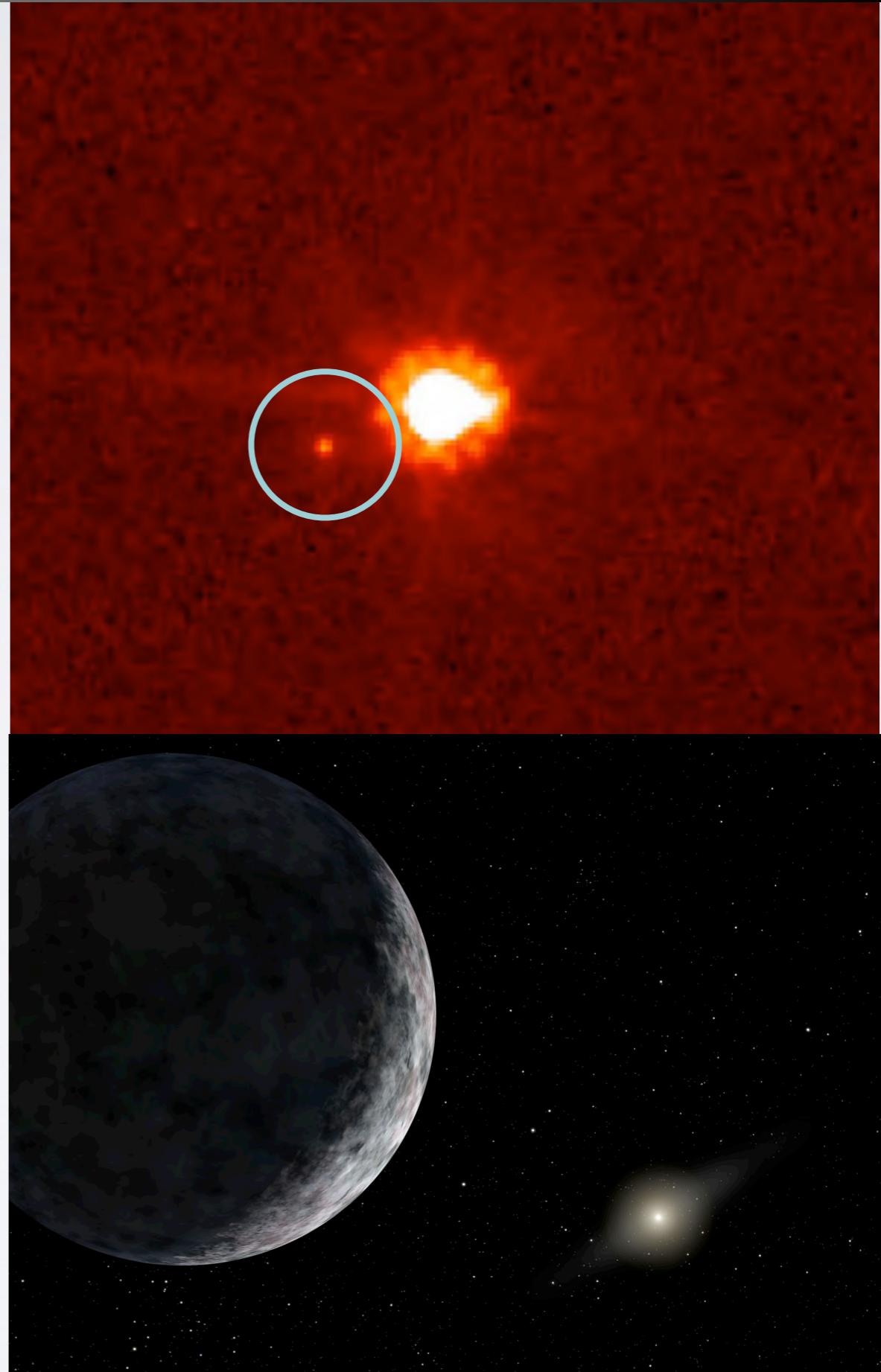


# Découverte des objets transneptuniens

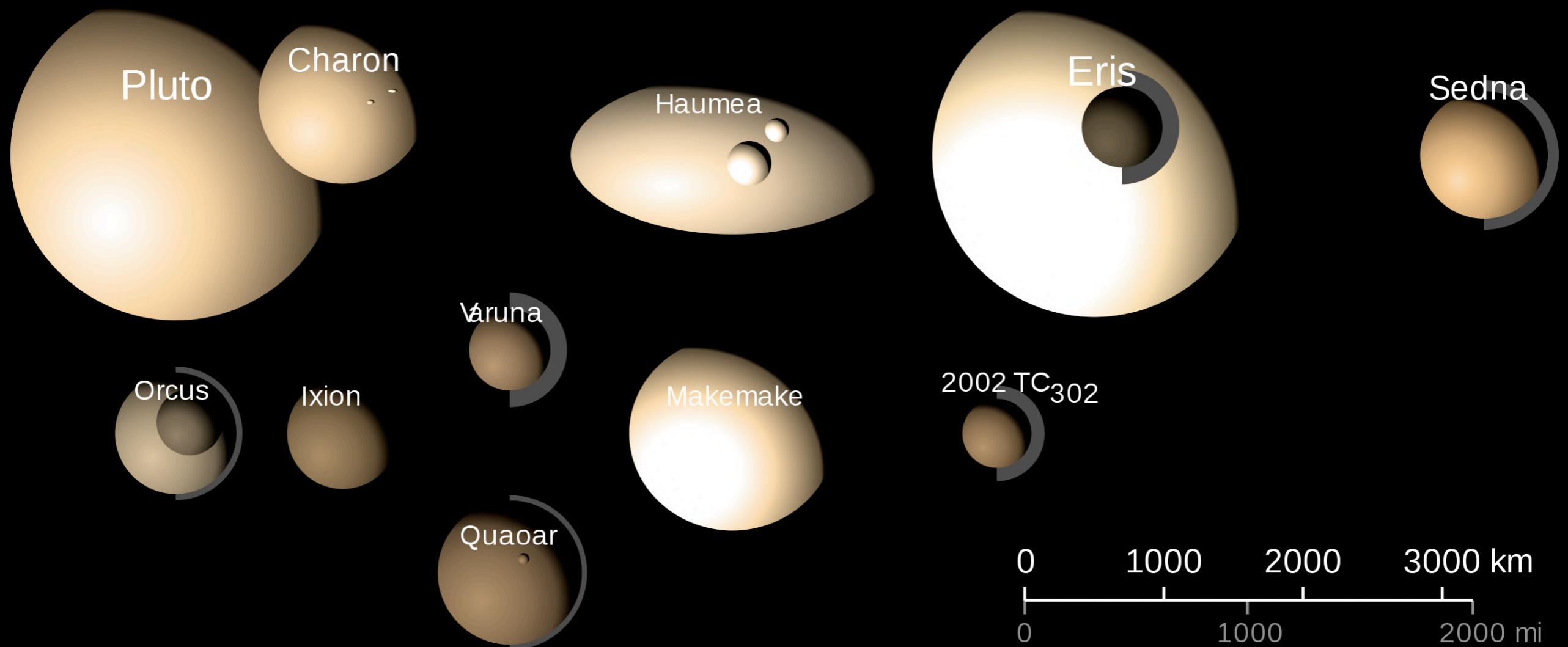
- 2005: **Eris**
  - Diamètre: 2326 km
  - Masse:  $1,66 \times 10^{22}$  kg
  - Demi-grand axe: 68 u.a.

Rappel: Pluton

- Diamètre: 2370 km
- Demi-grand axe: 39 u.a.
- Masse:  $1,31 \times 10^{22}$  kg

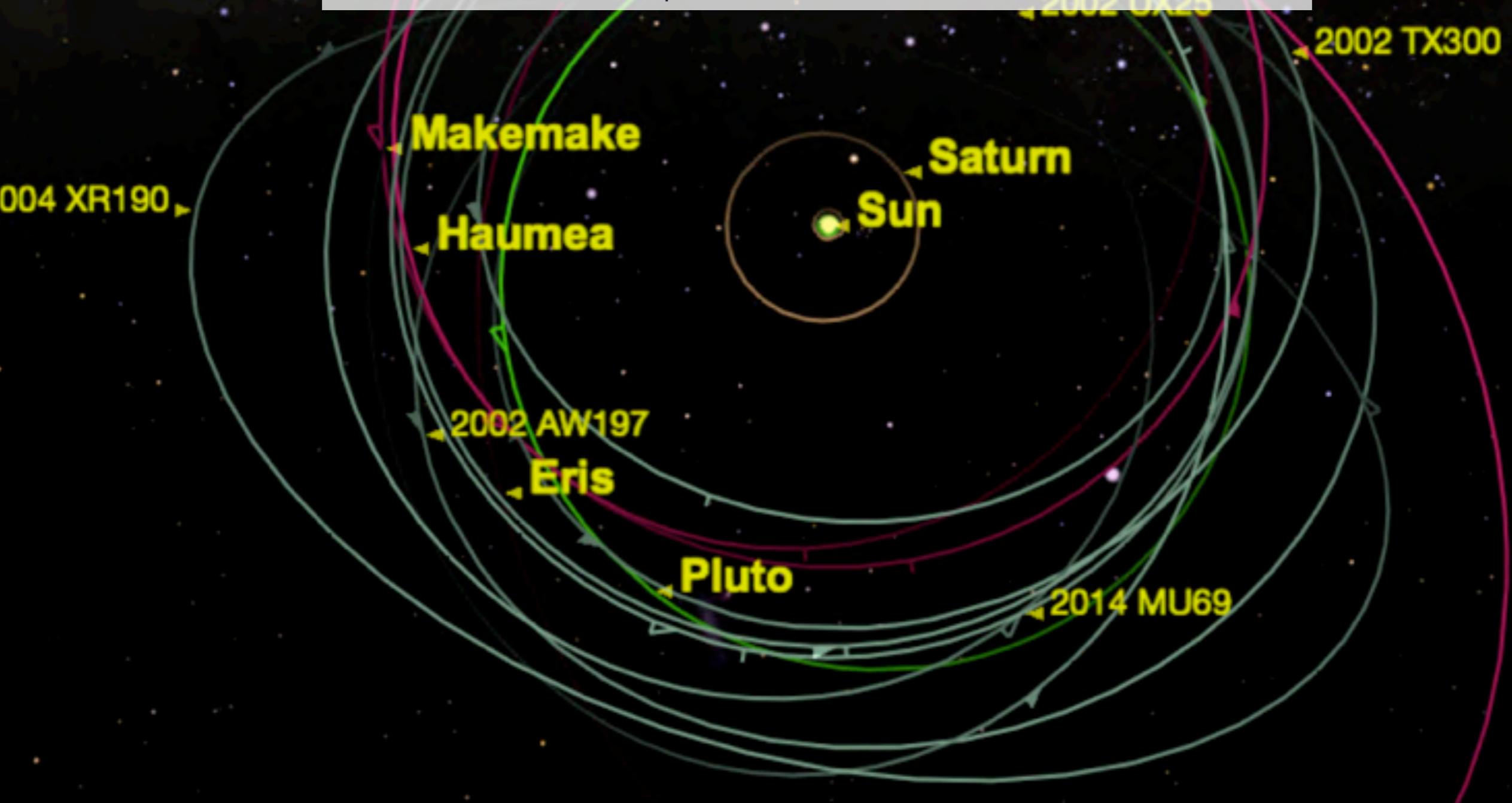


# Les (gros) objets transneptuniens



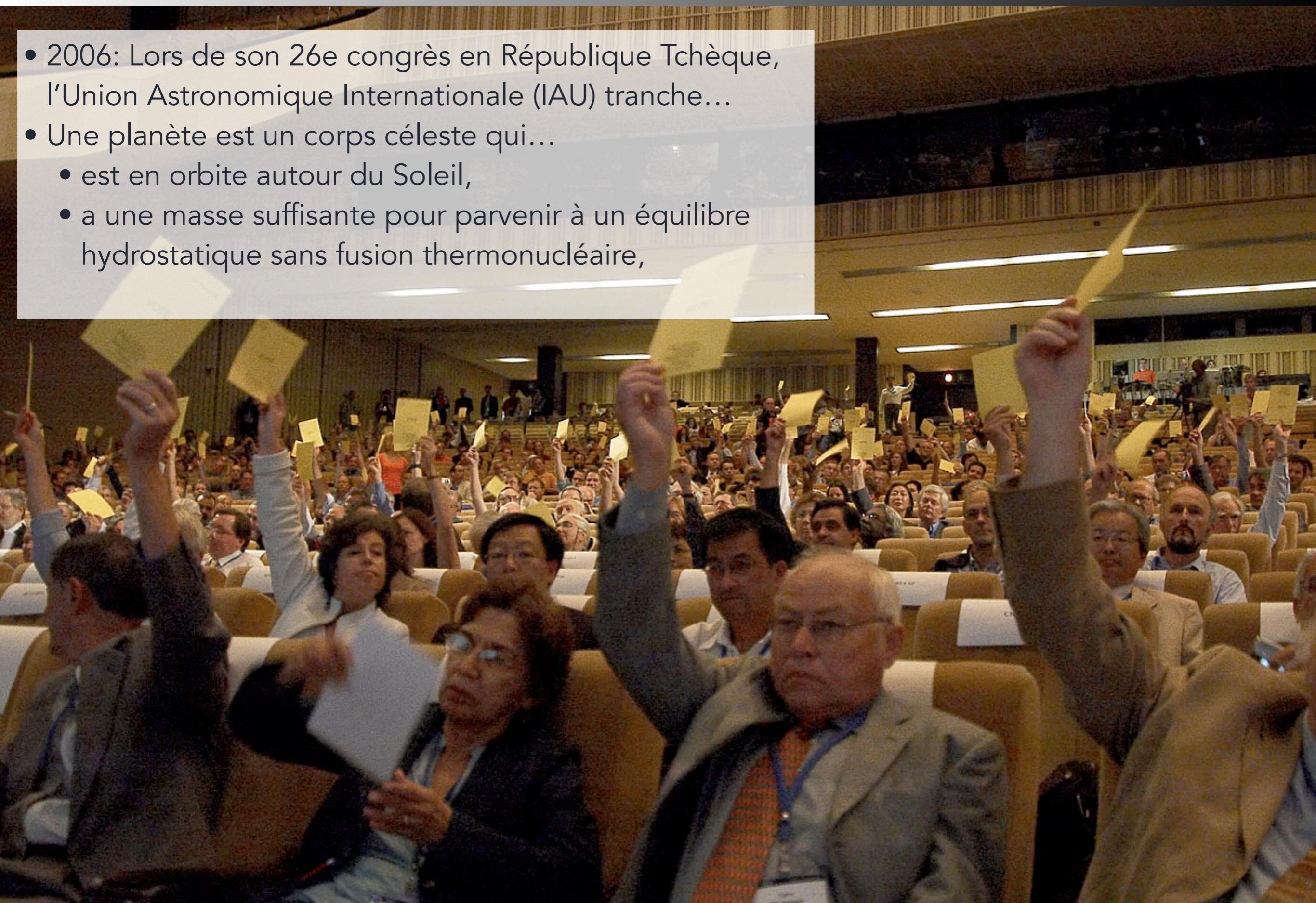
# Pluton est-elle une planète?

- Si Pluton est une planète, elle est particulière (tellurique, plus petite que certaines lunes, la plus lointaine, etc.)
- Si Pluton est une planète, Eris en est une aussi!
- Et pourquoi pas Hauméa, Makémaké, ou Sedna?
- Classification en 9 planètes difficilement tenable!



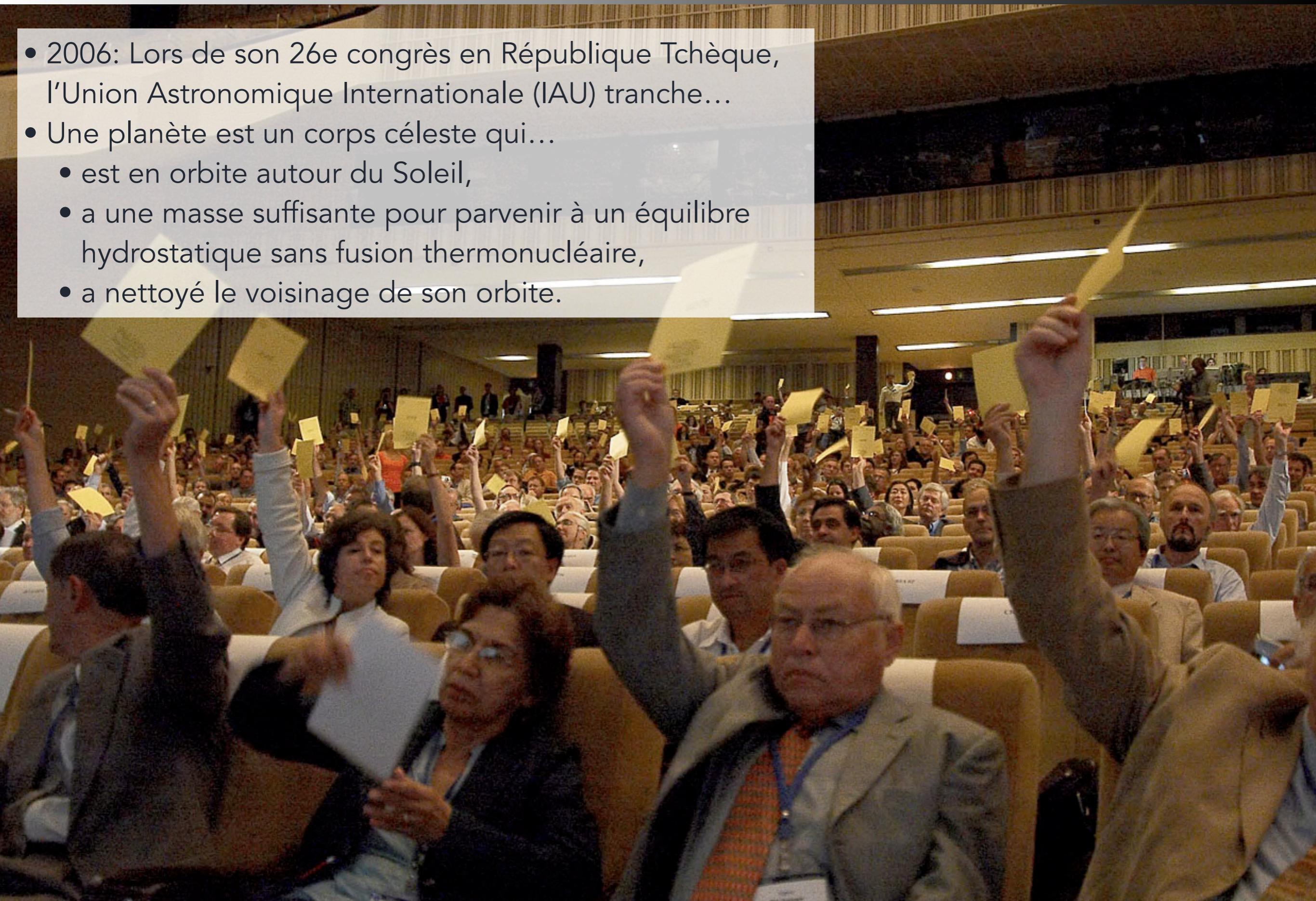
# Pluton est-elle une planète?

- 2006: Lors de son 26e congrès en République Tchèque, l'Union Astronomique Internationale (IAU) tranche...
- Une planète est un corps céleste qui...
  - est en orbite autour du Soleil,
  - a une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique sans fusion thermonucléaire,



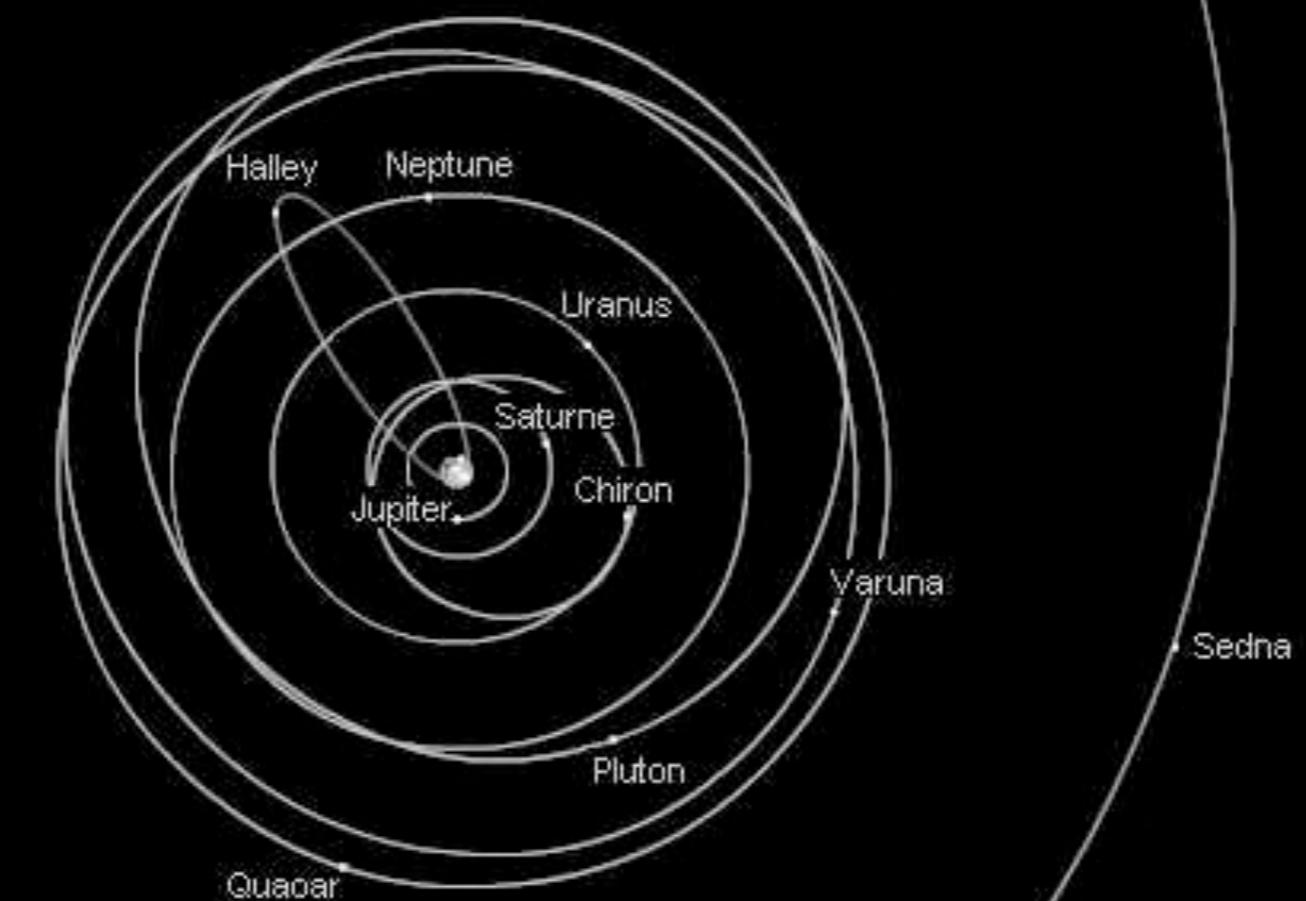
# Pluton est-elle une planète?

- 2006: Lors de son 26e congrès en République Tchèque, l'Union Astronomique Internationale (IAU) tranche...
- Une planète est un corps céleste qui...
  - est en orbite autour du Soleil,
  - a une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique sans fusion thermonucléaire,
  - a nettoyé le voisinage de son orbite.



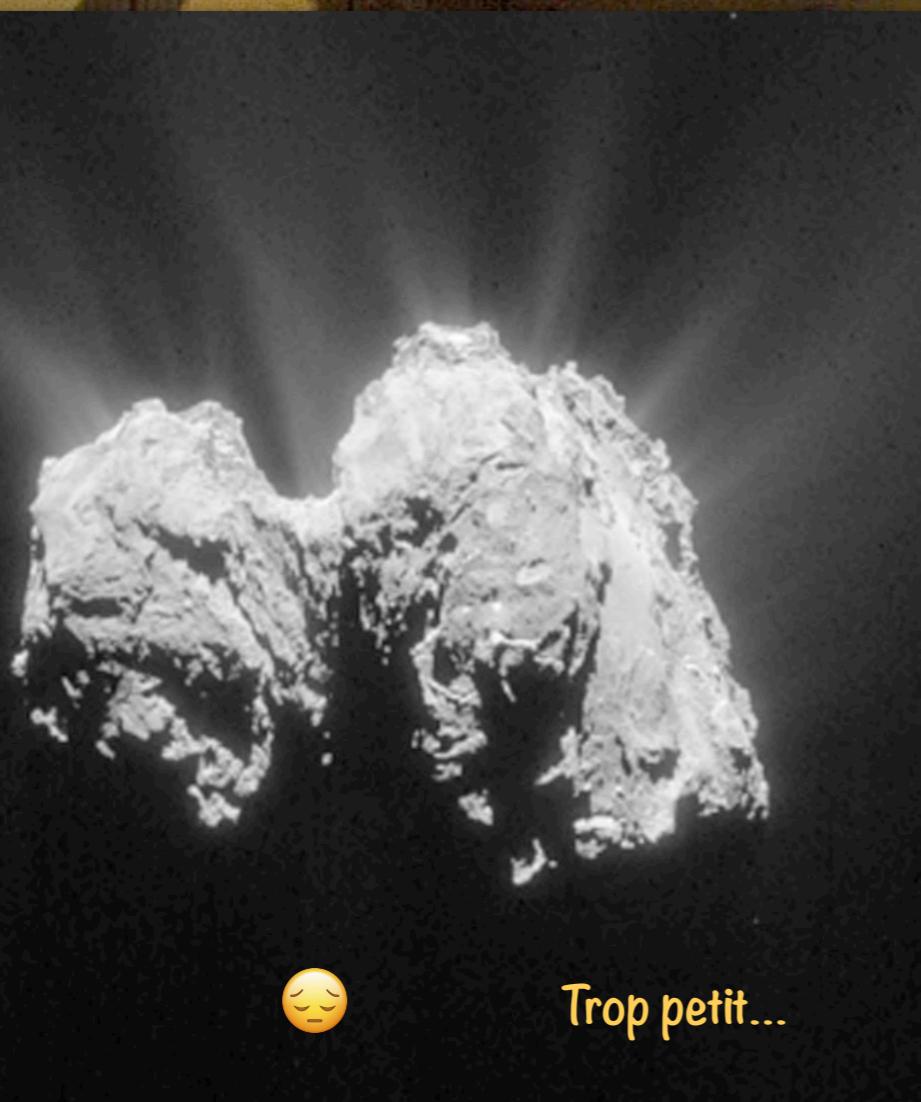
# Pluton est-elle une planète?

- 2006: Lors de son 26e congrès en République Tchèque, l'Union Astronomique Internationale (IAU) tranche...
- Une planète est un corps céleste qui...
  - **est en orbite autour du Soleil,**
  - a une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique sans fusion thermonucléaire,
  - a nettoyé le voisinage de son orbite.



# Pluton est-elle une planète?

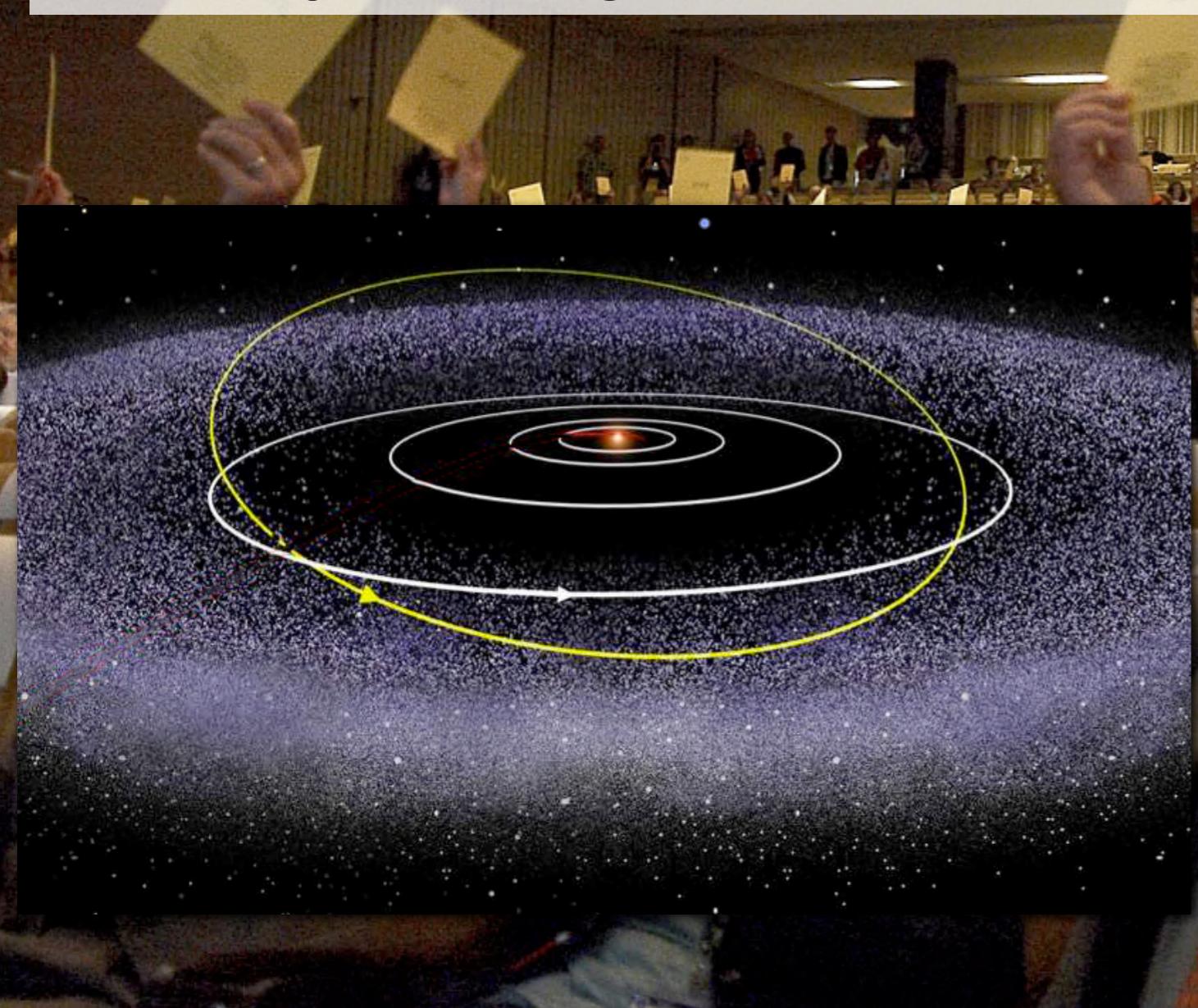
- 2006: Lors de son 26e congrès en République Tchèque, l'Union Astronomique Internationale (IAU) tranche...
- Une planète est un corps céleste qui...
  - est en orbite autour du Soleil,
  - **a une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique sans fusion thermonucléaire,**
  - a nettoyé le voisinage de son orbite.



Trop massif...

# Pluton est-elle une planète?

- 2006: Lors de son 26e congrès en République Tchèque, l'Union Astronomique Internationale (IAU) tranche...
- Une planète est un corps céleste qui...
  - est en orbite autour du Soleil,
  - a une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique sans fusion thermonucléaire,
  - **a nettoyé le voisinage de son orbite.**



# Pluton est-elle une planète?

- 2006: Lors de son 26e congrès en République Tchèque, l'Union Astronomique Internationale (IAU) tranche...
- Une planète est un corps céleste qui...
  - est en orbite autour du Soleil,
  - a une masse suffisante pour parvenir à un équilibre hydrostatique sans fusion thermonucléaire,
  - a **nettoyé le voisinage de son orbite.**

Pluton n'est **PAS** une planète!

---

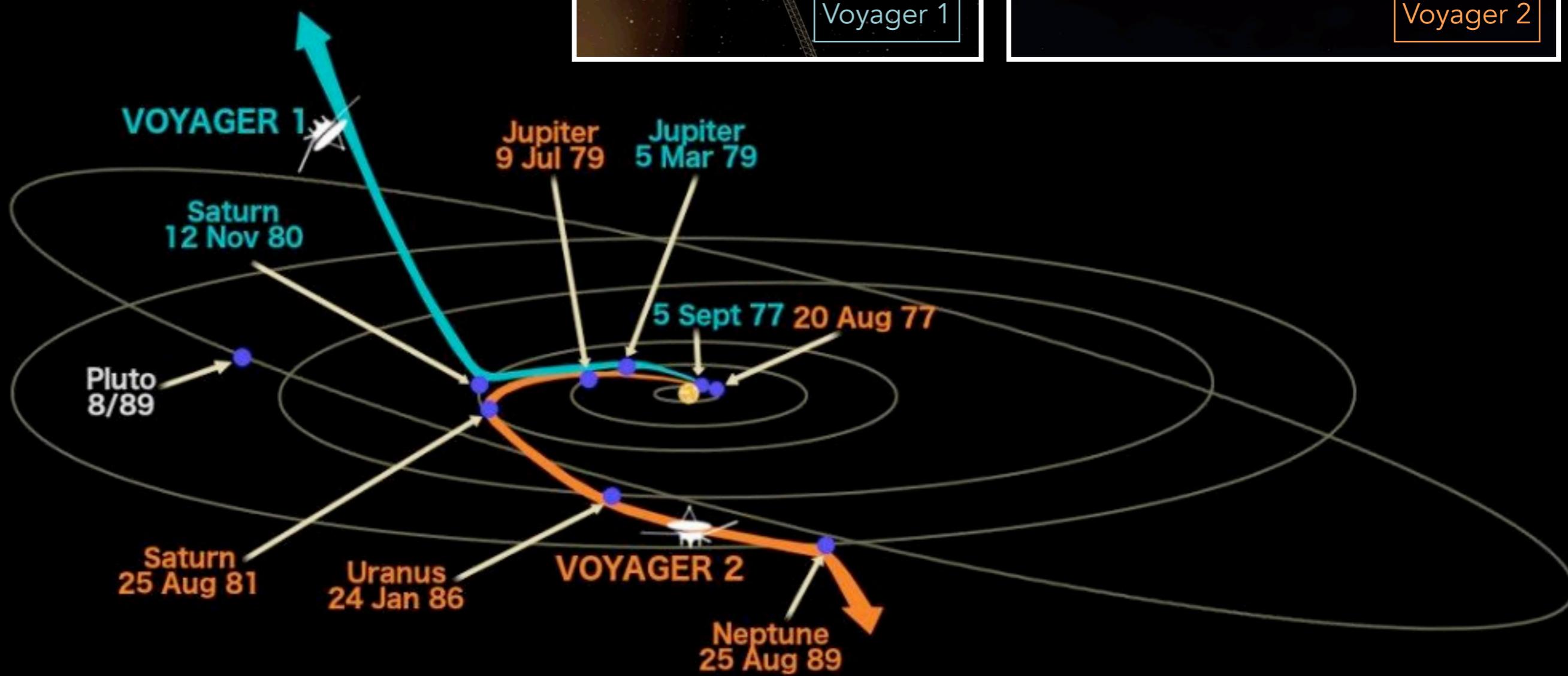
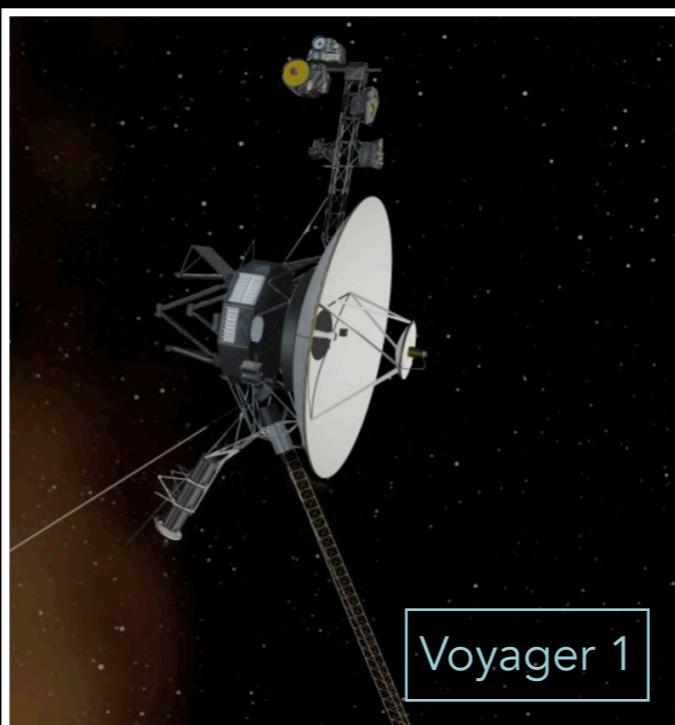
# New Horizons

---

# Exploration de Pluton

1977-1989

- Voyager 1: Titan et les anneaux de Saturne furent préférés
- Voyager 2: Impossible



# Exploration de Pluton

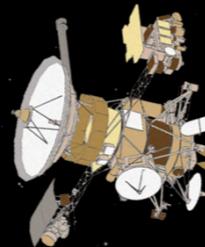
The long road to a Pluto mission



1977  
Voyager 1  
722 kilograms  
\$1.7 billion\*



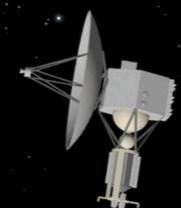
1990  
Pluto 350  
350 kilograms  
\$543 million



1991  
Mariner Mark II  
2,000 kilograms  
\$3.2 billion



1991  
Pluto Fast Flyby  
140 kilograms  
\$2.1 billion



1995  
Pluto Express  
Pluto Kuiper Express  
175 kilograms  
\$1.4 billion



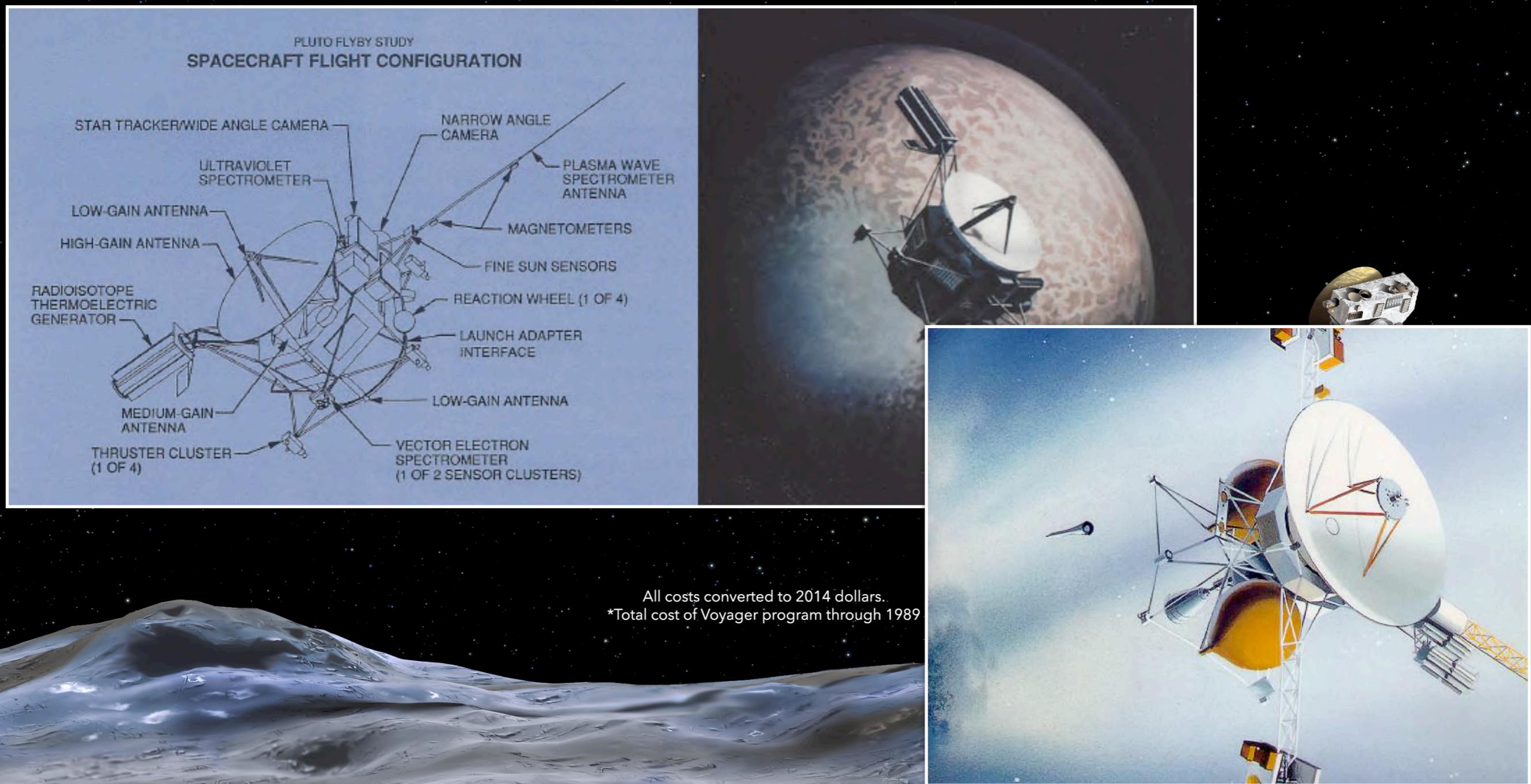
2001  
New Horizons  
385 kilograms  
\$646 million

All costs converted to 2014 dollars.

\*Total cost of Voyager program through 1989

# Exploration de Pluton

- **Pluto 350 et Mariner Mark II:** Premières idées d'exploration directe de Pluton



# Exploration de Pluton

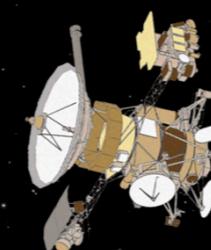
- **Pluto Fast Flyby:** Idée similaire, mais techniquement plus réaliste (→ Pluto 350 et Mariner Mark II abandonnées)
- Idée: envoyer 2 sondes pour photographier les 2 faces de Pluton en 2010
- ...mais les coûts ont vite augmenté...



1977  
Voyager 1  
722 kilograms  
\$1.7 billion\*

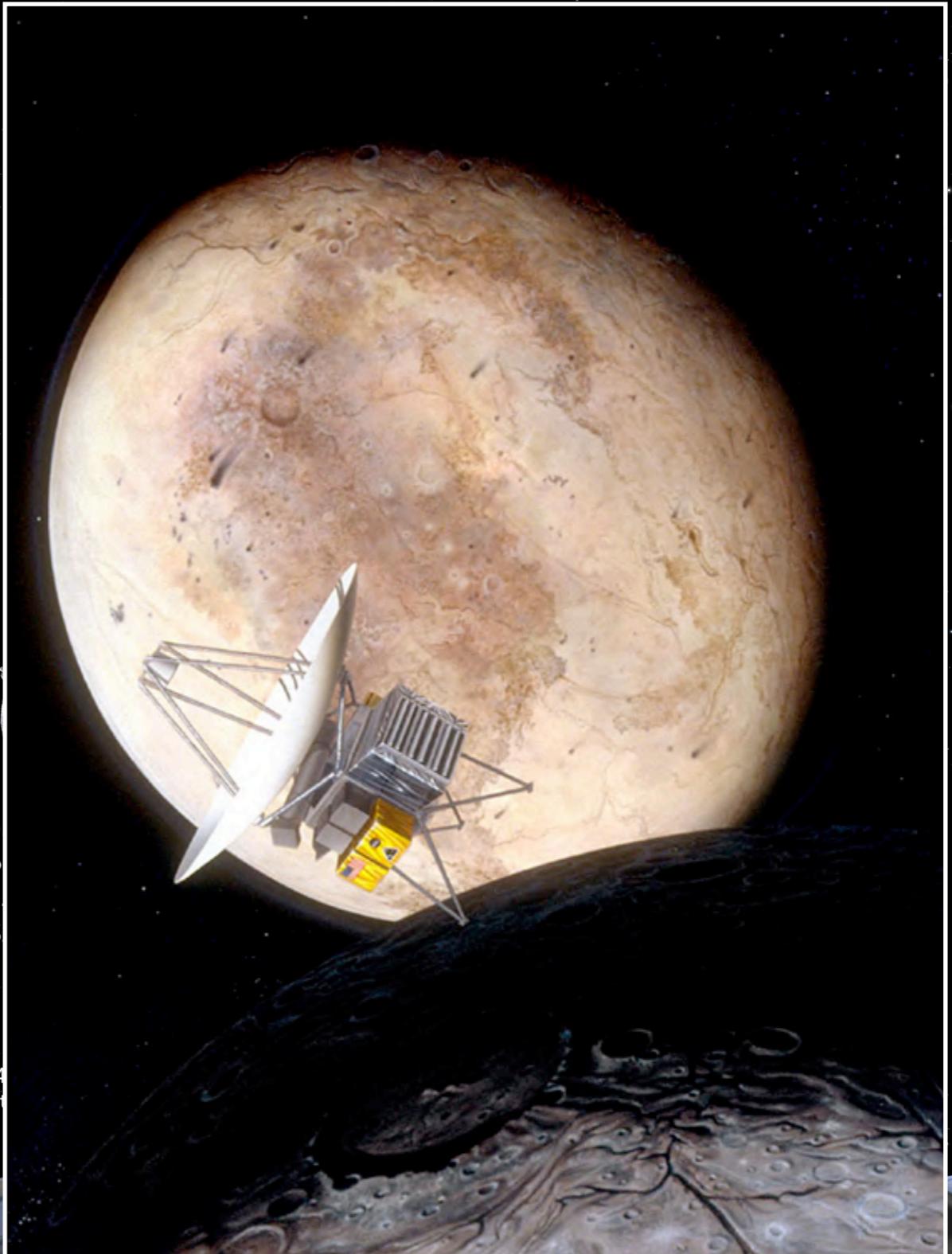


1990  
Pluto 350  
350 kilograms  
\$543 million



1991  
Mariner Mark II  
2,000 kilograms  
\$3.2 billion

All costs converted to 2014  
\*Total cost of Voyager program



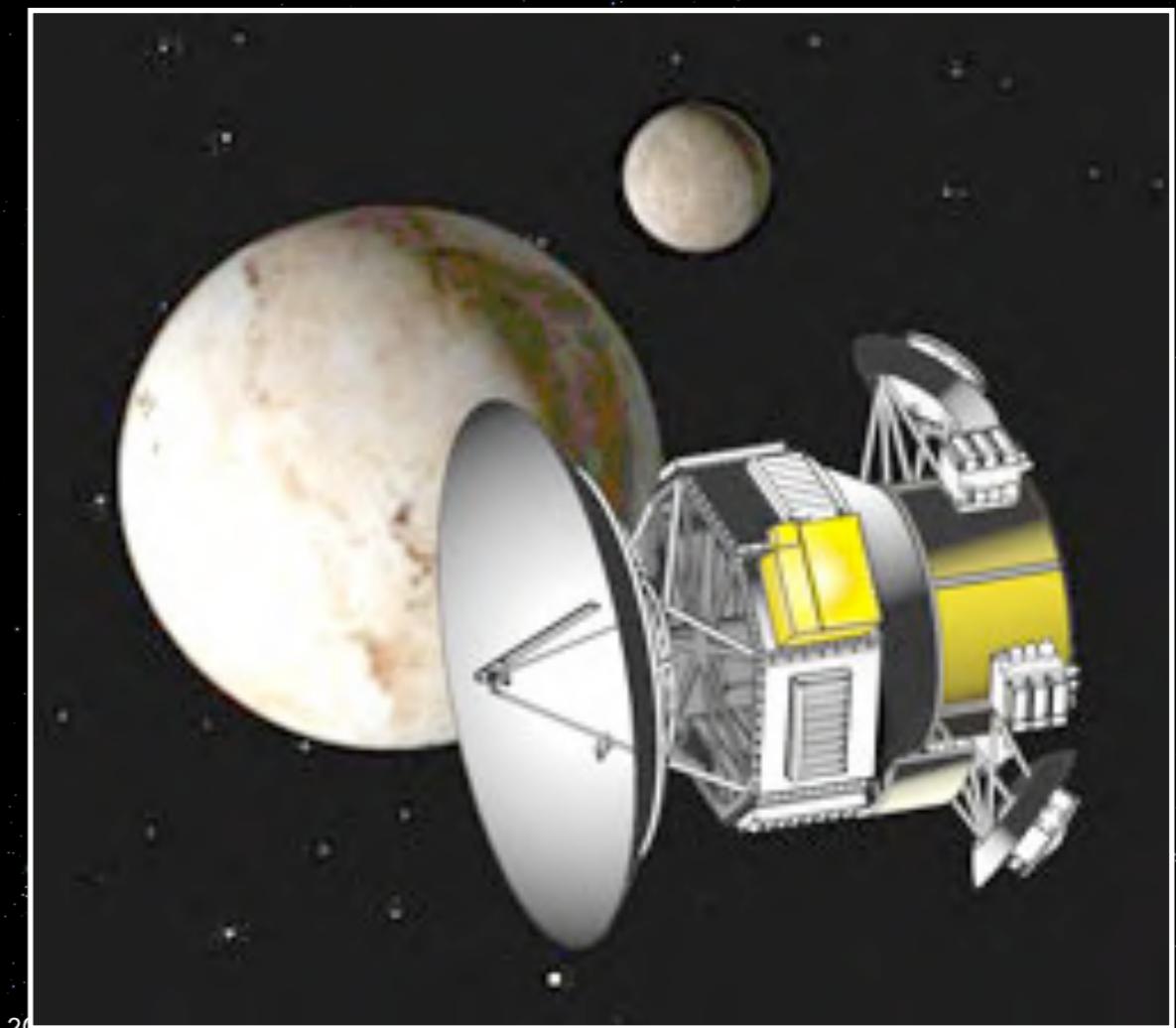
# Exploration de Pluton

- Découverte de la ceinture de Kuiper en 1992 -> regain d'intérêt de la NASA!
- Plus grande enveloppe autorisée...
- **Pluto Kuiper Express:** observation de Pluto... mais aussi d'autres objets de la ceinture de Kuiper!
- Mais plusieurs problèmes (retard du développement du moteur, explosion du budget, etc...)
- 2000: Mission officiellement annulée :(

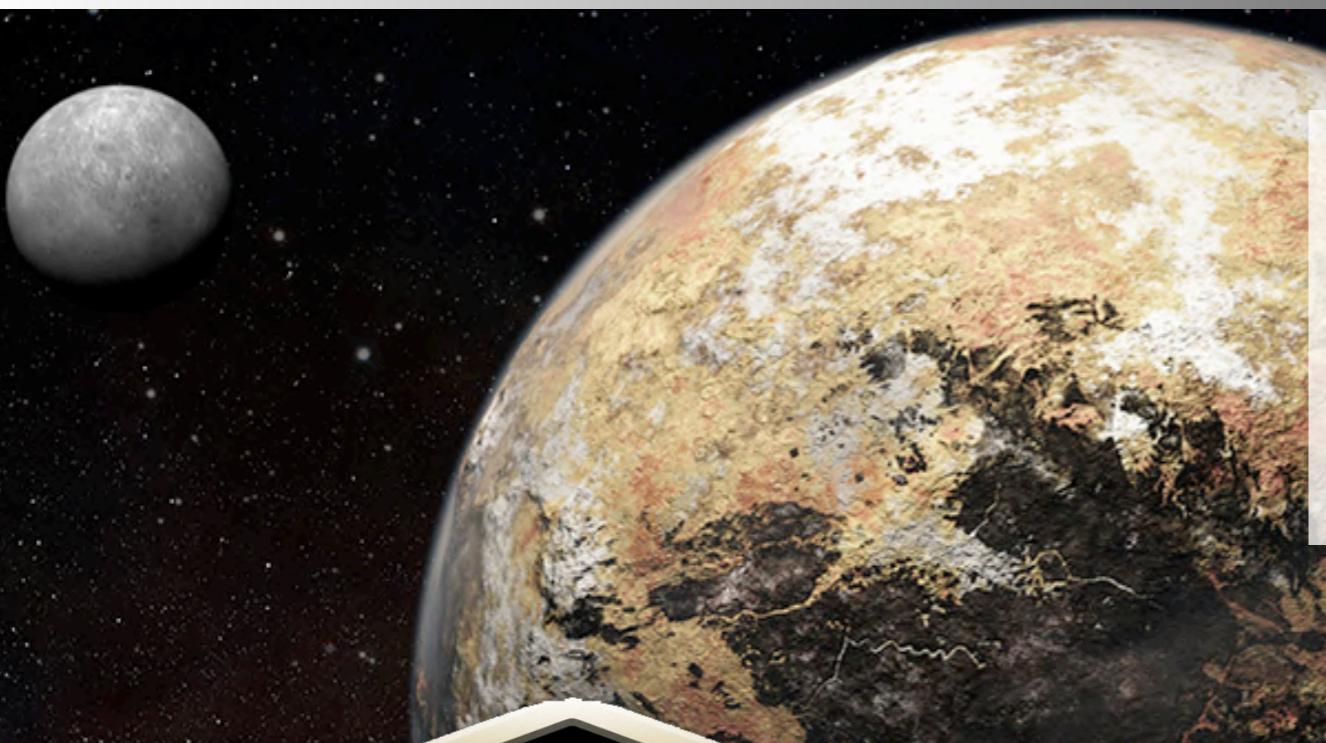
1977  
Voyager 1  
722 kilograms  
\$1.7 billion\*

1990  
Pluto 350  
350 kilograms  
\$543 million

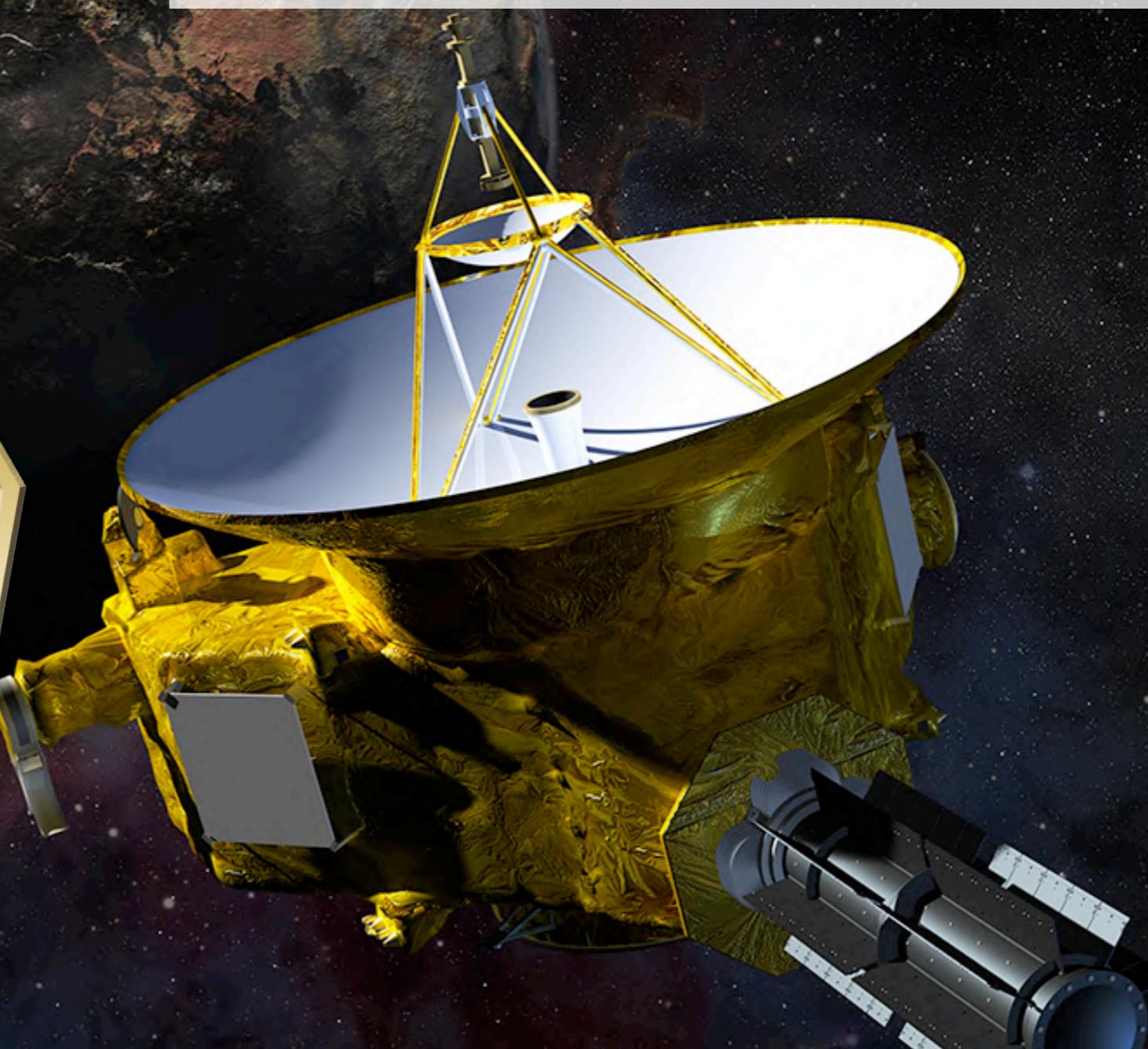
1991  
Mariner Mark II  
2,000 kilograms  
\$3.2 billion



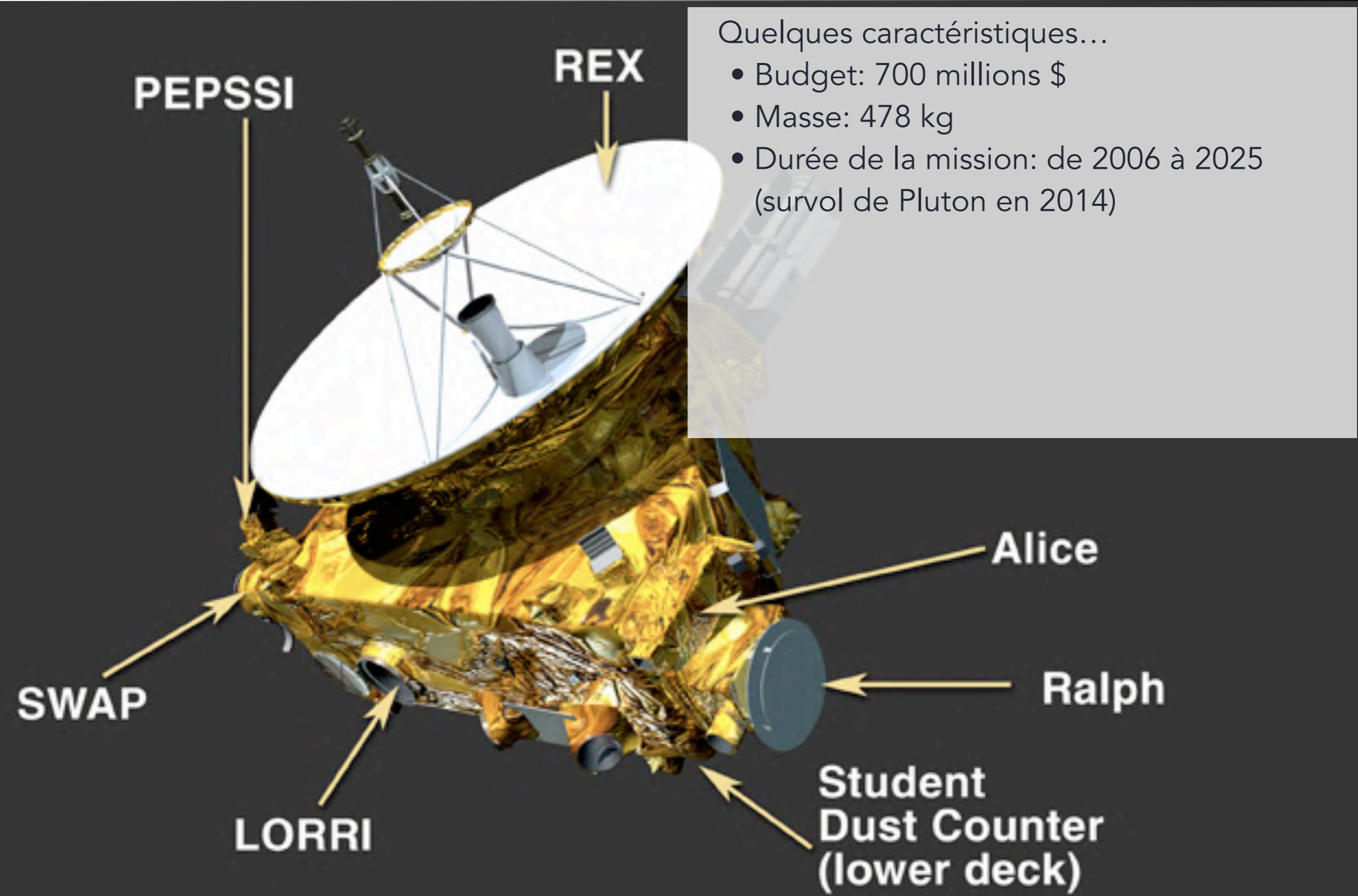
# Exploration de Pluton



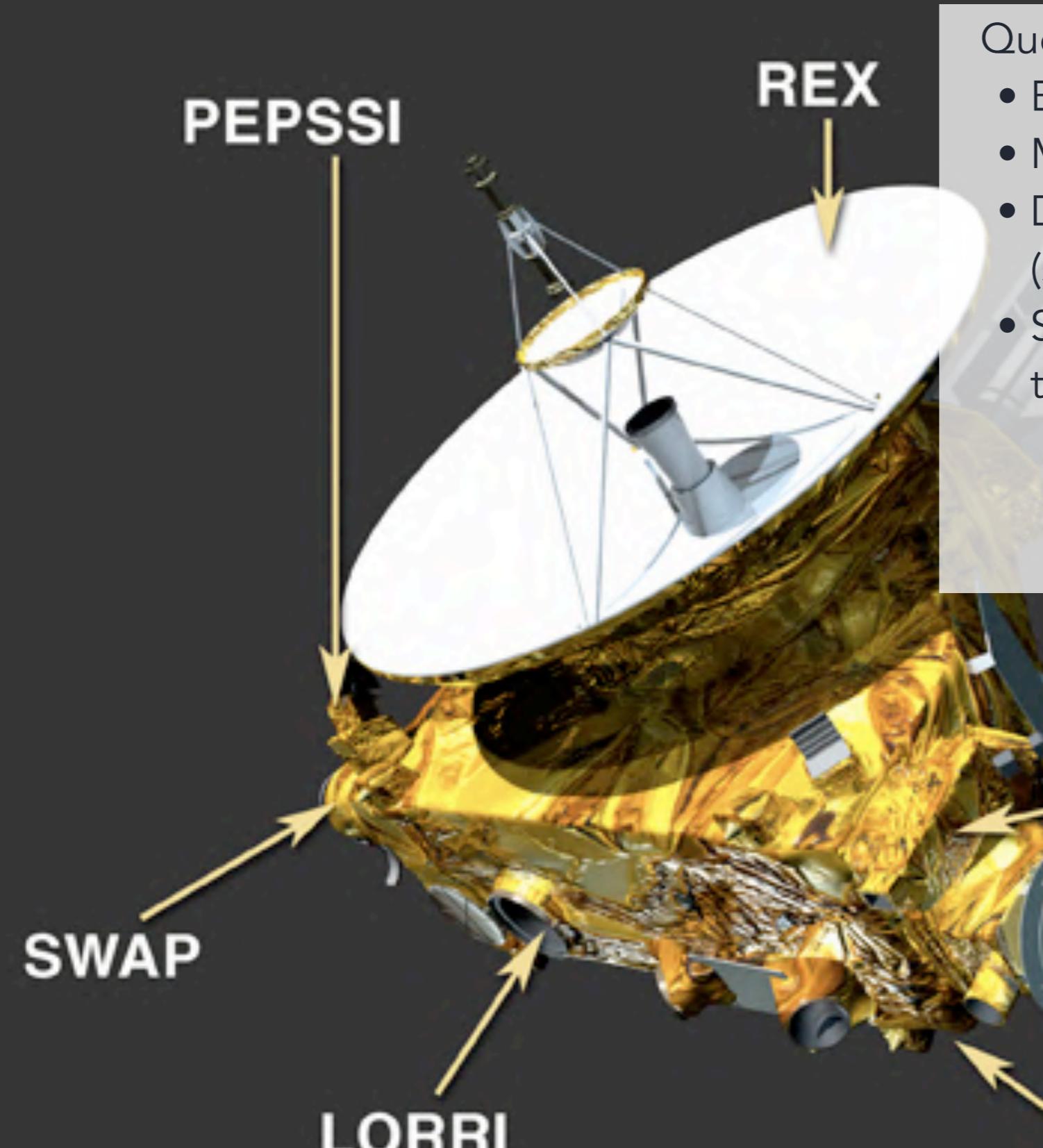
- 2001: Batailles politiques, négociations... et nouvel appel à projet pour explorer Pluton!
- **New Horizons**: mission adoptée!
- Lancement prévu pour 2005-2006...



# New Horizons



# New Horizons



Quelques caractéristiques...

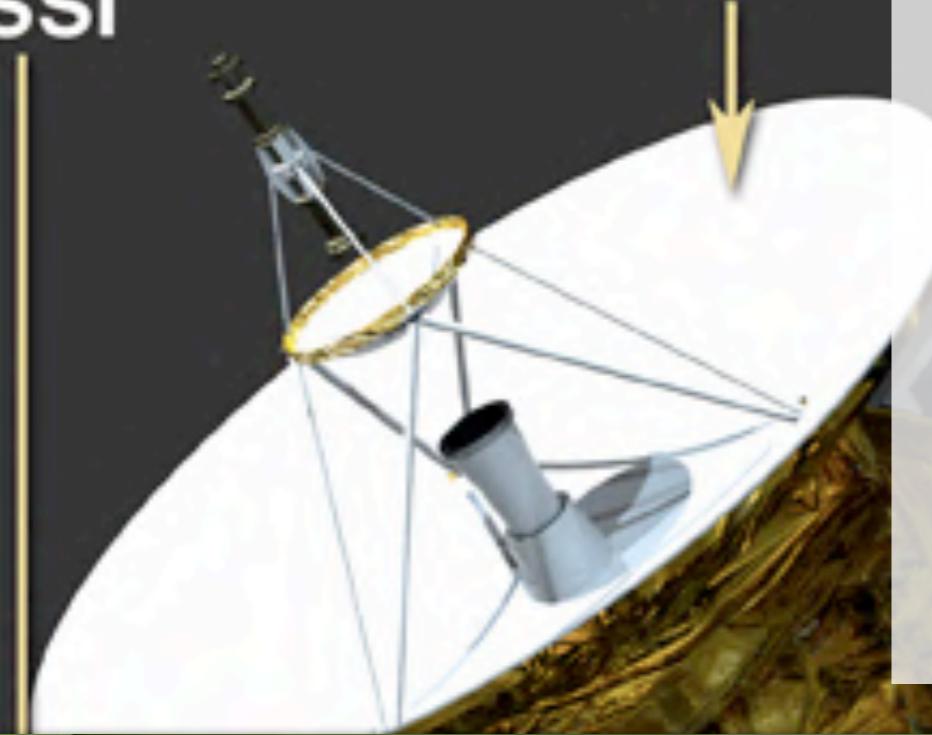
- Budget: 700 millions \$
- Masse: 478 kg
- Durée de la mission: de 2006 à 2025  
(survol de Pluton en 2014)
- Source d'énergie: générateur thermoélectrique à radio-isotopes



# New Horizons

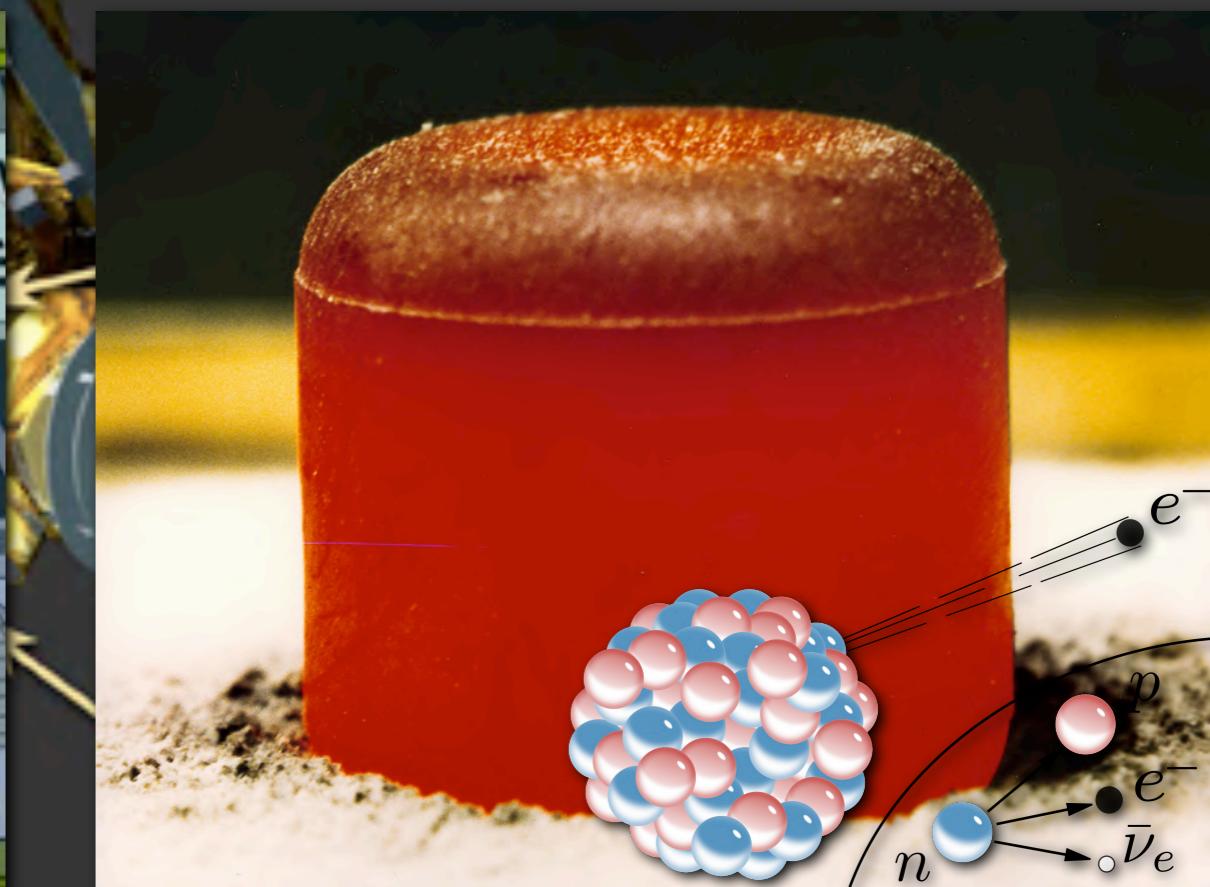
PEPSSI

REX



Quelques caractéristiques...

- Budget: 700 millions \$
- Masse: 478 kg
- Durée de la mission: de 2006 à 2025 (survol de Pluton en 2014)
- Source d'énergie: générateur thermoélectrique à radio-isotopes
- 8 instruments, dont 2 imageurs (Ralph/MVIC et LORRI) et 2 spectromètres (Alice et Ralph/LEISA)



# New Horizons



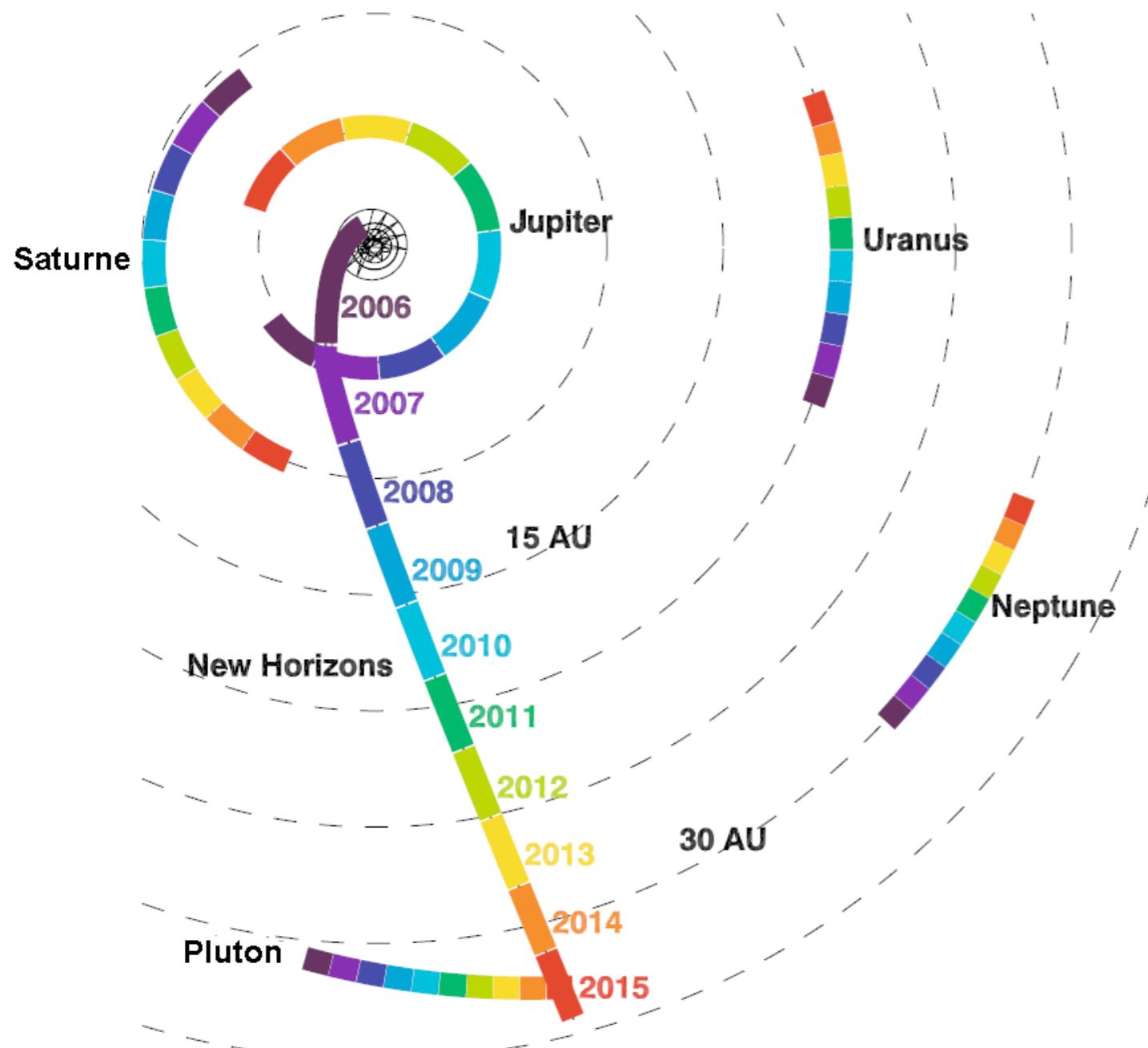
# New Horizons



# New Horizons



# New Horizons



# New Horizons

19 janvier 2006: lancement!



# New Horizons

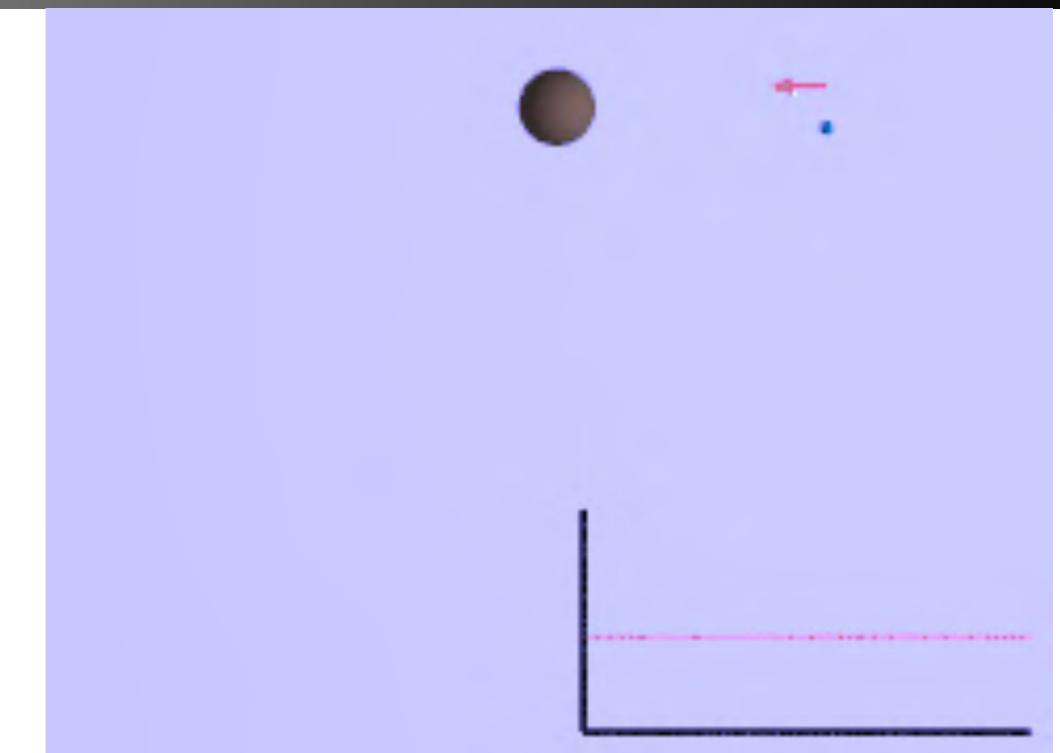
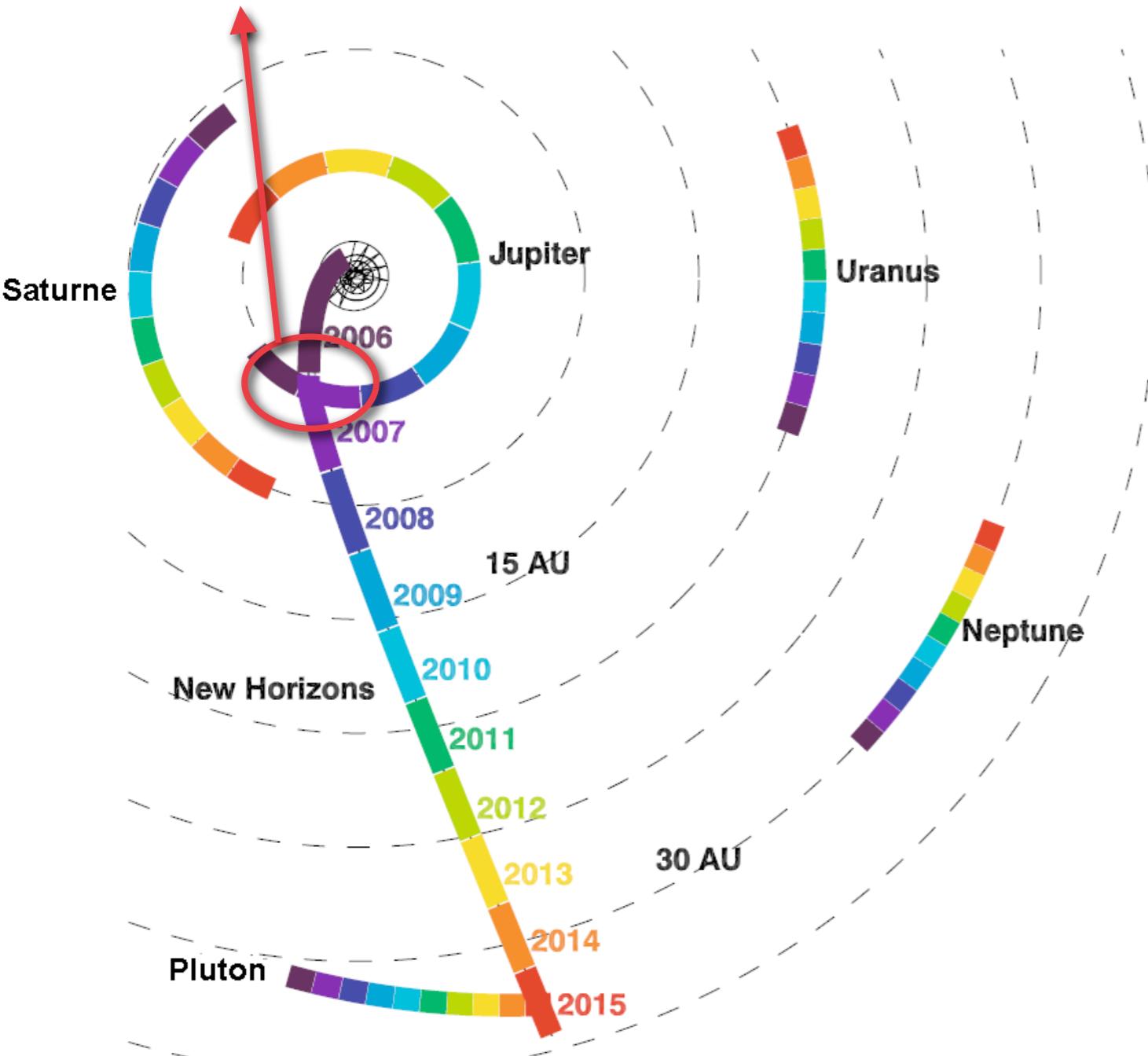
19 janvier 2006: lancement!



January 19, 2006  
Launch Complex 41  
Cape Canaveral Air Force Station

# New Horizons

28 février 2006: survol de Jupiter,  
assistance gravitationnelle!



Les vitesses dans le référentiel de la planète sont représentées en bleu

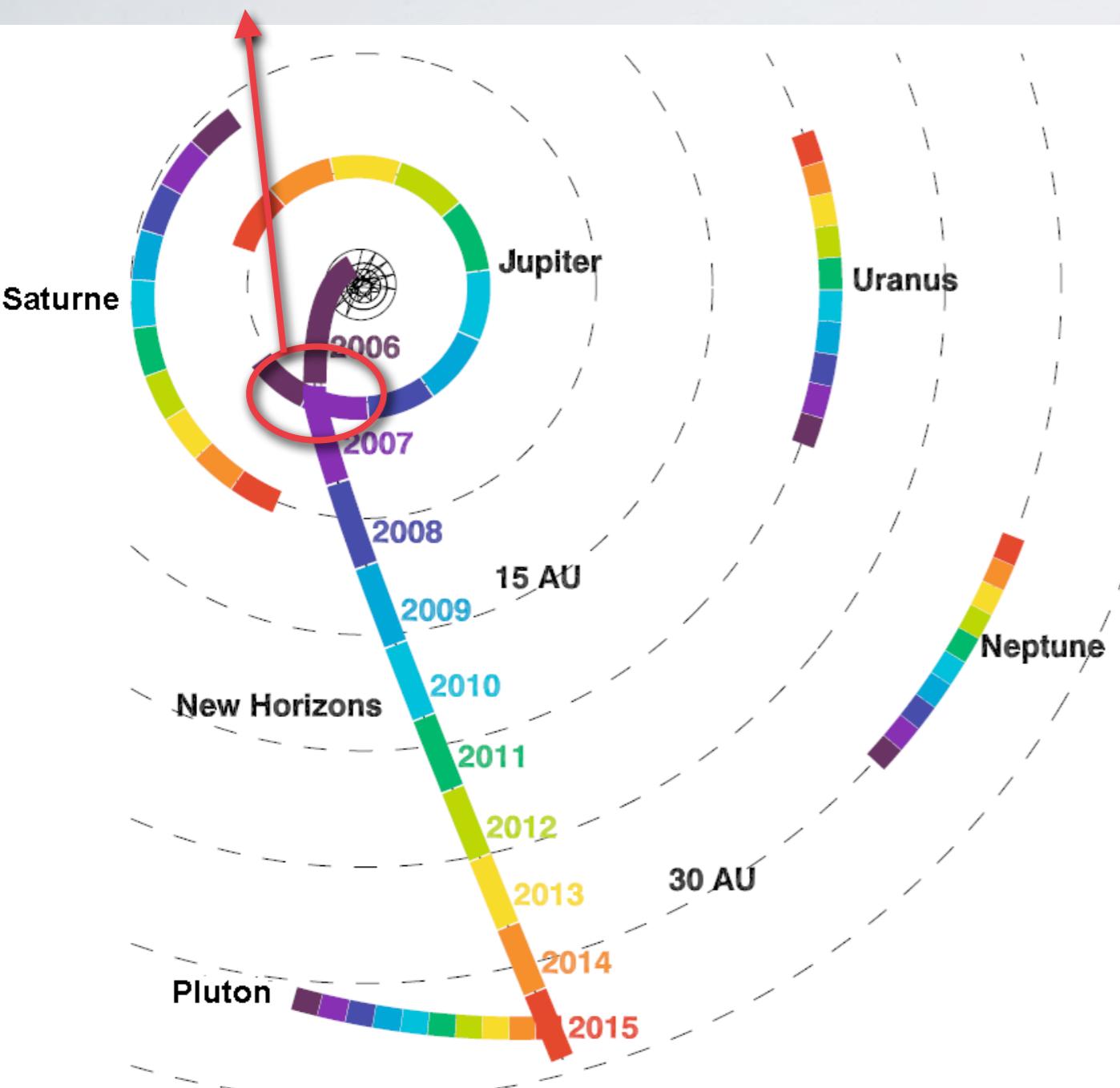
périgée de la trajectoire de la sonde  
 $\vec{v}$   $\vec{v}_p$  Planète

Les vitesses dans le référentiel de Copernic sont représentées en rouge

$|\vec{v}' + \vec{v}_p| > |\vec{v} + \vec{v}_p|$  : la sonde est accélérée lors de son passage au voisinage de la planète

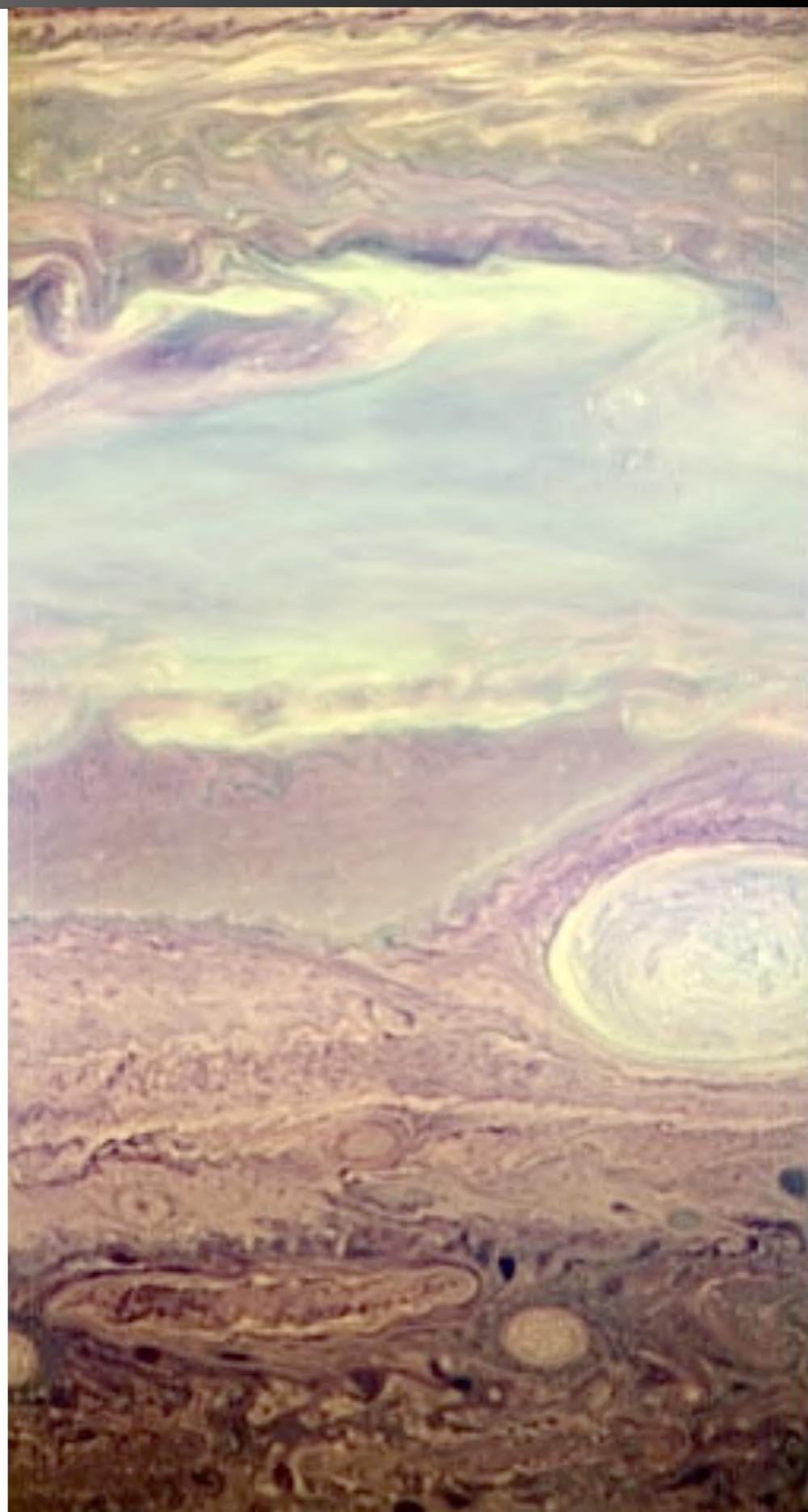
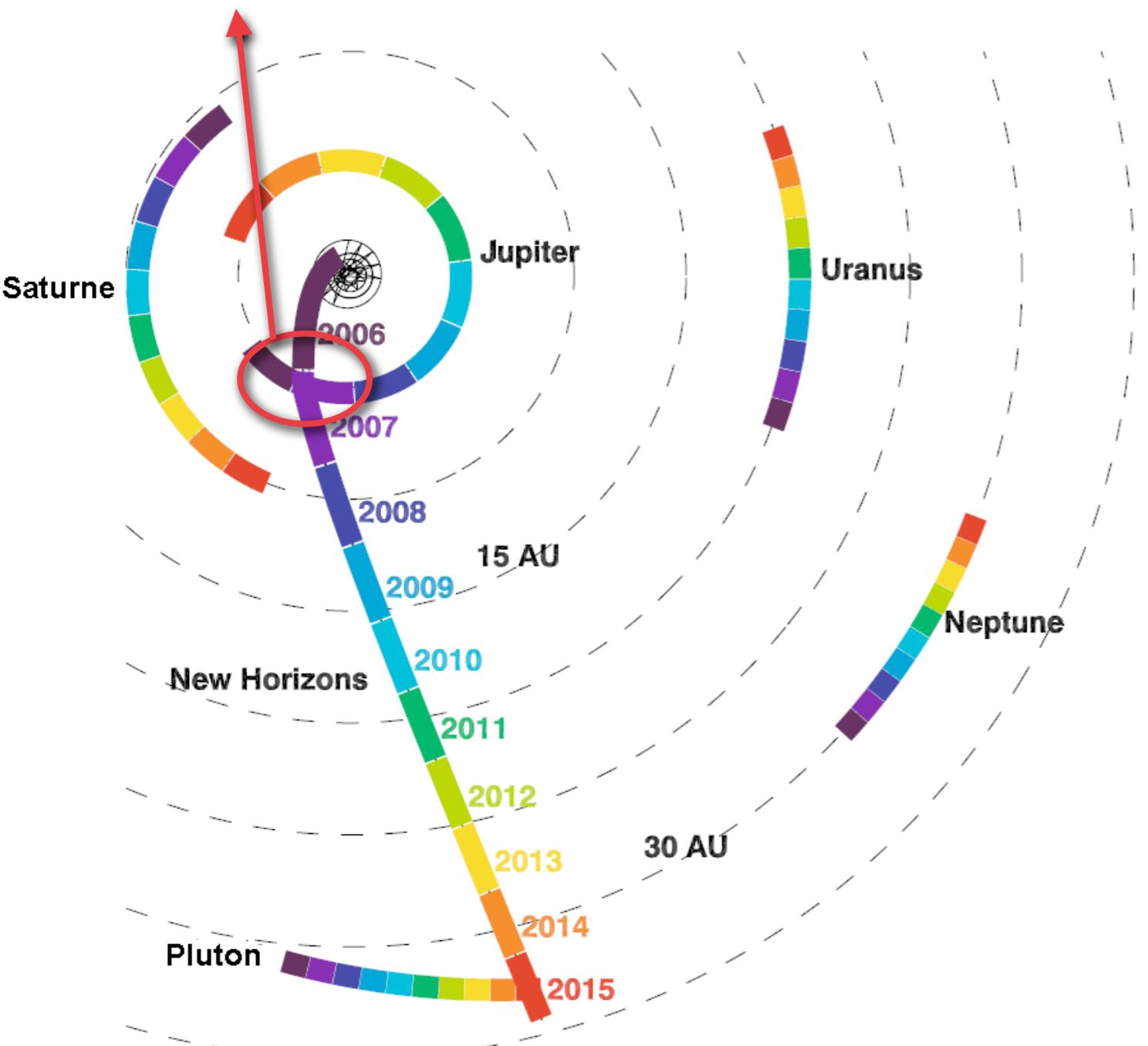
# New Horizons

28 février 2006: survol de Jupiter,  
assistance gravitationnelle!



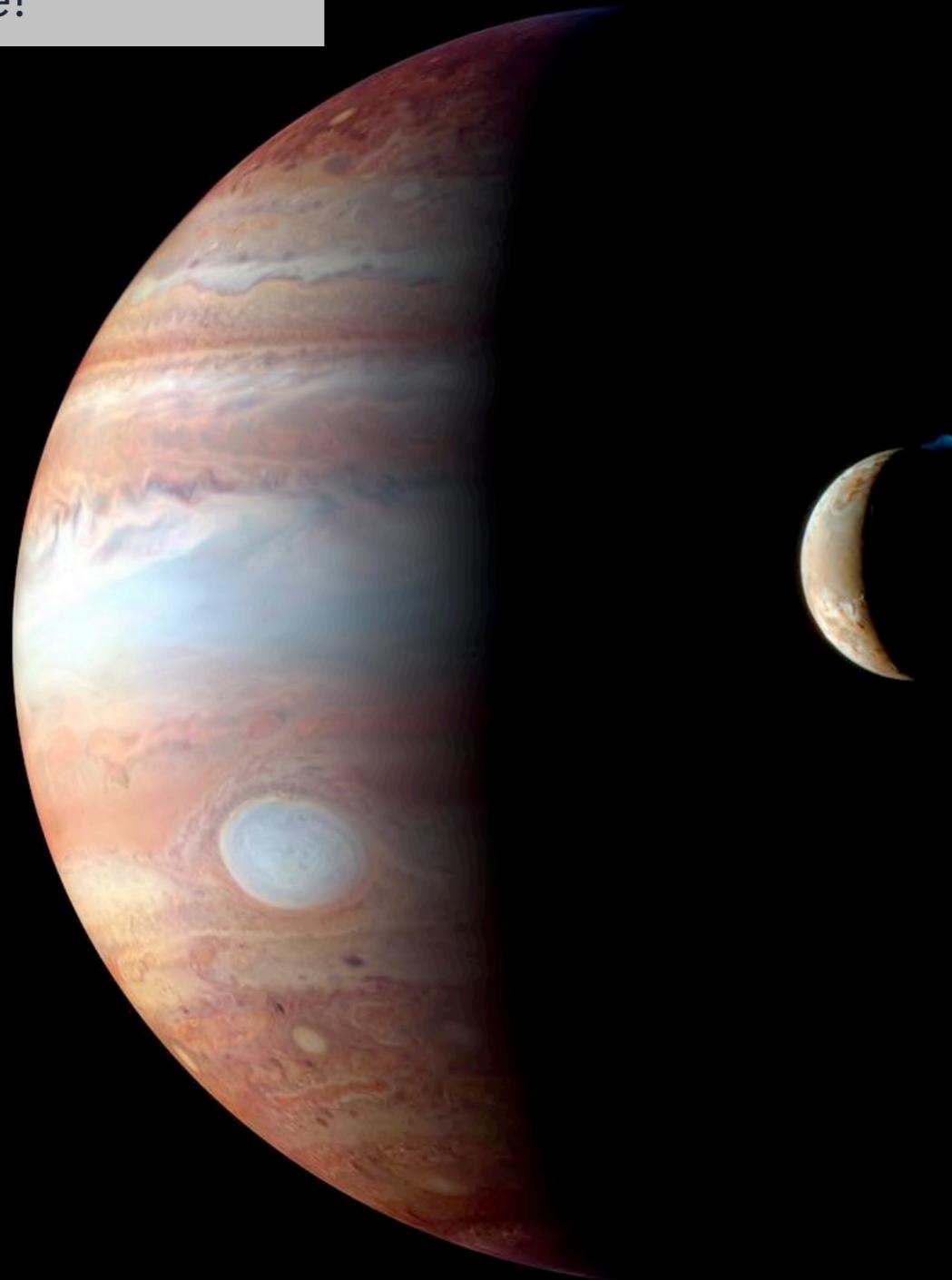
# New Horizons

28 février 2006: survol de Jupiter,  
assistance gravitationnelle!



# New Horizons

28 février 2006: survol de Jupiter,  
assistance gravitationnelle!



# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



25 janvier

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



9 avril

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



12 avril

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



15 avril

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



16 avril

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



8 mai

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



10 mai

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



12 mai

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



29 mai

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



31 mai

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



1 juin

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



2 juin

# New Horizons

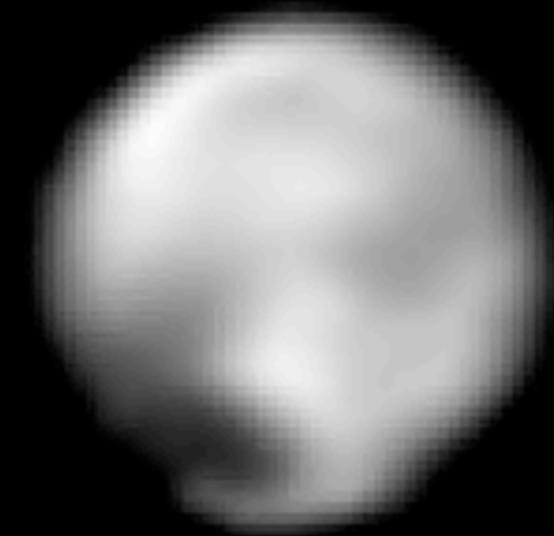
Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



5 juin

# New Horizons

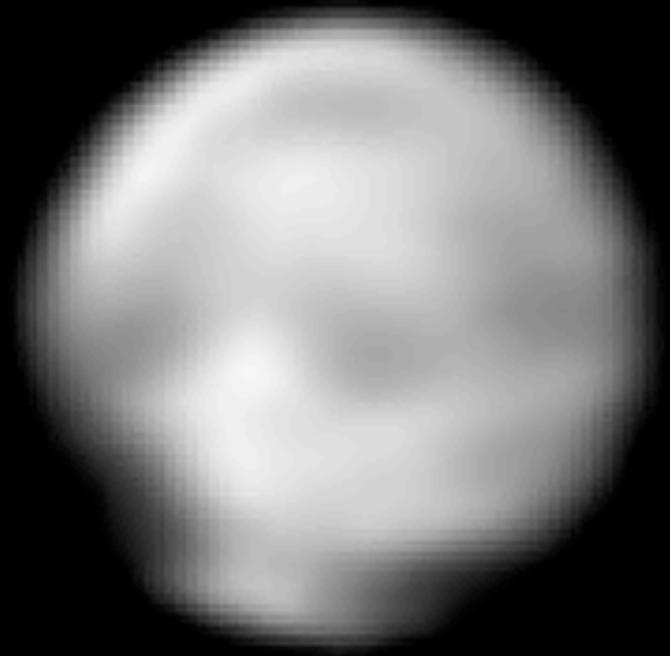
Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



12 juin

# New Horizons

Avril à juin 2015: Cap sur Pluton...



18 juin

# New Horizons

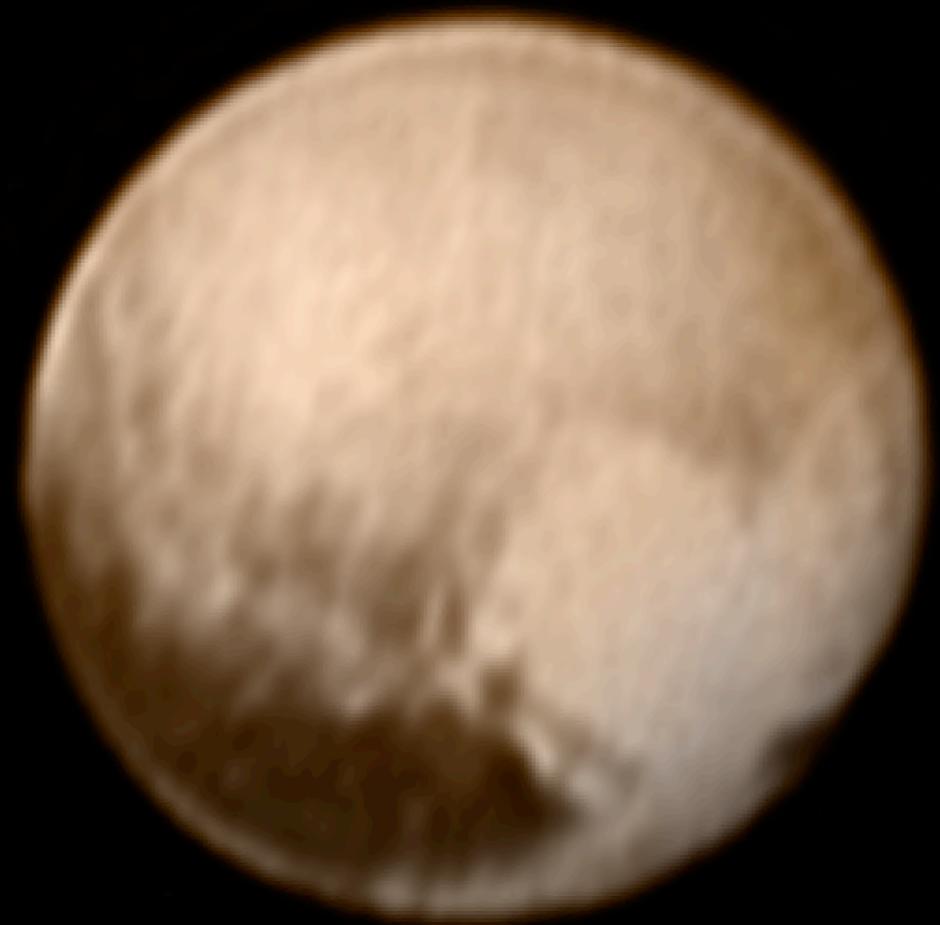
Juillet 2015: le rendez-vous!



3 juillet

# New Horizons

Juillet 2015: le rendez-vous!



8 juillet

# New Horizons

Juillet 2015: le rendez-vous!



New Horizons passe au plus près de  
Pluton à 11 095 km à une vitesse  
relative de 13,78 km/s

14 juillet

# New Horizons

Juillet 2015: le rendez-vous!



14 juillet

# New Horizons

Juillet 2015: le rendez-vous!

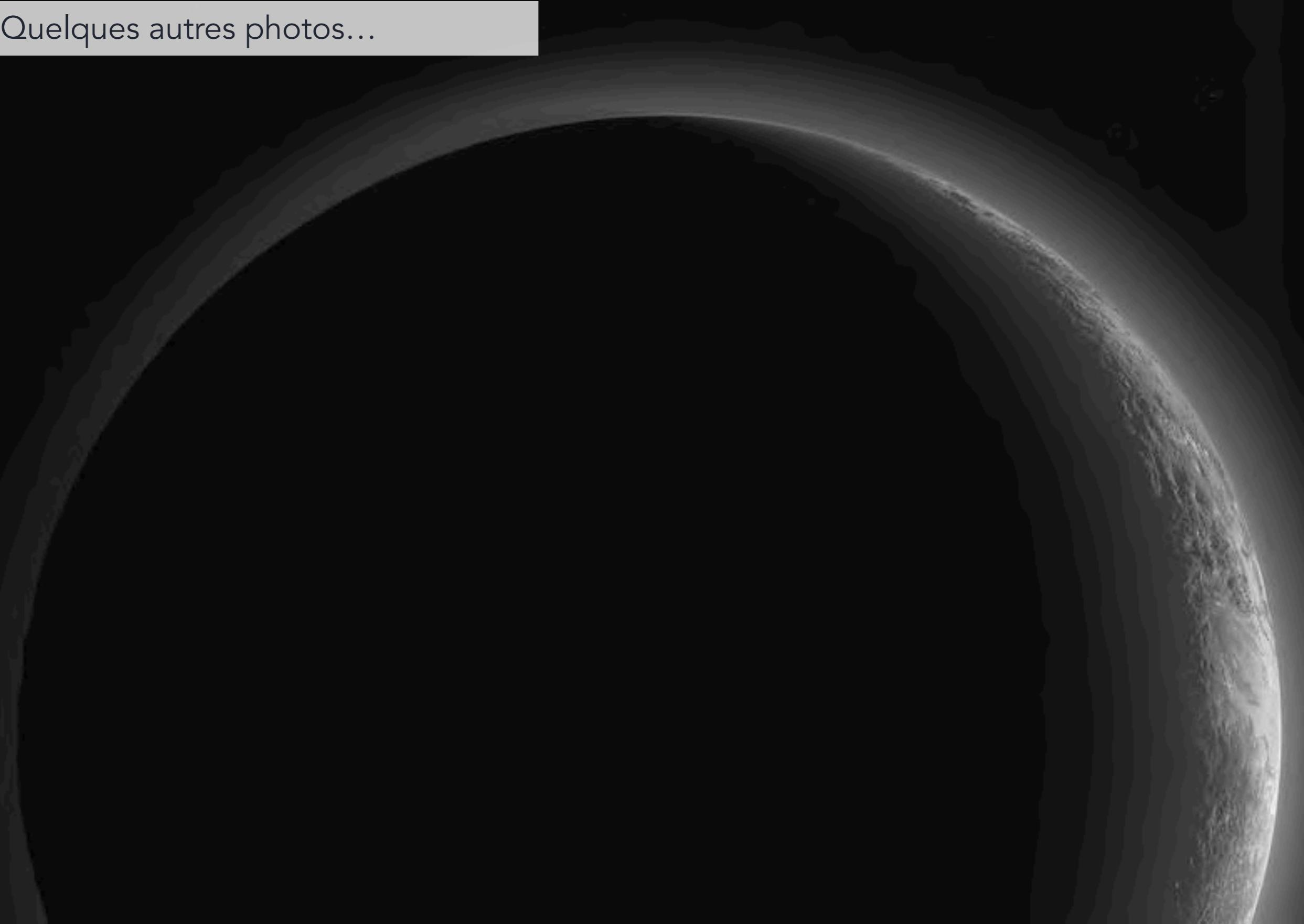


New Horizons passe au plus près de  
Pluton à 11 095 km à une vitesse  
relative de 13,78 km/s

14 juillet

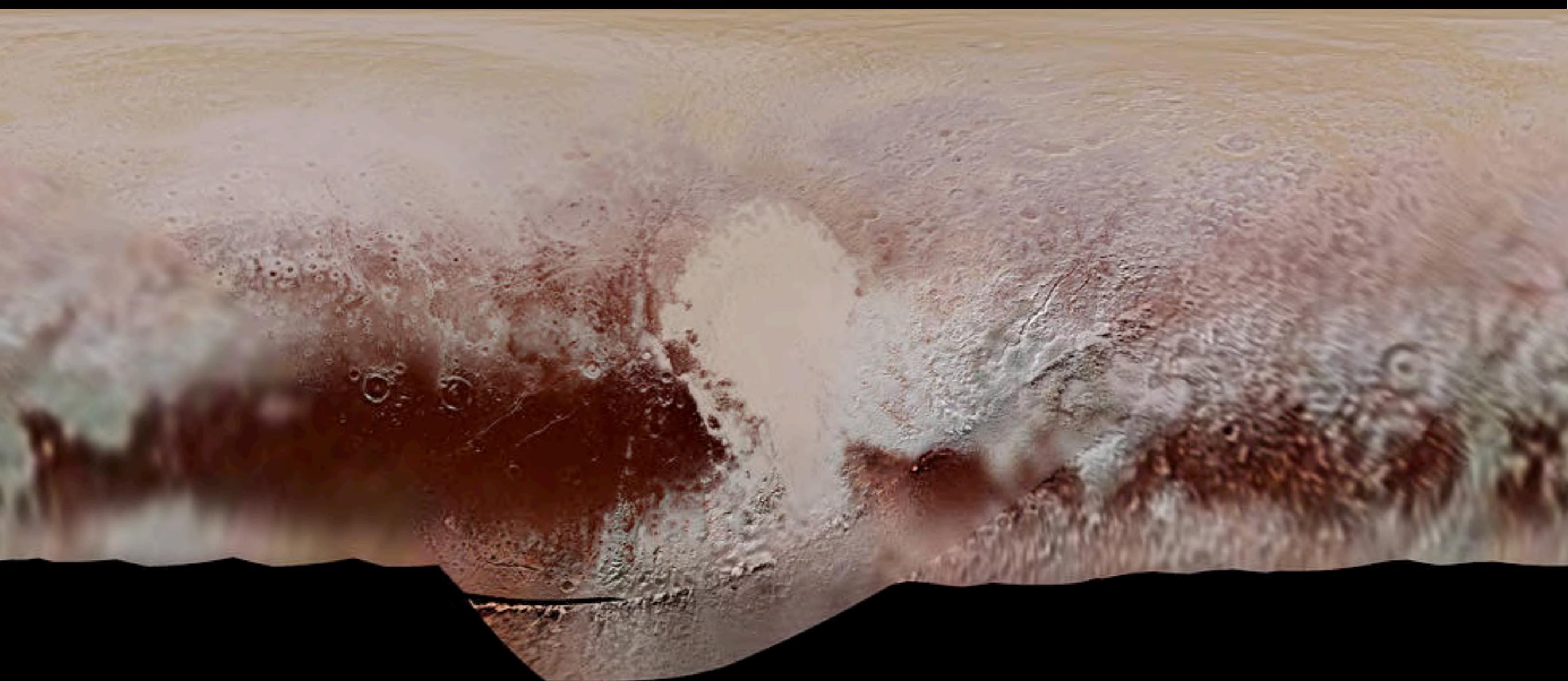
# New Horizons

Quelques autres photos...



# New Horizons

Quelques autres photos...



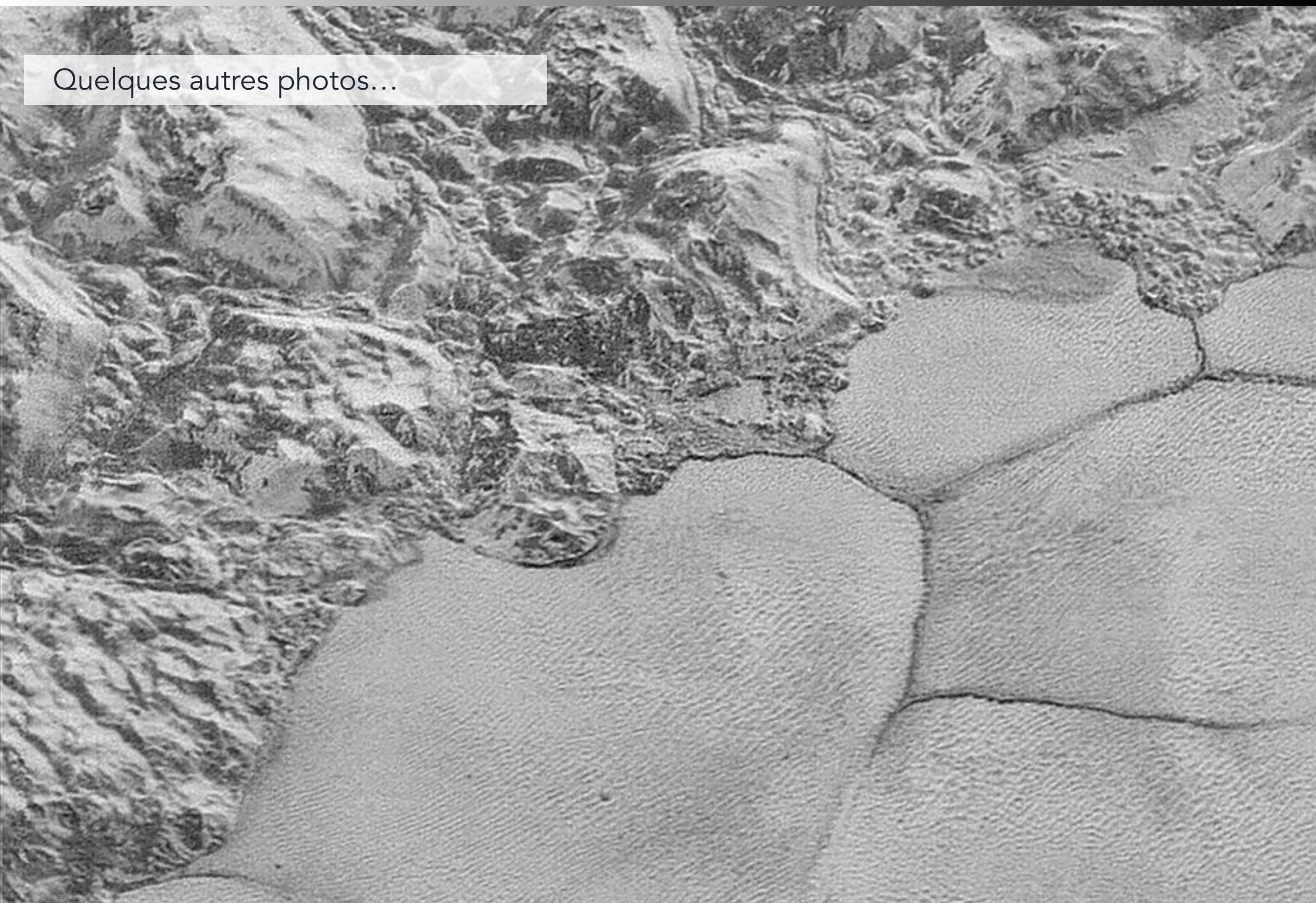
# New Horizons

Quelques autres photos...



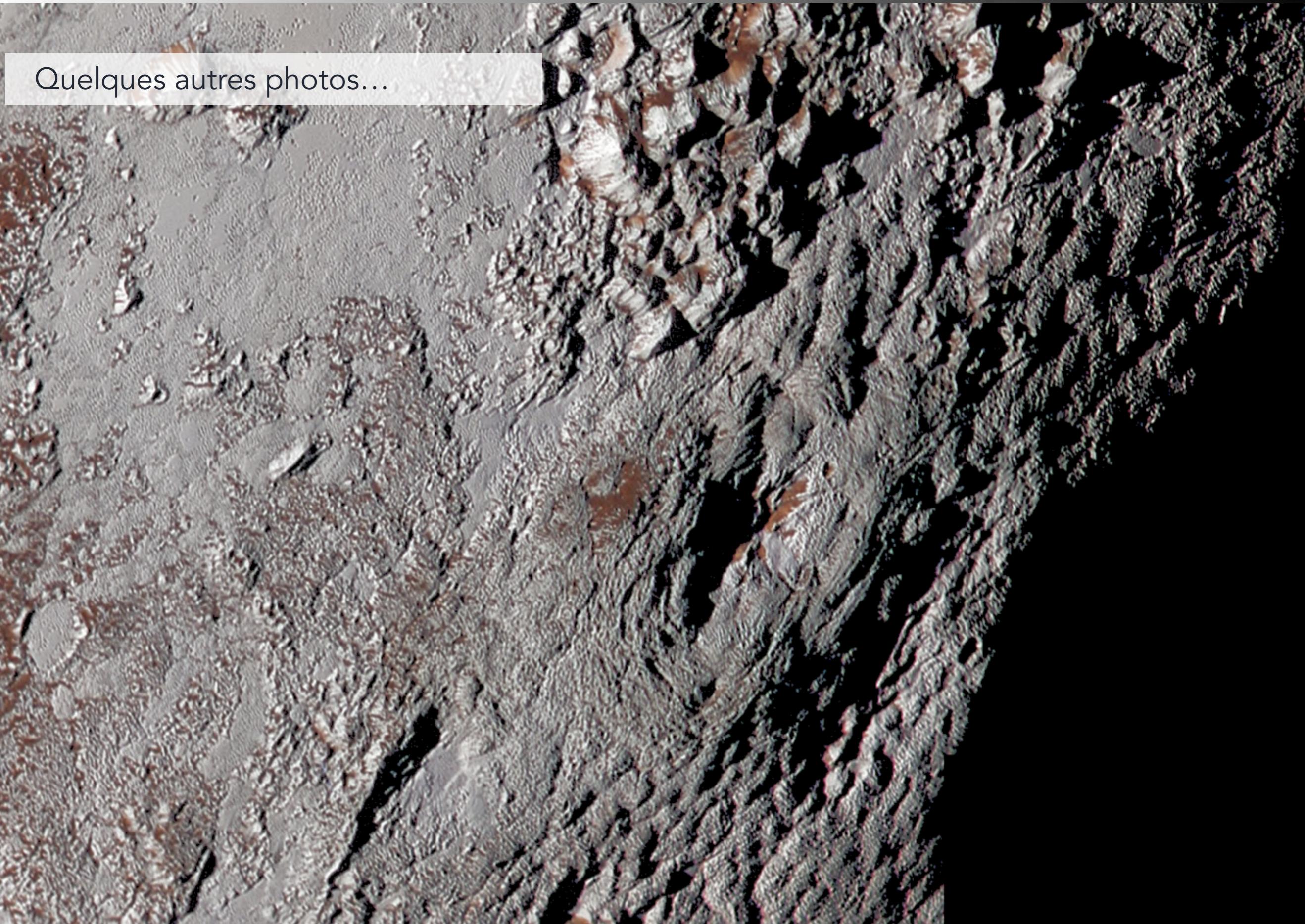
# New Horizons

Quelques autres photos...

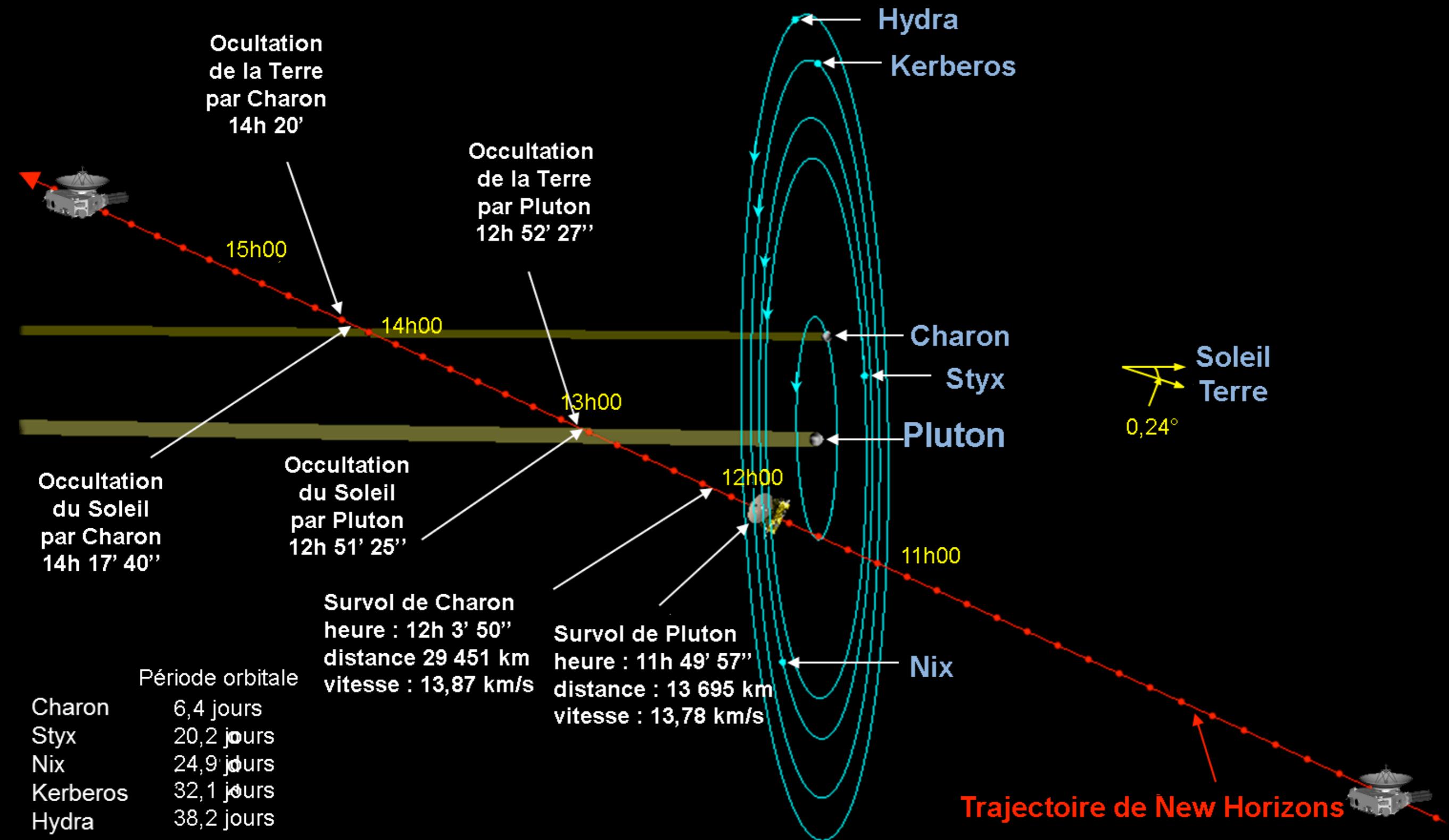


# New Horizons

Quelques autres photos...



# New Horizons



# New Horizons: Charon

Juillet 2015: le rendez-vous!



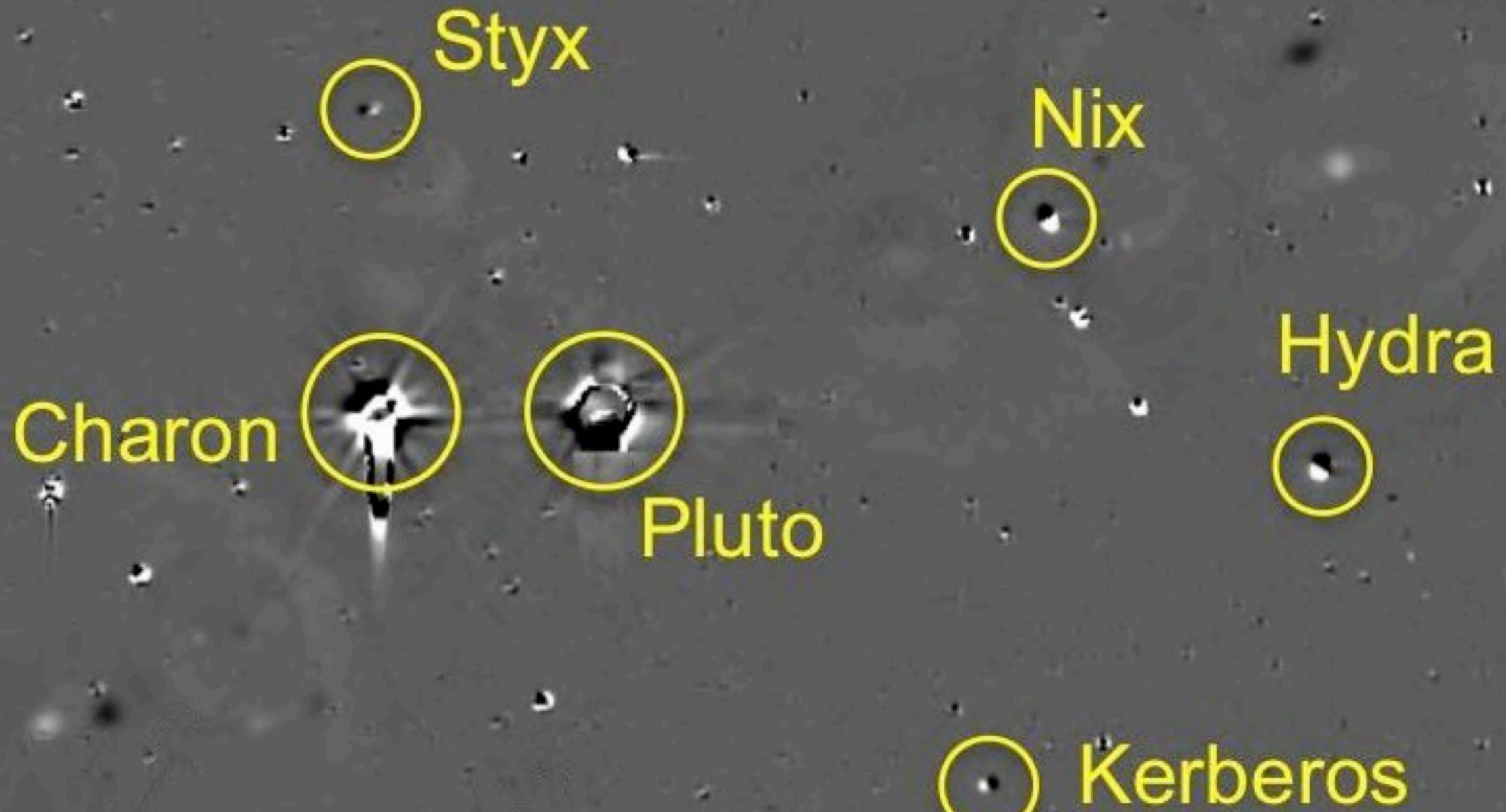
14 juillet

# New Horizons: Charon

---



# New Horizons: le Système Plutonien



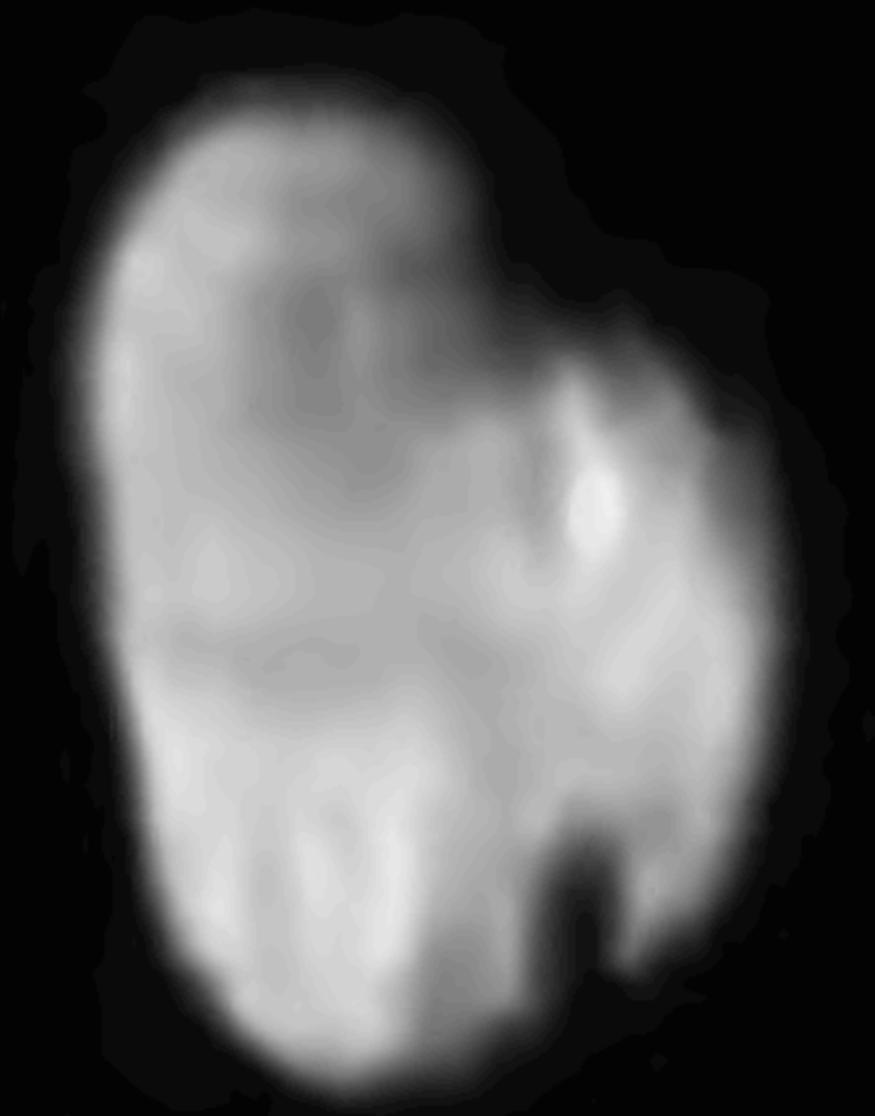
# New Horizons: le Système Plutonien

Nix



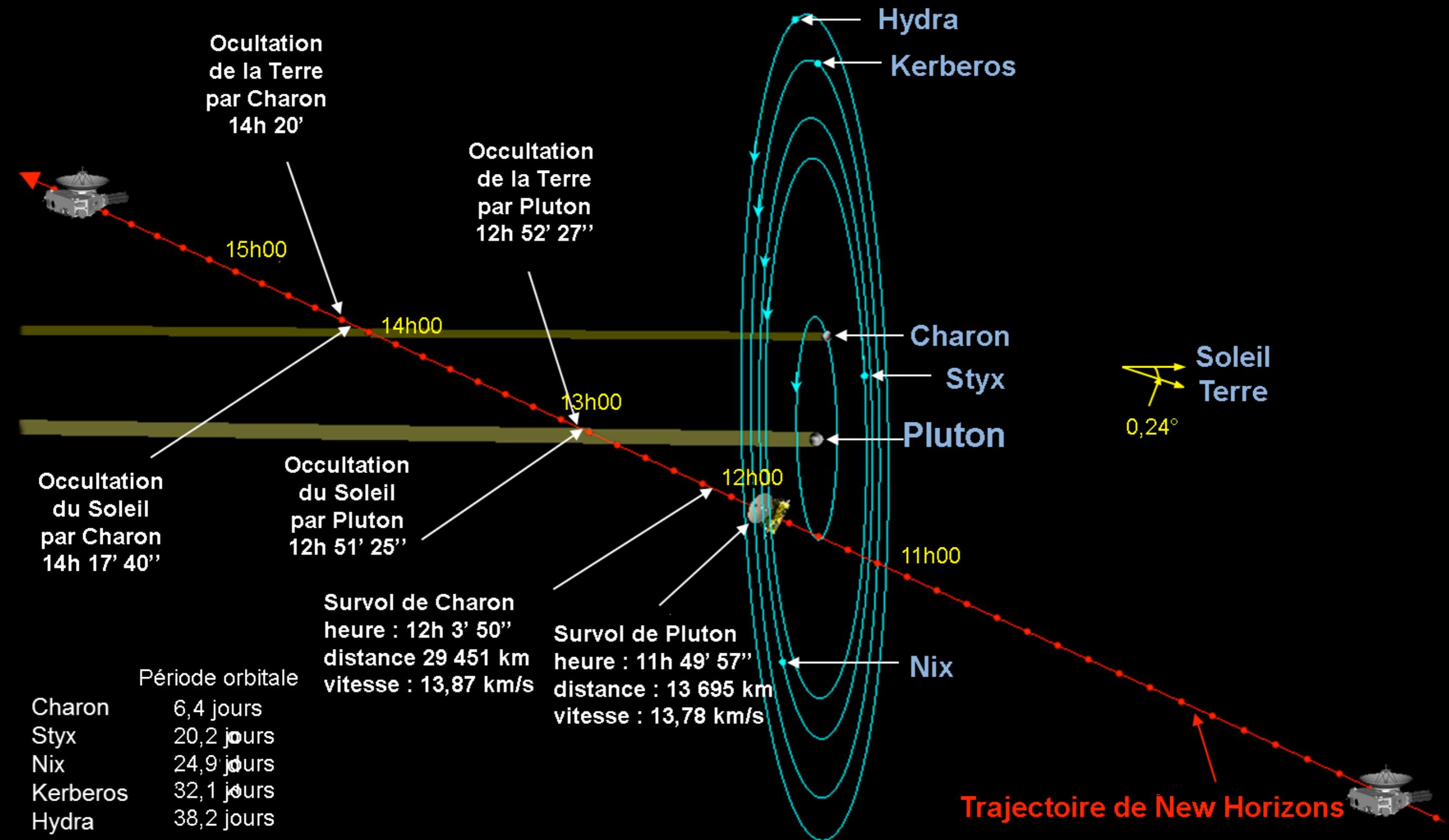
enhanced color

Hydra

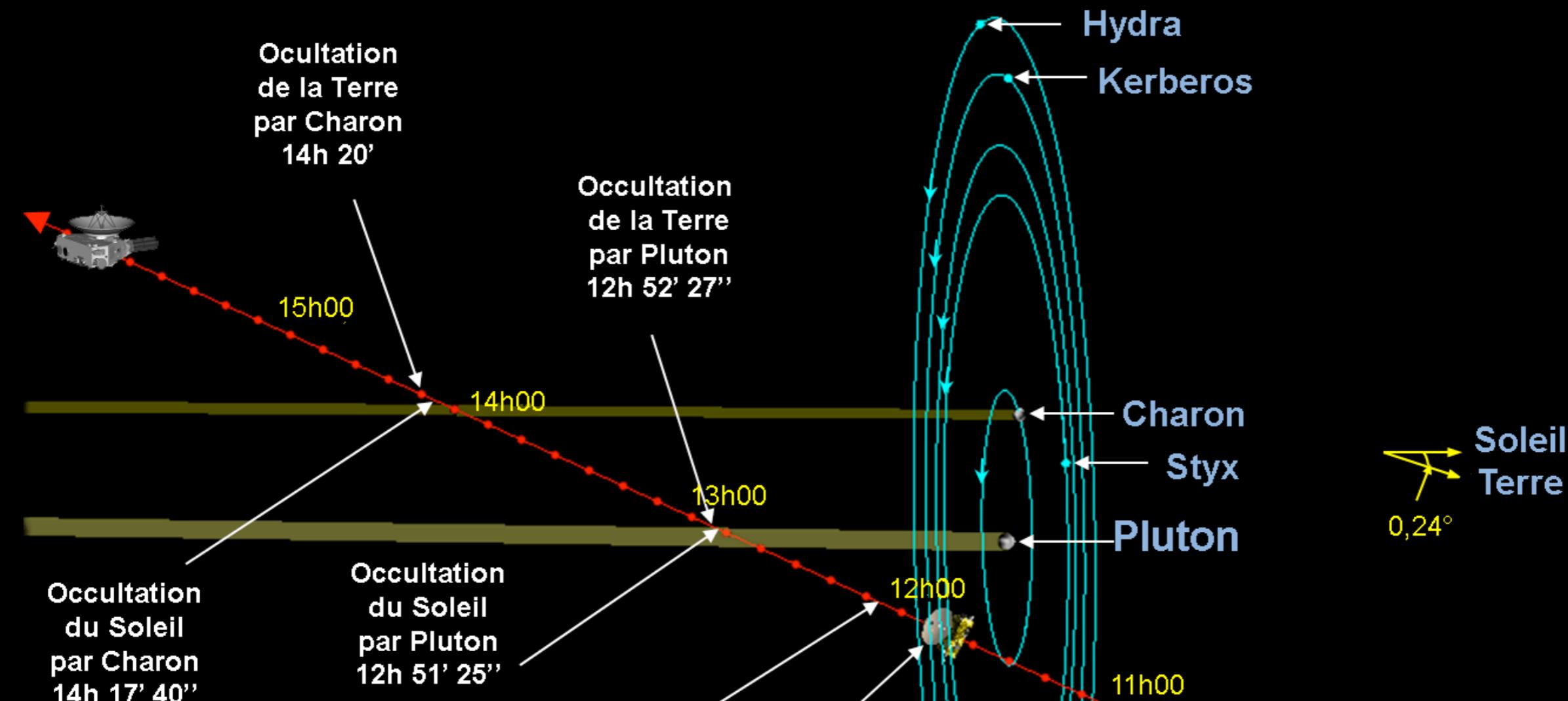


black and white

# New Horizons: et après?

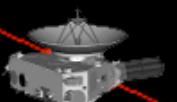


# New Horizons: et après?



- Intenses recherches pour découvrir un objet de la Ceinture de Kuiper qui serait atteignable pour New Horizons...
- Date limite: été 2014! (car 2 observations à 16 ans d'intervalle)
- 26 juin 2014: découverte de 2014 MU<sub>69</sub>
  - Petit corps (~30 km), mais orbite parfaite pour New Horizons!
  - Approuvé en août 2015
  - Réorientation de New Horizons

Trajectoire de New Horizons



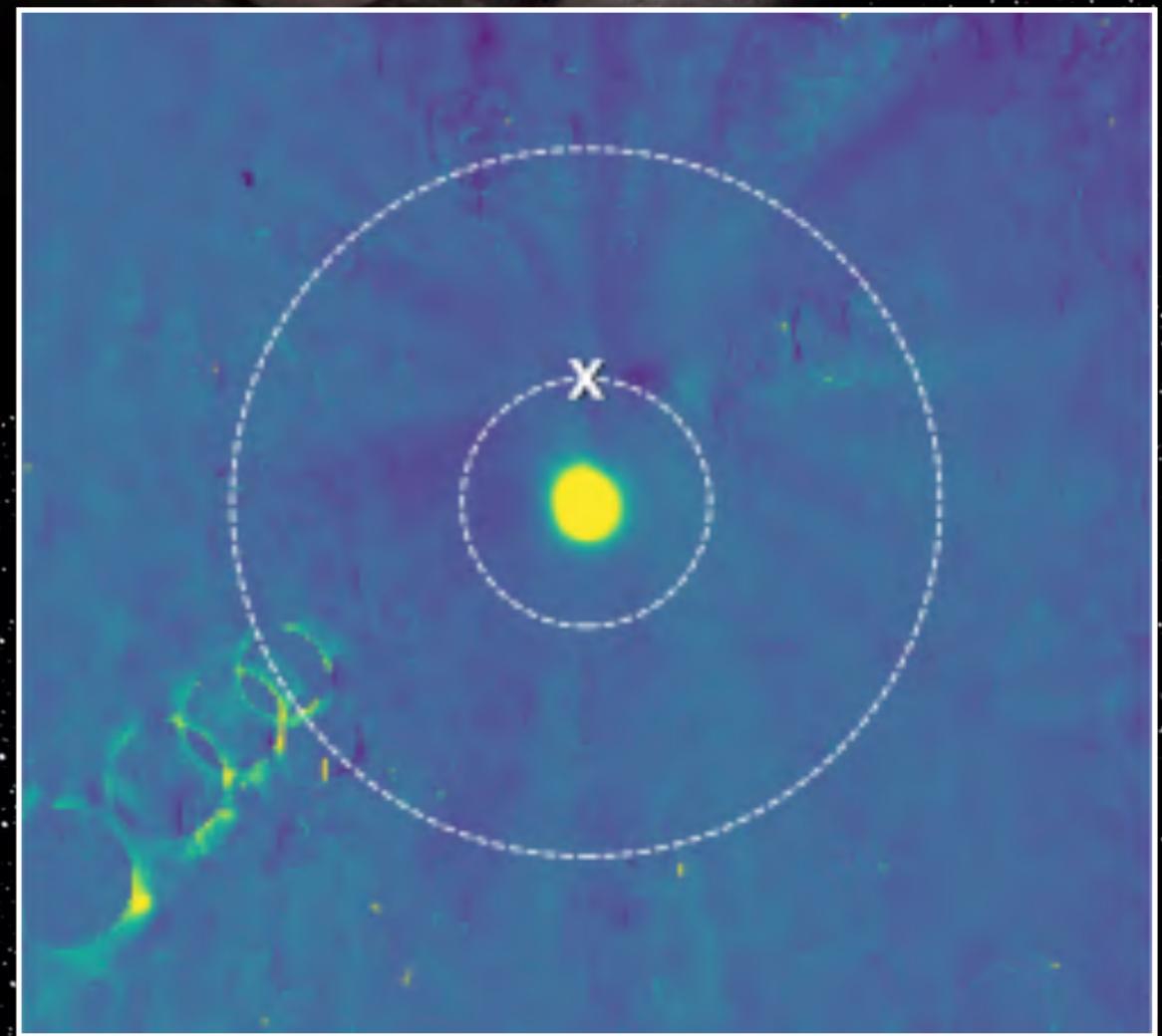
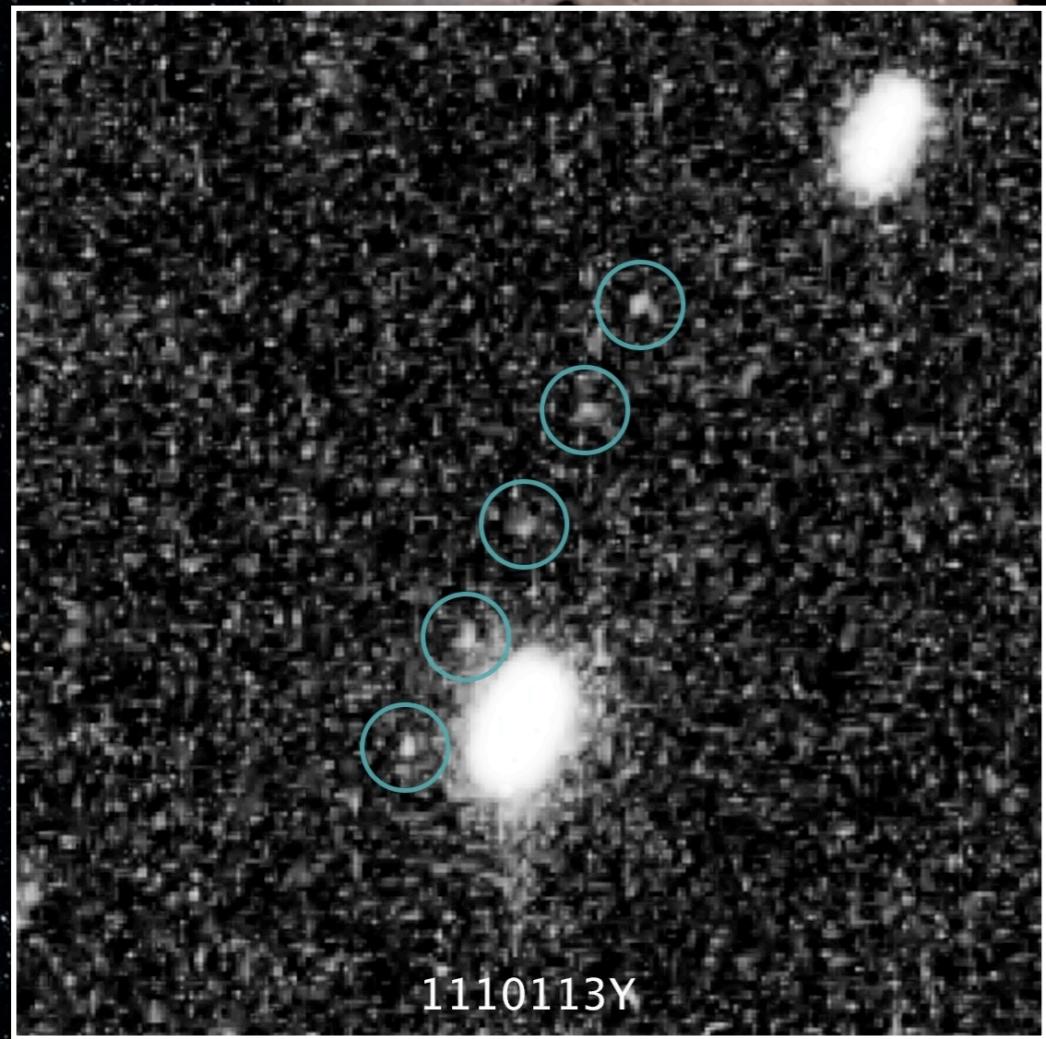
# 2014 MU<sub>69</sub> (Ultima Thule)

- Taille: ~30 km
- Demi-grand axe: 44 u.a.
- Révolution: 295 ans
- Survol prévu: 1er janvier 2019! :)



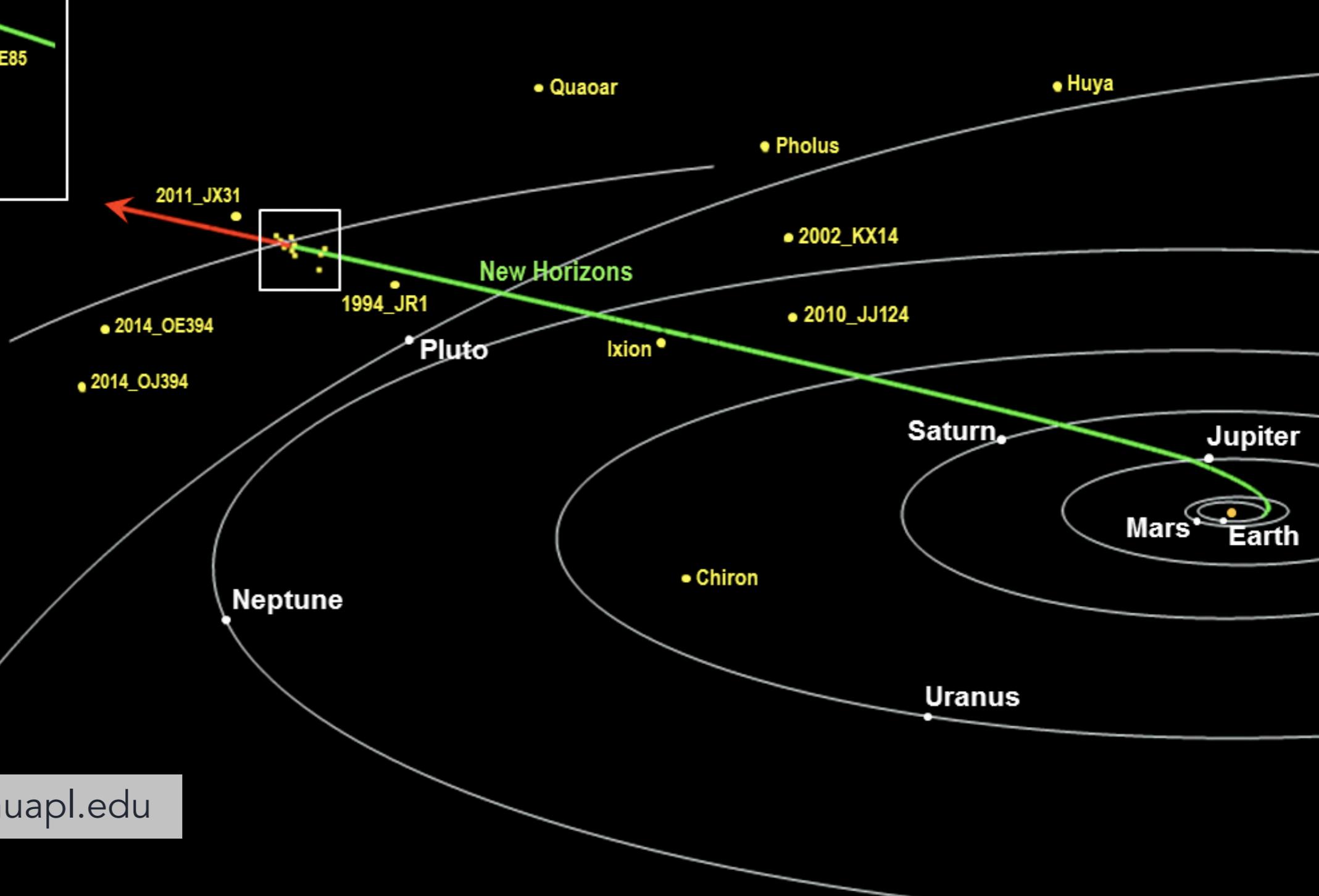
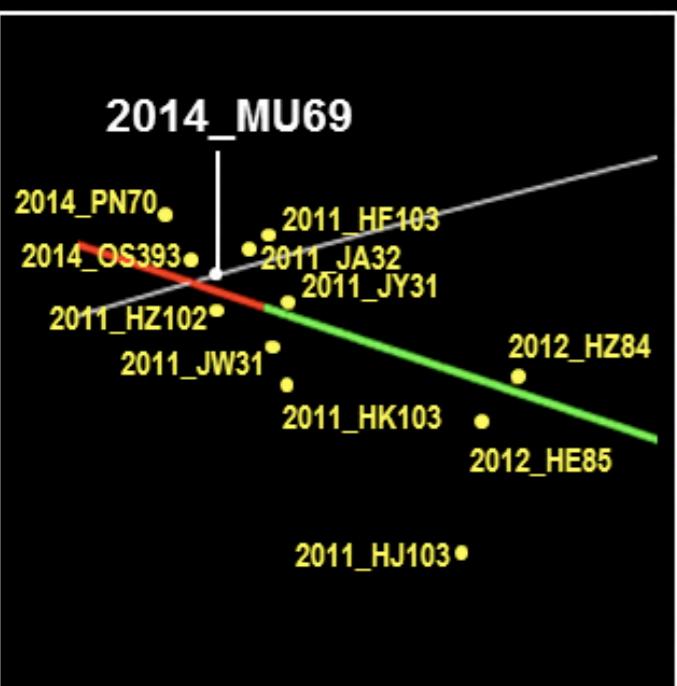
# 2014 MU<sub>69</sub> (Ultima Thule)

- Taille: ~30 km
- Demi-grand axe: 44 u.a.
- Révolution: 295 ans
- Survol prévu: 1er janvier 2019! :)



# 2014 MU69 (Ultima Thule)

## New Horizons Journey Through the Kuiper Belt



# Résultats scientifiques

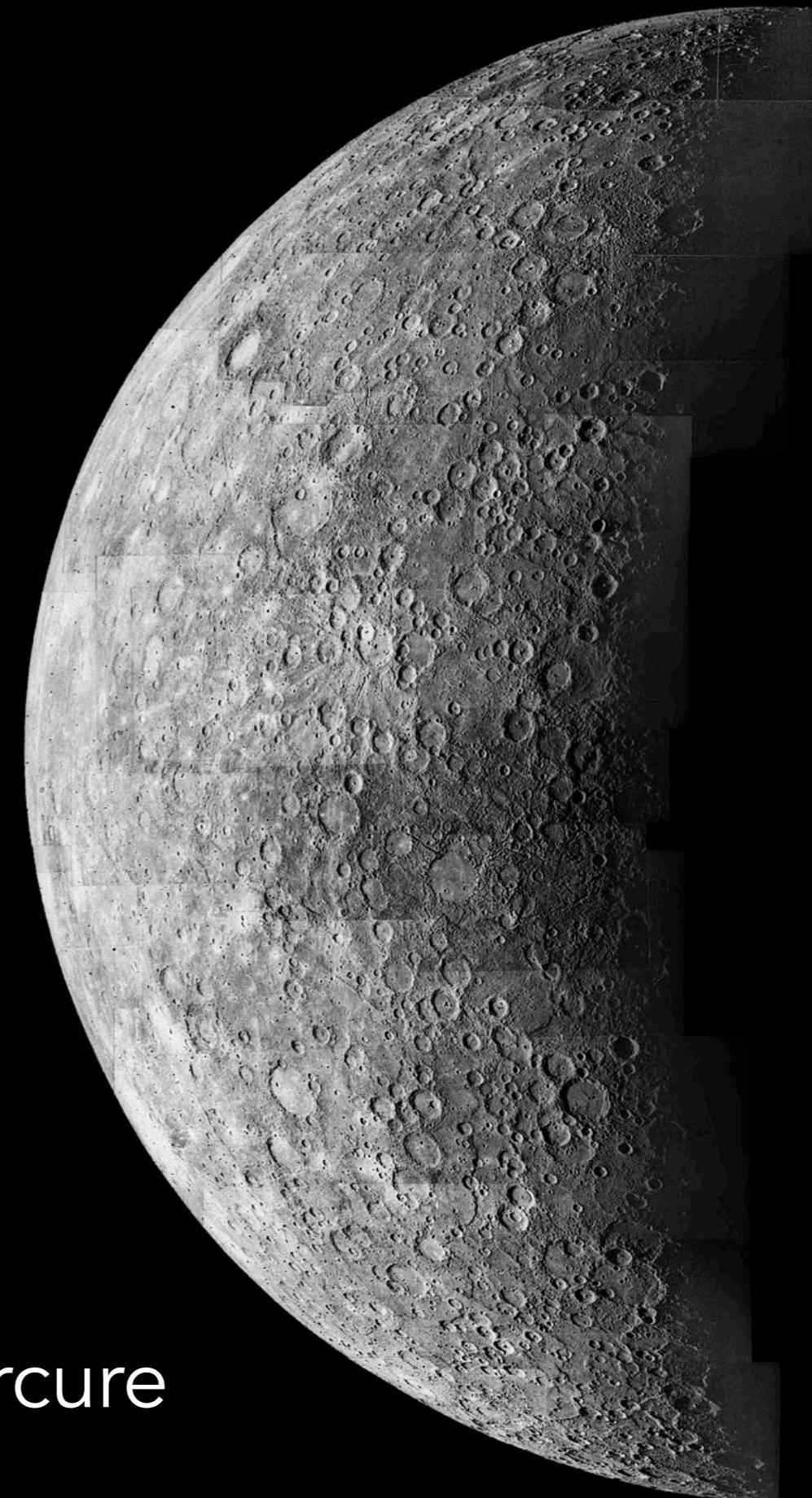
Surface

Lune



Pluton

Mercure



# Surface

Pourquoi si peu de  
cratères?

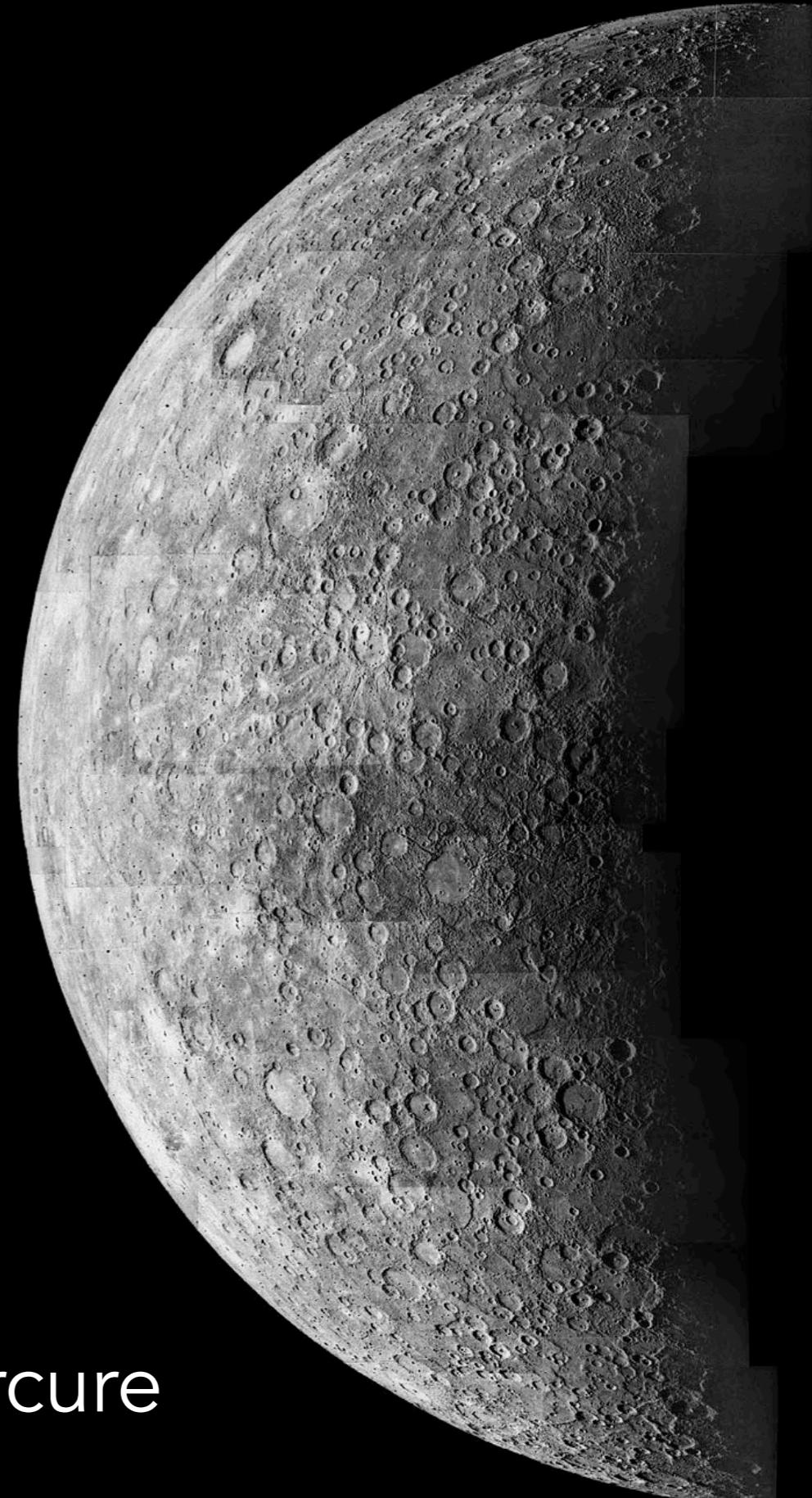
Lune



Pluton

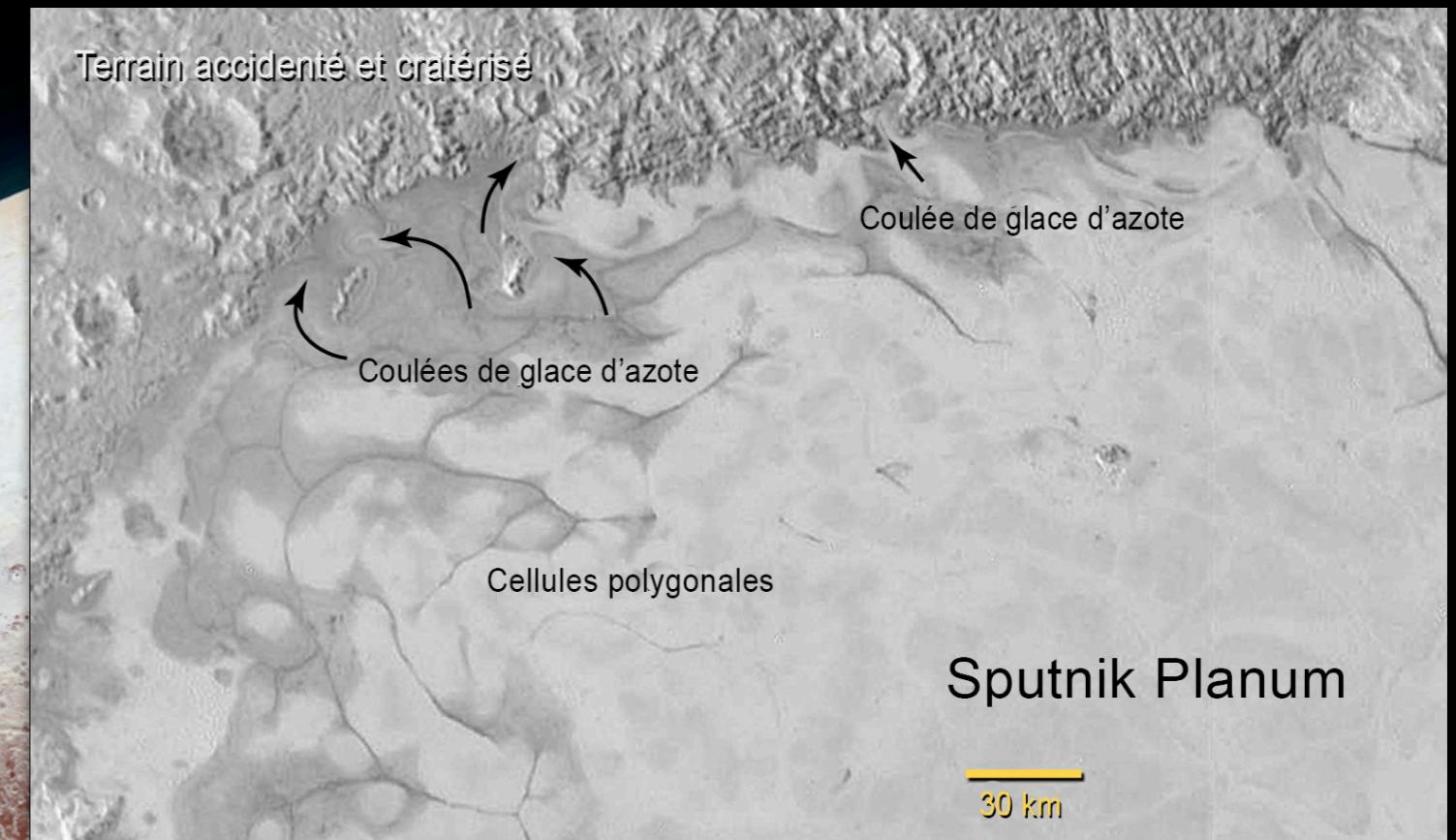
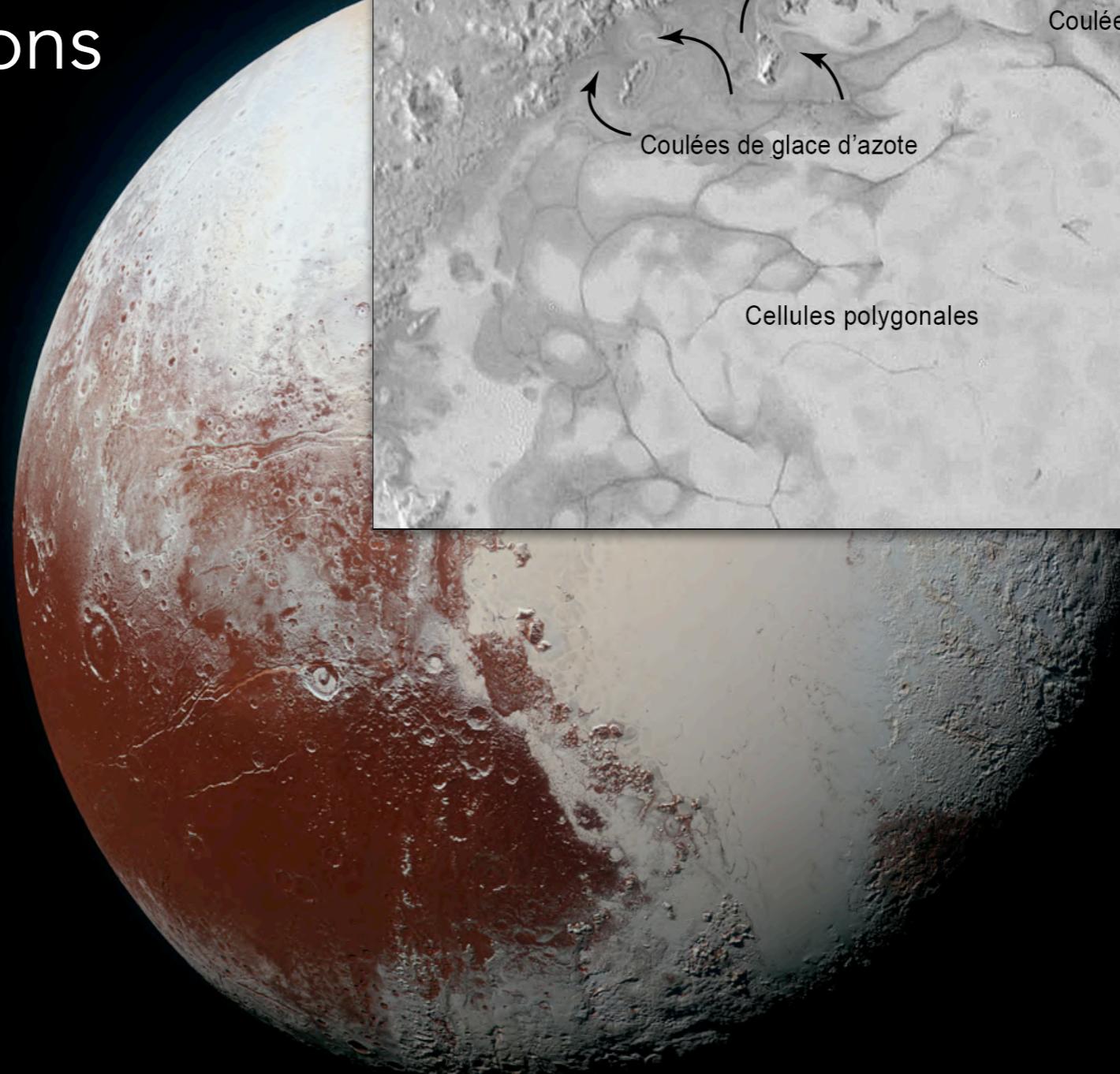


Mercure



# Surface

Surface jeune (moins de 100 millions d'années)

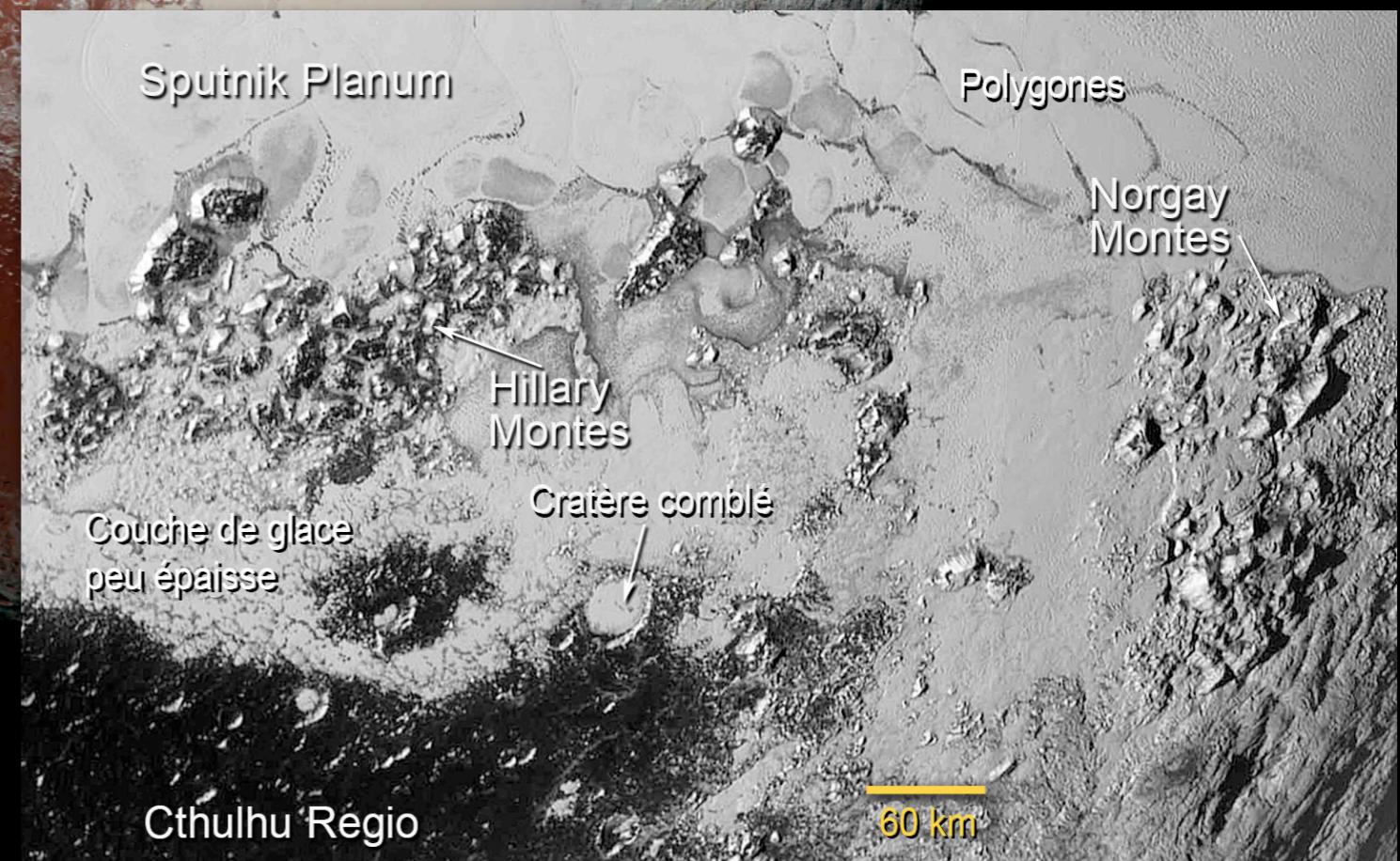
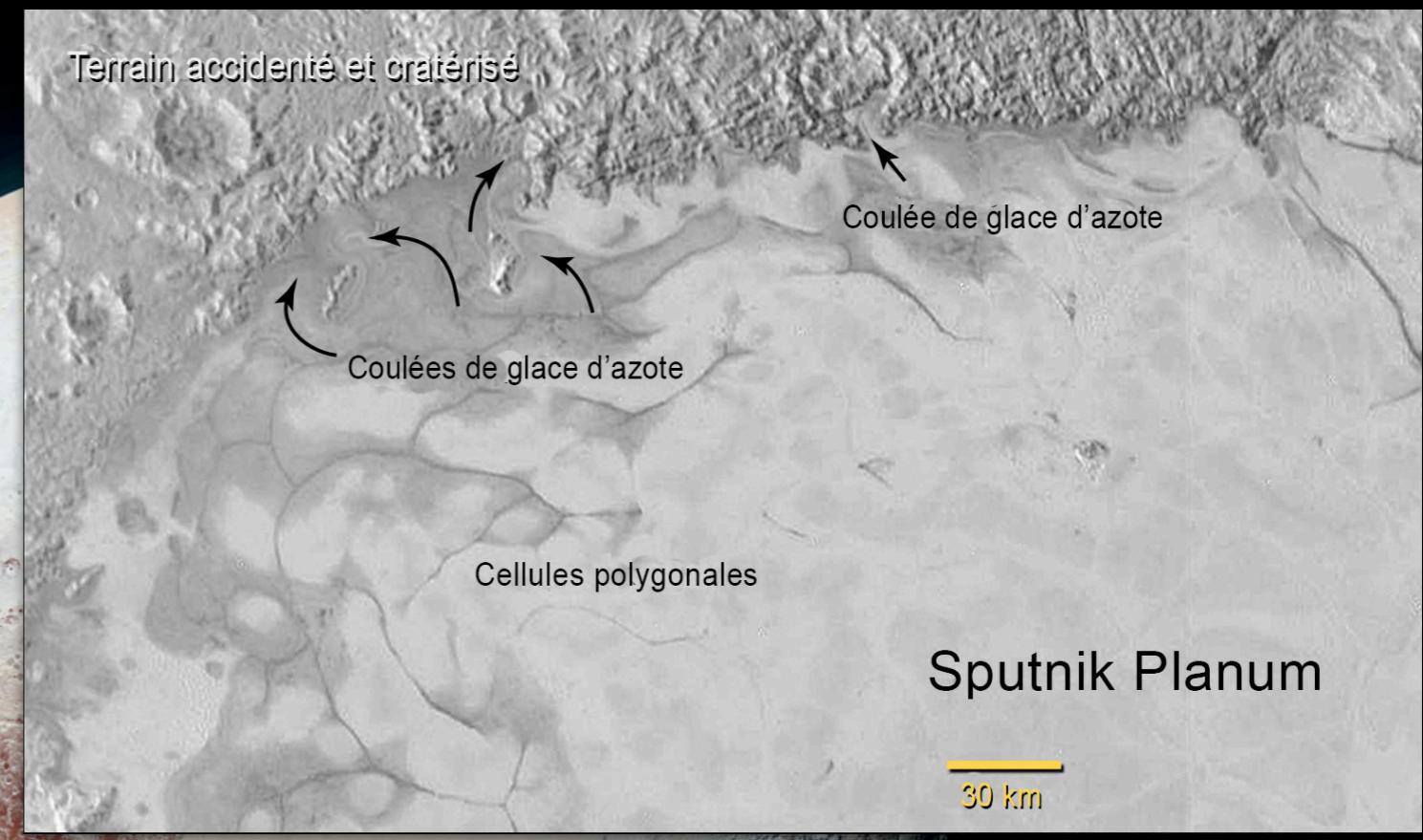


# Surface

Surface jeune (moins de 100 millions d'années)

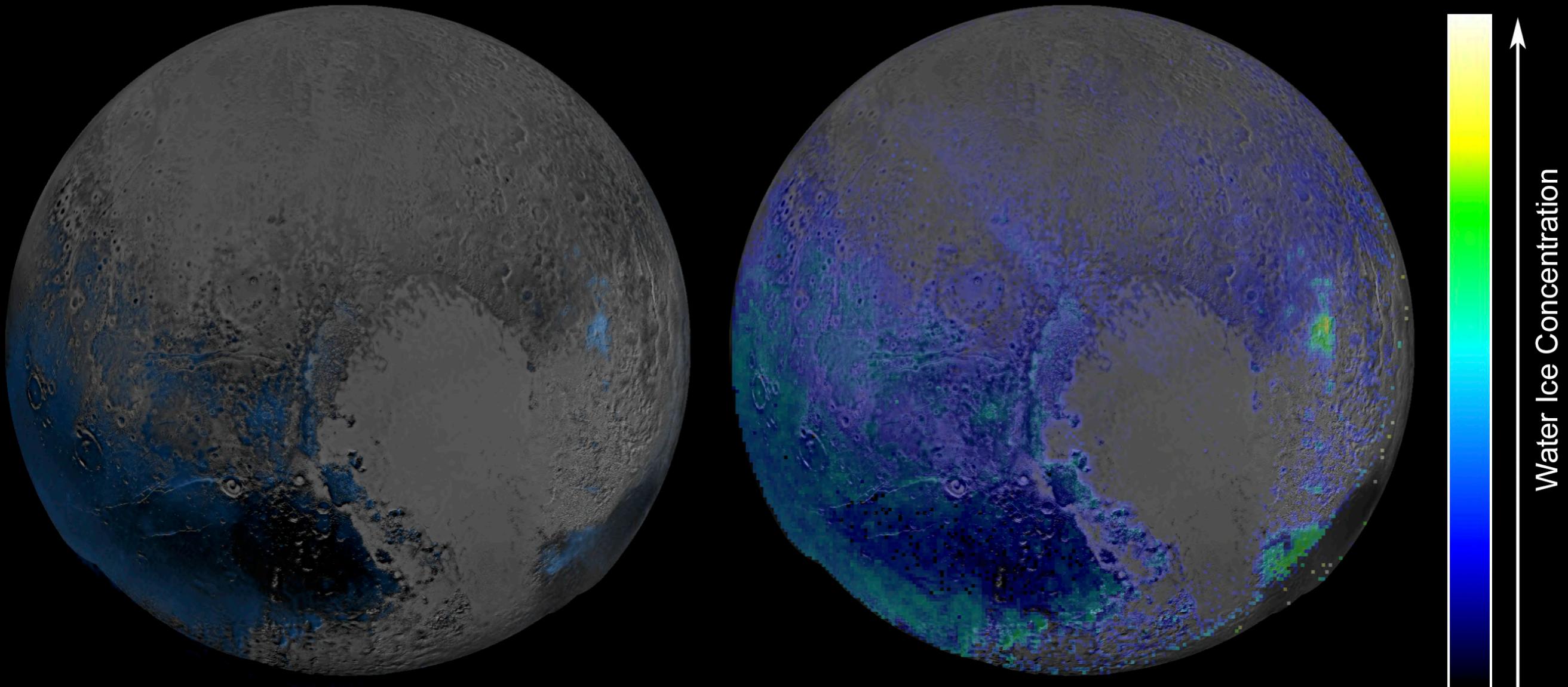


Montagnes (jusqu'à 3 300 m)



# Surface

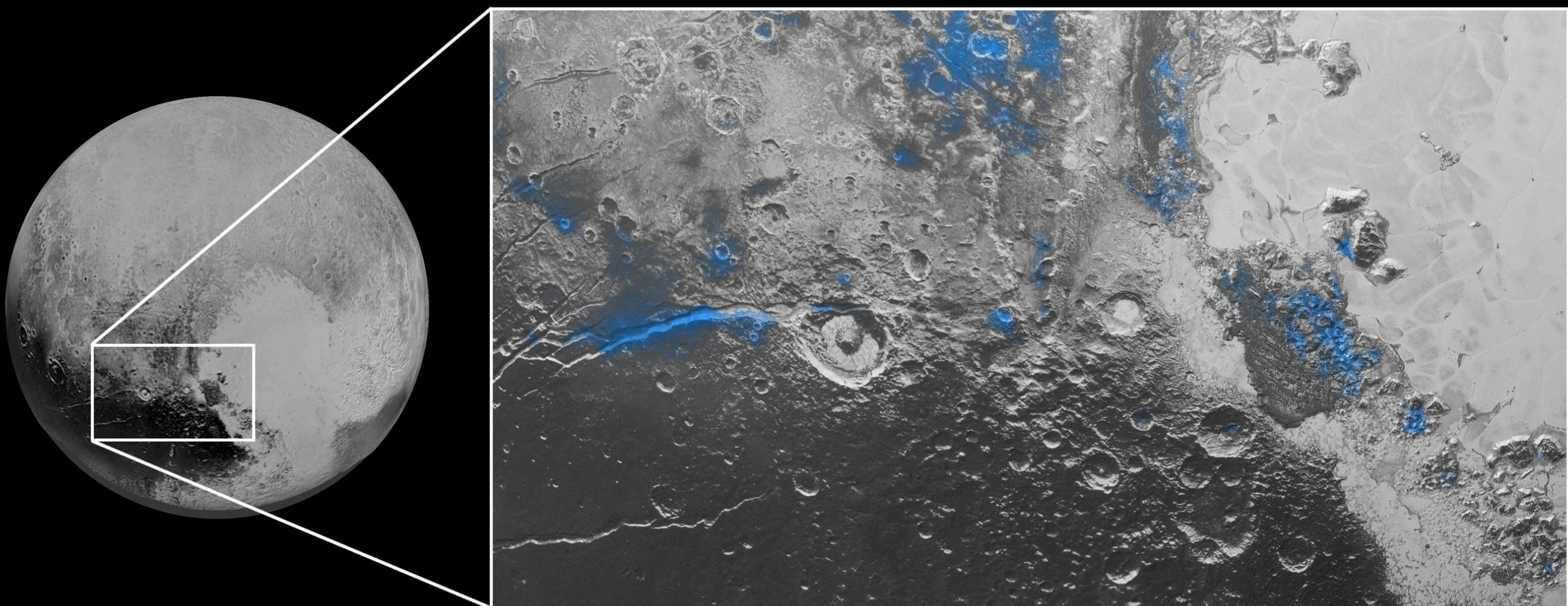
De l'eau (glacée) sur ~~Mars!~~  
~~Pluton~~



...mais pas dans le "coeur" (la "région Tombaugh"): azote, méthane, monoxyde de carbone

Surface

Montagnes de glace d'eau



(Impossible de former des montagnes à partir de glace de méthane ou d'azote...)

# Surface

Ganymède



D'autres corps telluriques ont  
des surfaces lisses...

Callisto



Titan

Lune

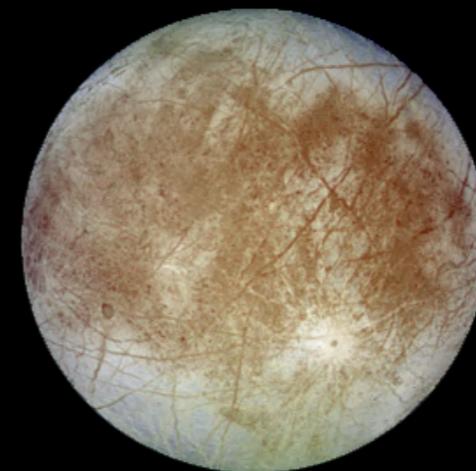


Io

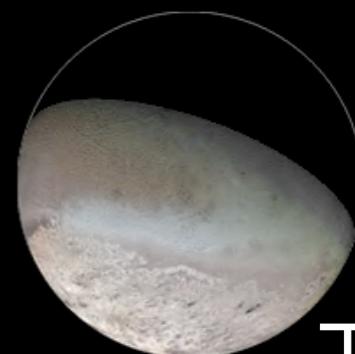


2000 km  
1000 mi

Europe



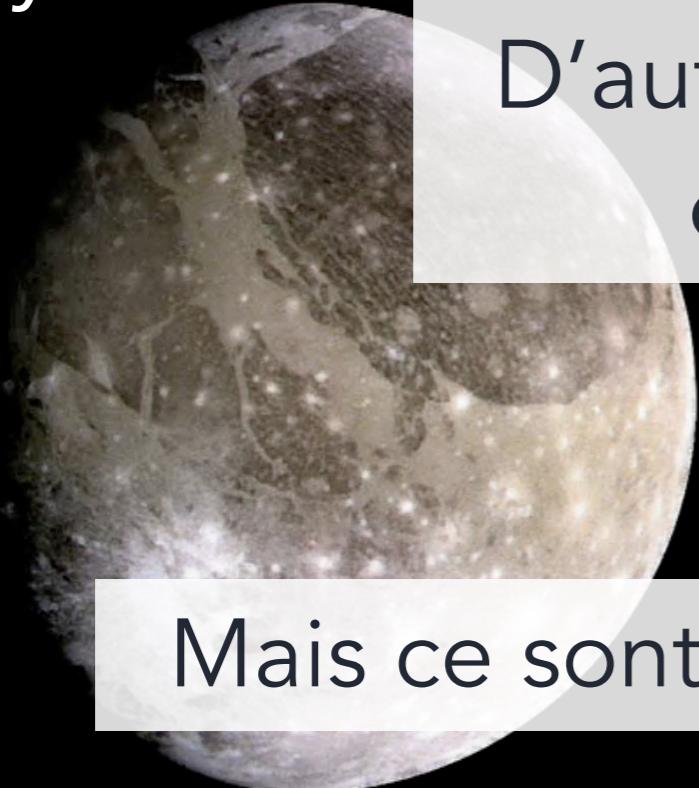
Pluton



Triton

# Surface

Ganymède



D'autres corps telluriques ont  
des surfaces lisses...

Callisto

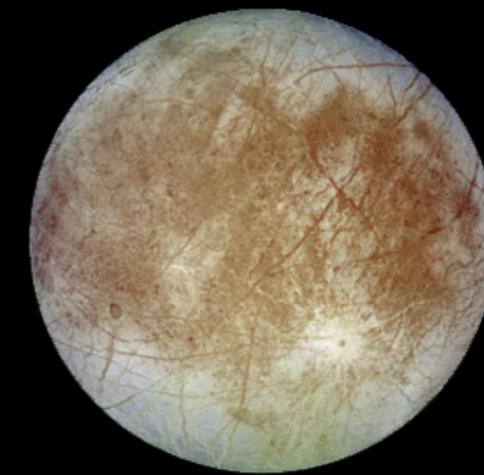


Mais ce sont des satellites, pas des planètes!

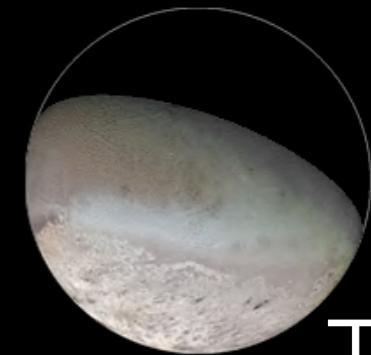
Titan

Lune

Io



Europe



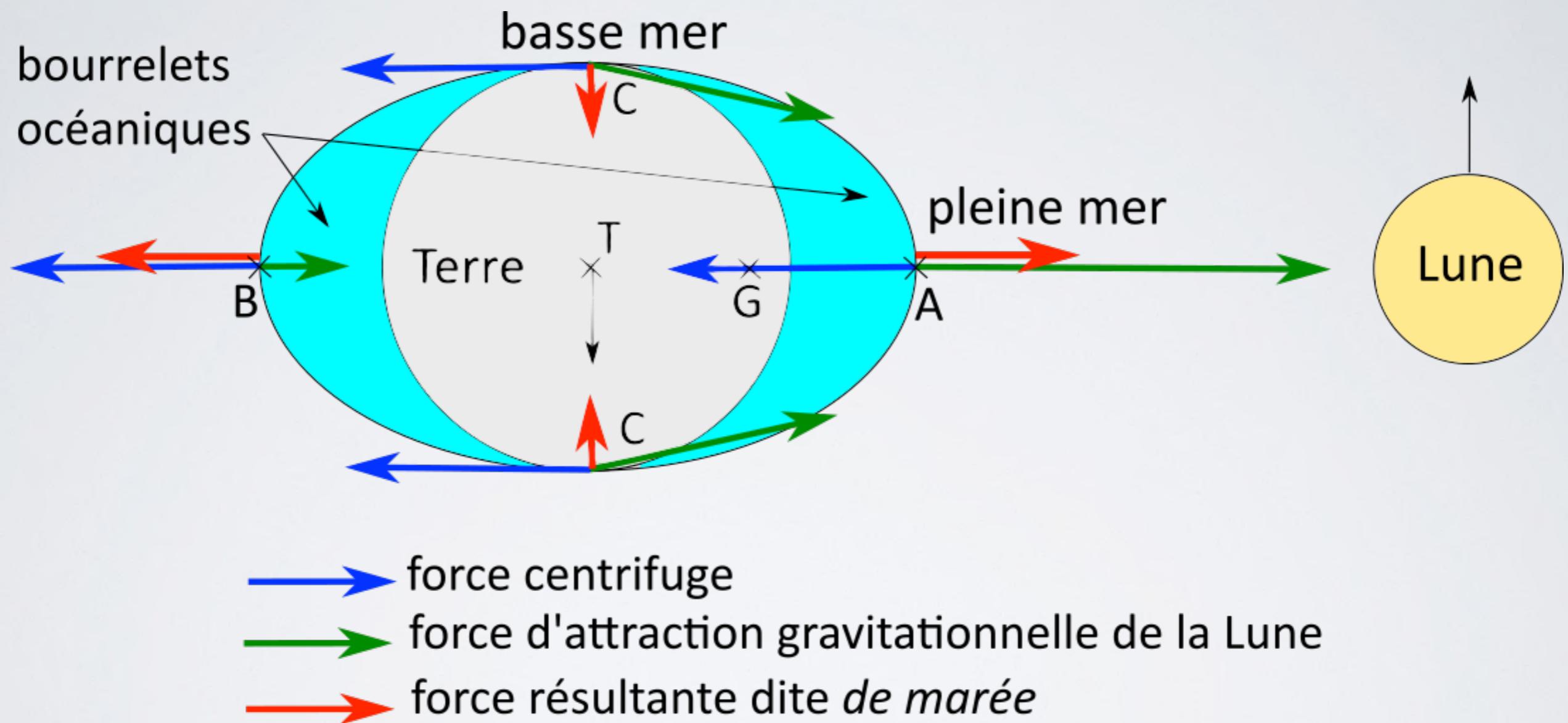
Triton

2000 km  
1000 mi



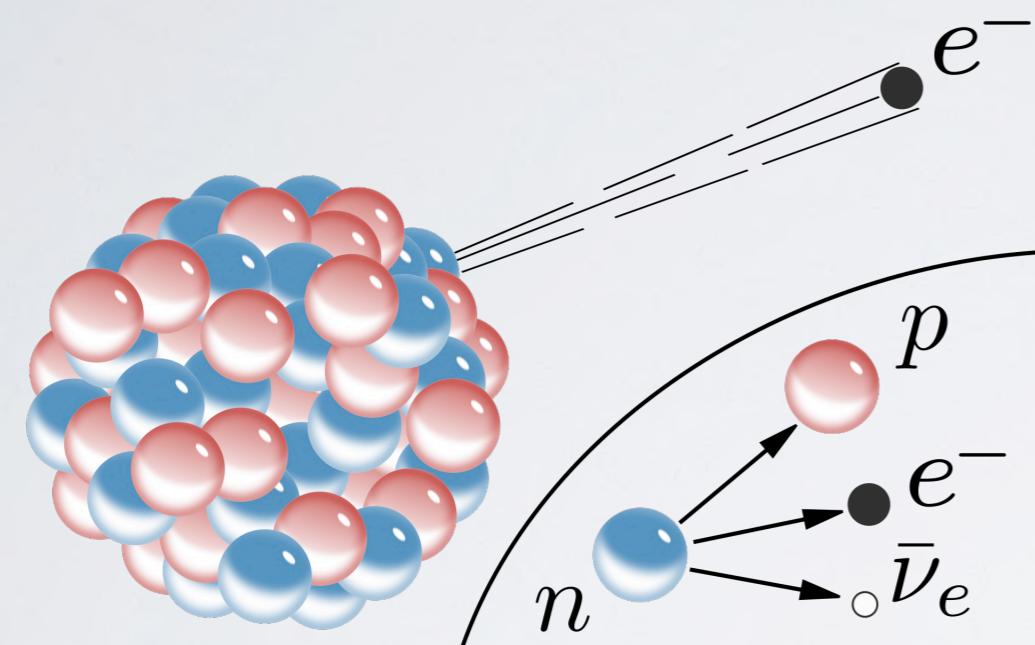
Pluto

# Pas de forces de marée sur Pluton!



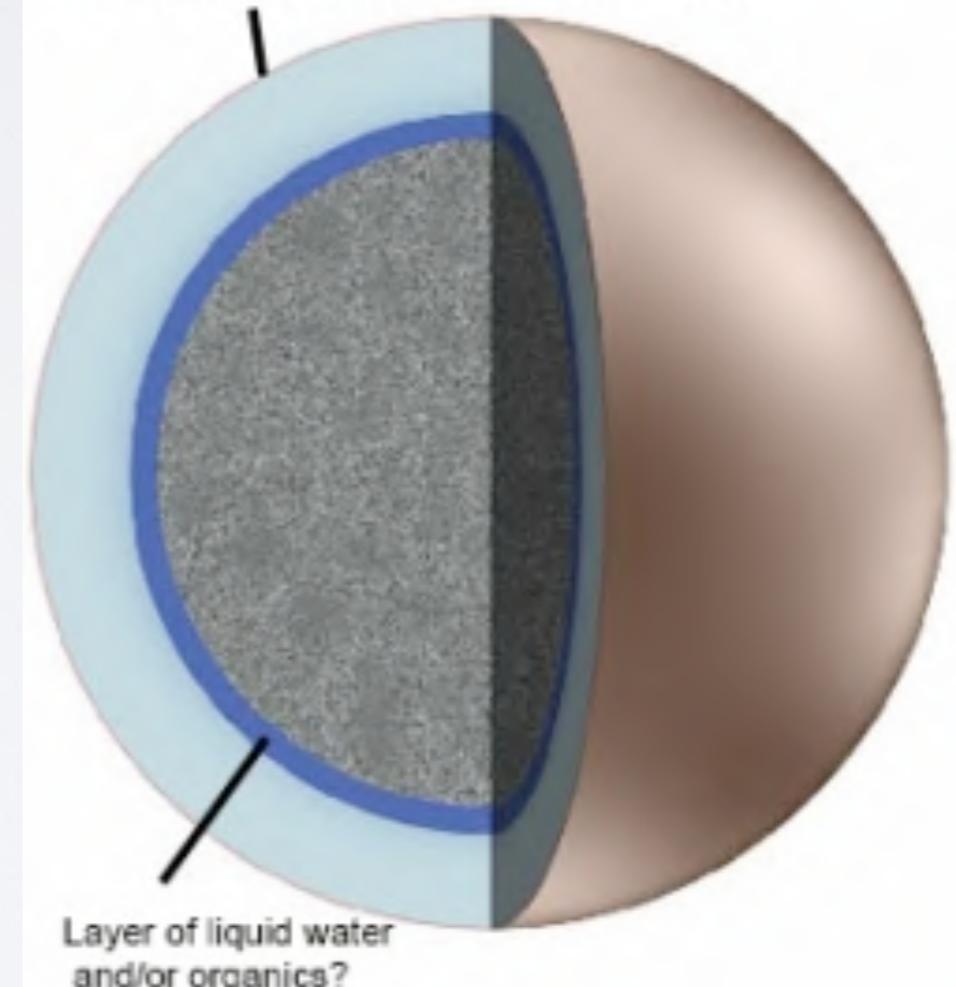
# Pourquoi la surface de Pluton est-elle si jeune?

1) Désintégration de matières radioactives?



2) Présence d'un océan liquide sous la surface?

**Pluto**  
Radius = 1,150 to 1,200 kilometers  
Average density = 1.7 to 2.15 grams/cm<sup>3</sup>  
Surface ices  
(N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, presumably organics)



Water Ice

Rock

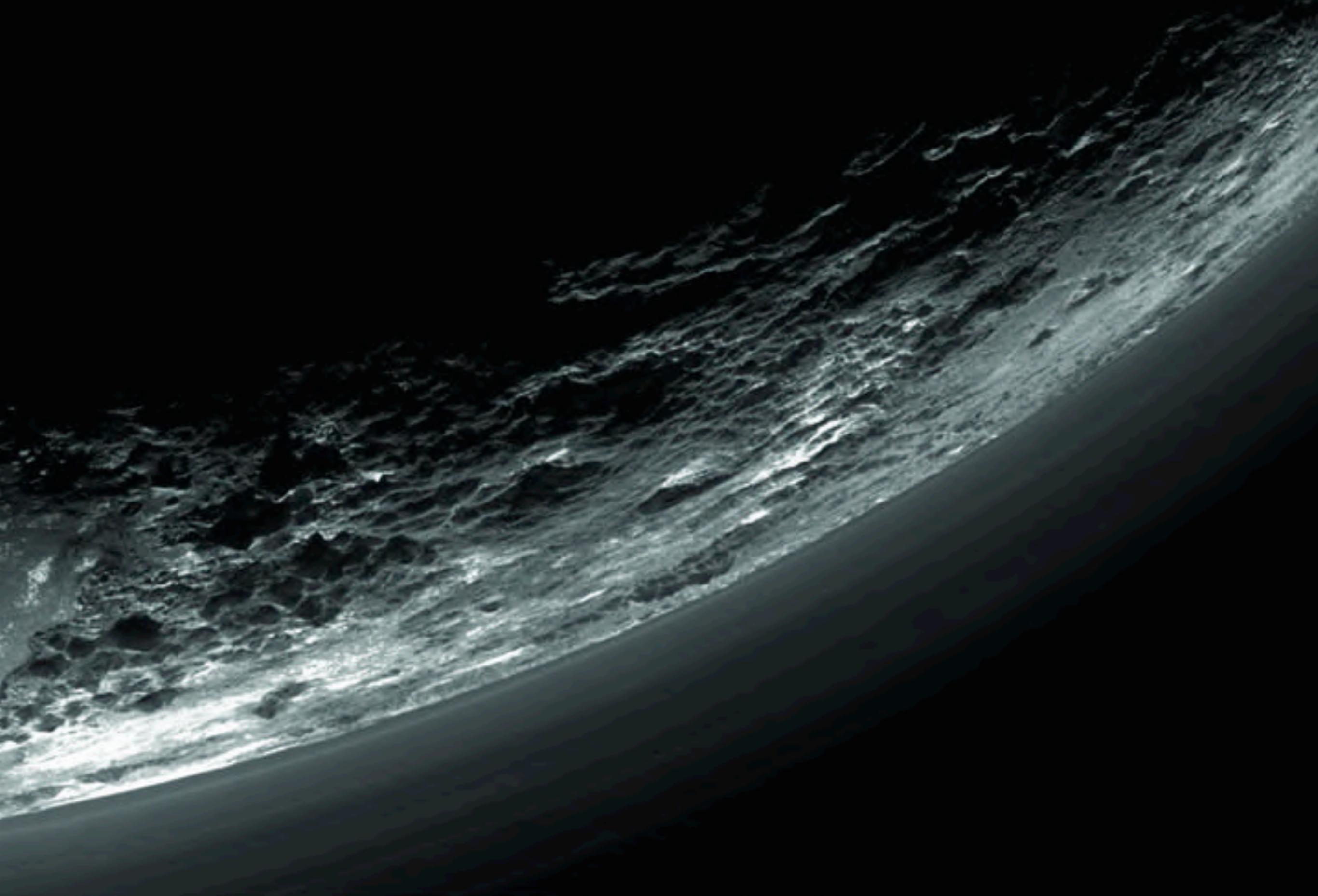
Rock & Ice Mix

# Atmosphère

---



# Atmosphère

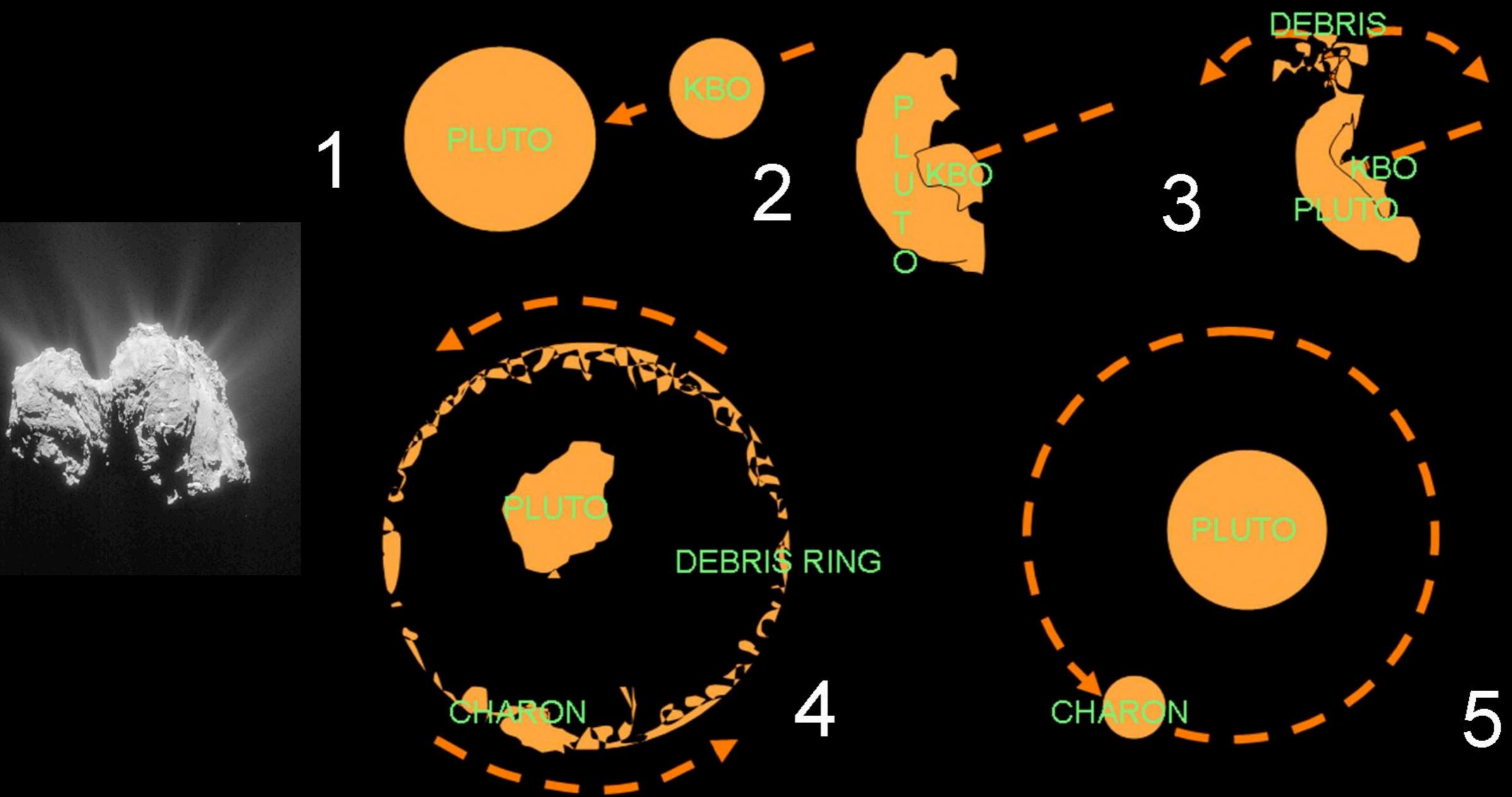


# Atmosphère

- Découverte en 1985 (par occultation), confirmée par New Horizons
- Probablement de l'azote et un peu de monoxyde de carbone
- ~1 Pa (100 000x moins que sur Terre!)
- S'échappe très vite (500 tonnes /h!)
- Pourrait se "condenser" loin du Soleil, et se reformer près du périhélie
  - Mais pas encore très clair...

# Formation de Pluton... et Charon

- Pourrait avoir migré depuis l'orbite de Neptune...
- Composition de Pluton et Charon assez similaire, mais pas identiques
- Densité très similaire
  - Hypothèse probable: collision de deux corps célestes de la Ceinture de Kuiper
  - ...ou séparation d'un corps par force centrifuge? (Moins probable...)



---

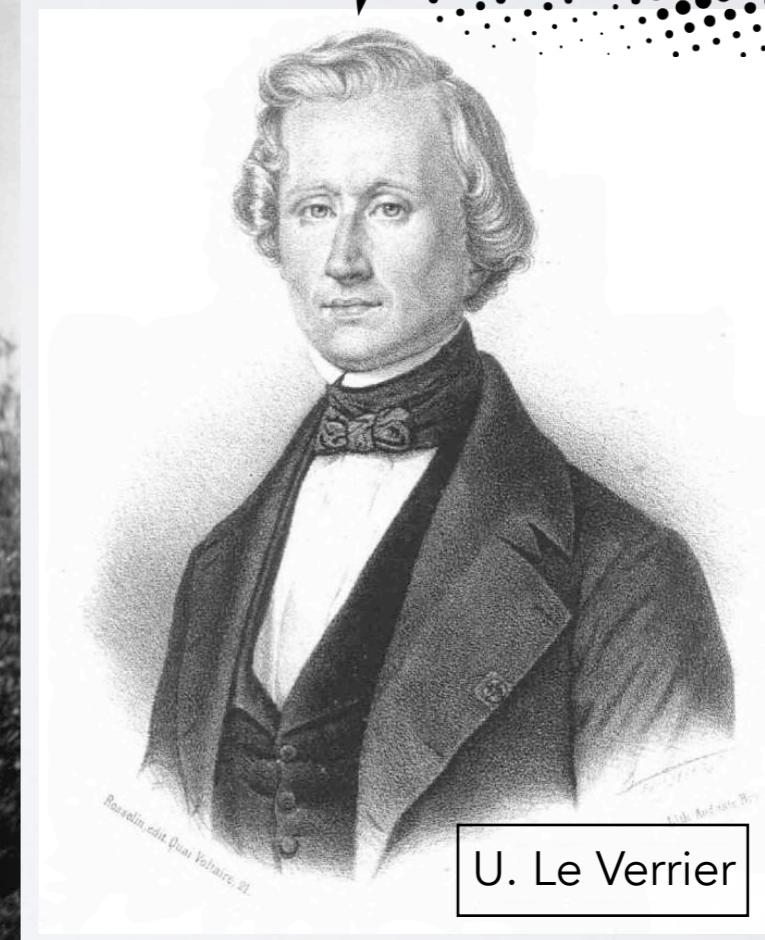
Planète Neuf...

---

# Perturbations gravitationnelles? Nouvelle planète!



C. W. Tombaugh



U. Le Verrier

# Perturbations gravitationnelles? Nouvelle planète!



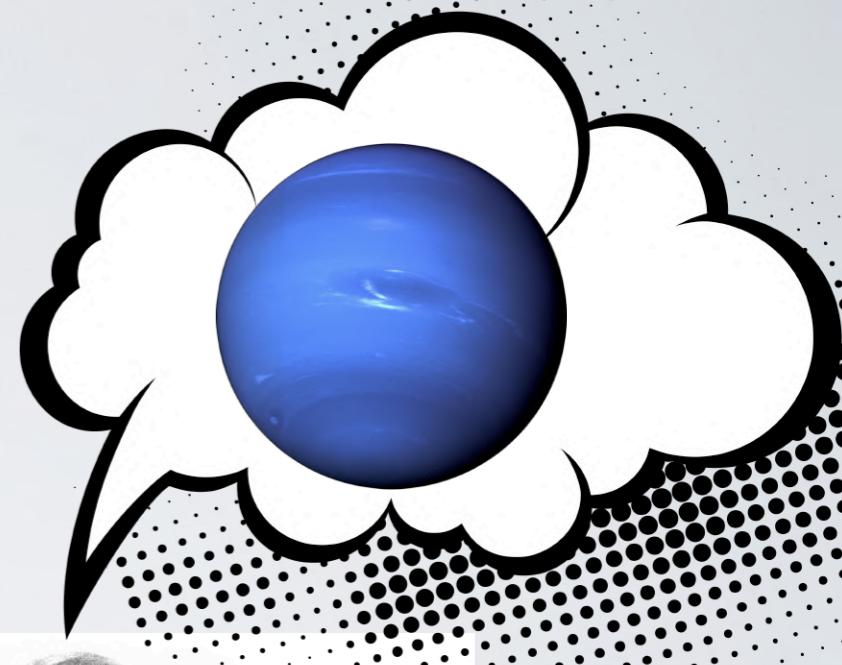
Il n'y a que  
huit  
planètes!



C. W. Tombaugh



U. Le Verrier



...vraiment...?

# On remet ça?

- 2014: nouvel objet d'orbite très similaire à Sedna...

## LETTER

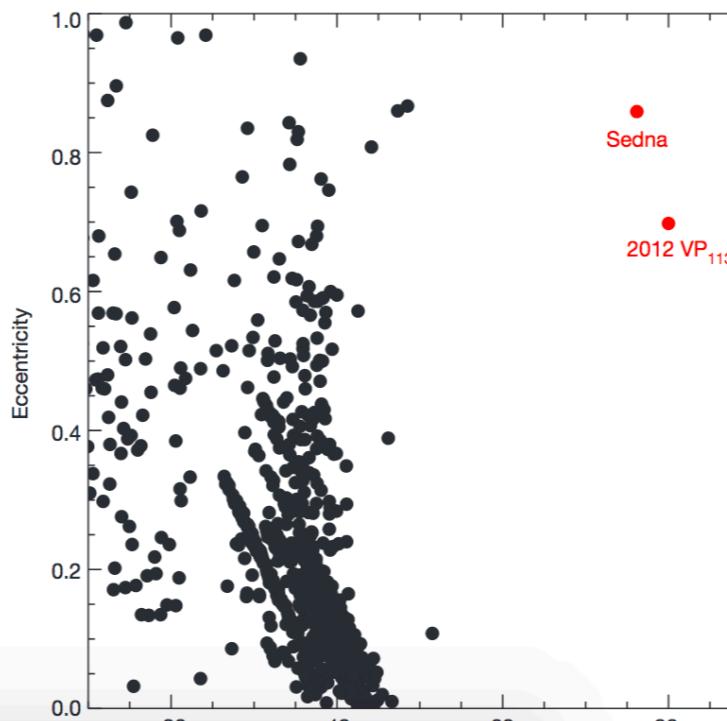
doi:10.1038/nature13156

### A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units

Chadwick A. Trujillo<sup>1\*</sup> & Scott S. Sheppard<sup>2\*</sup>

The observable Solar System can be divided into three distinct regions: the rocky terrestrial planets including the asteroids at 0.39 to 4.2 astronomical units (AU) from the Sun (where 1 AU is the mean distance between Earth and the Sun), the gas giant planets at 5 to 30 AU from the Sun, and the icy Kuiper belt objects at 30 to 50 AU from the Sun. The 1,000-kilometre-diameter dwarf planet Sedna was discovered ten years ago and was unique in that its closest approach to the Sun (perihelion) is 76 AU, far greater than that of any other Solar System body<sup>1</sup>. Formation models indicate that Sedna could be a link between the Kuiper belt objects and the hypothesized outer Oort cloud at around 10,000 AU from the Sun<sup>2–6</sup>. Here we report the presence of a second Sedna-like object, 2012 VP<sub>113</sub>, whose perihelion is 80 AU. The detection of 2012 VP<sub>113</sub> confirms that Sedna is not an isolated object; instead, both bodies may be members of the inner Oort cloud, whose objects could outnumber all other dynamically stable populations in the Solar System.

The inner Oort cloud objects probably formed on nearly circular orbits, allowing them to accumulate mass efficiently<sup>6–9</sup>, and were later perturbed into the eccentric orbits we see today. We define an inner Oort cloud object as a body whose orbit is not readily formed with the known mass in the Solar System. This typically means a perihelion greater than 50 AU (beyond the range of significant Neptune interactions) and an orbit in the range 150–1,150 AU.



# On remet ça?

- 2014: nouvel objet d'orbite très similaire à Sedna...

## LETTER

### A Sedna-like body with astronomical units

Chadwick A. Trujillo<sup>1\*</sup> & Scott S. Sheppard<sup>2\*</sup>

The observable Solar System can be divided into three distinct regions: the rocky terrestrial planets including the asteroids at distances from the Sun between 1 and 4.2 astronomical units (AU) from the Sun (where 1 AU is the distance between Earth and the Sun), the gas giant planets at 5 to 30 AU from the Sun, and the icy Kuiper belt objects at 30 to 50 AU from the Sun. The 1,000-kilometre-diameter dwarf planet Sedna was discovered ten years ago and was unique in that its closest approach to the Sun (perihelion) is 76 AU, far greater than that of any other Solar System body<sup>1</sup>. Formation models indicate that Sedna could be a link between the Kuiper belt objects and the hypothesized outer Oort cloud at around 10,000 AU from the Sun<sup>2–6</sup>. Here we report the presence of a second Sedna-like object, 2012 VP<sub>113</sub>, whose perihelion is 80 AU. The detection of 2012 VP<sub>113</sub> confirms that Sedna is not an isolated object; instead, both bodies may be members of the inner Oort cloud, whose objects could outnumber all other dynamically stable populations in the Solar System.

The inner Oort cloud objects probably formed on nearly circular orbits, allowing them to accumulate mass efficiently<sup>6–9</sup>, and were later perturbed into the eccentric orbits we see today. We define an inner Oort cloud object as a body whose orbit is not readily formed with the known mass in the Solar System. This typically means a perihelion greater than 50 AU (beyond the range of significant Neptune interactions) and an aphelion in the range 150–1,150 AU.

THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 151:22 (12pp), 2016 February  
© 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/0004-6256/151/2/22



#### EVIDENCE FOR A DISTANT GIANT PLANET IN THE SOLAR SYSTEM

KONSTANTIN BATYGIN AND MICHAEL E. BROWN

Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA; kbatygin@gps.caltech.edu

Received 2015 November 13; accepted 2016 January 10; published 2016 January 20

#### ABSTRACT

Recent analyses have shown that distant orbits within the scattered disk population of the Kuiper Belt exhibit an unexpected clustering in their respective arguments of perihelion. While several hypotheses have been put forward to explain this alignment, to date, a theoretical model that can successfully account for the observations remains elusive. In this work we show that the orbits of distant Kuiper Belt objects (KBOs) cluster not only in argument of perihelion, but also in physical space. We demonstrate that the perihelion positions and orbital planes of the objects are tightly confined and that such a clustering has only a probability of 0.007% to be due to chance, thus requiring a dynamical origin. We find that the observed orbital alignment can be maintained by a distant eccentric planet with mass  $\gtrsim 10 m_{\oplus}$  whose orbit lies in approximately the same plane as those of the distant KBOs, but whose perihelion is  $180^{\circ}$  away from the perihelia of the minor bodies. In addition to accounting for the observed orbital alignment, the existence of such a planet naturally explains the presence of high-perihelion Sedna-like objects, as well as the known collection of high semimajor axis objects with inclinations between  $60^{\circ}$  and  $150^{\circ}$  whose origin was previously unclear. Continued analysis of both distant and highly inclined outer solar system objects provides the opportunity for testing our hypothesis as well as further constraining the orbital elements and mass of the distant planet.

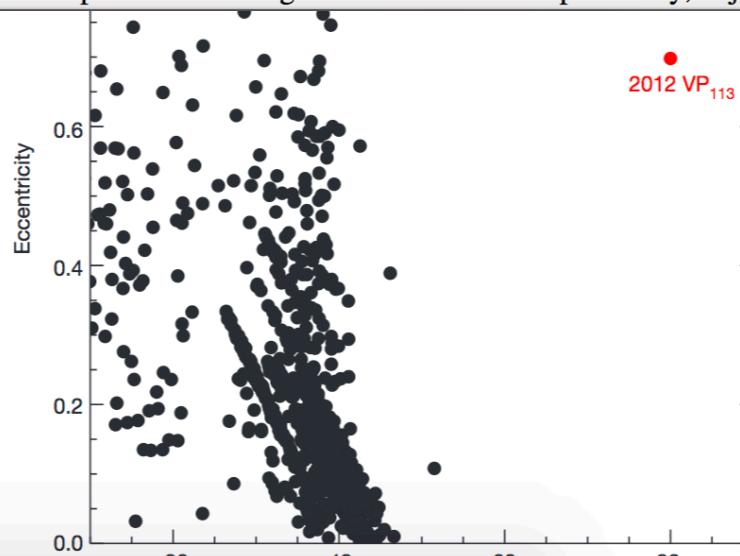
**Key words:** Kuiper Belt: general – planets and satellites: dynamical evolution and stability

#### 1. INTRODUCTION

The recent discovery of 2012VP<sub>113</sub>, a Sedna-like body and a potential additional member of the inner Oort cloud, prompted Trujillo & Sheppard (2014) to note that a set of Kuiper Belt objects (KBOs) in the distant solar system exhibits unexplained clustering in orbital elements. Specifically, objects

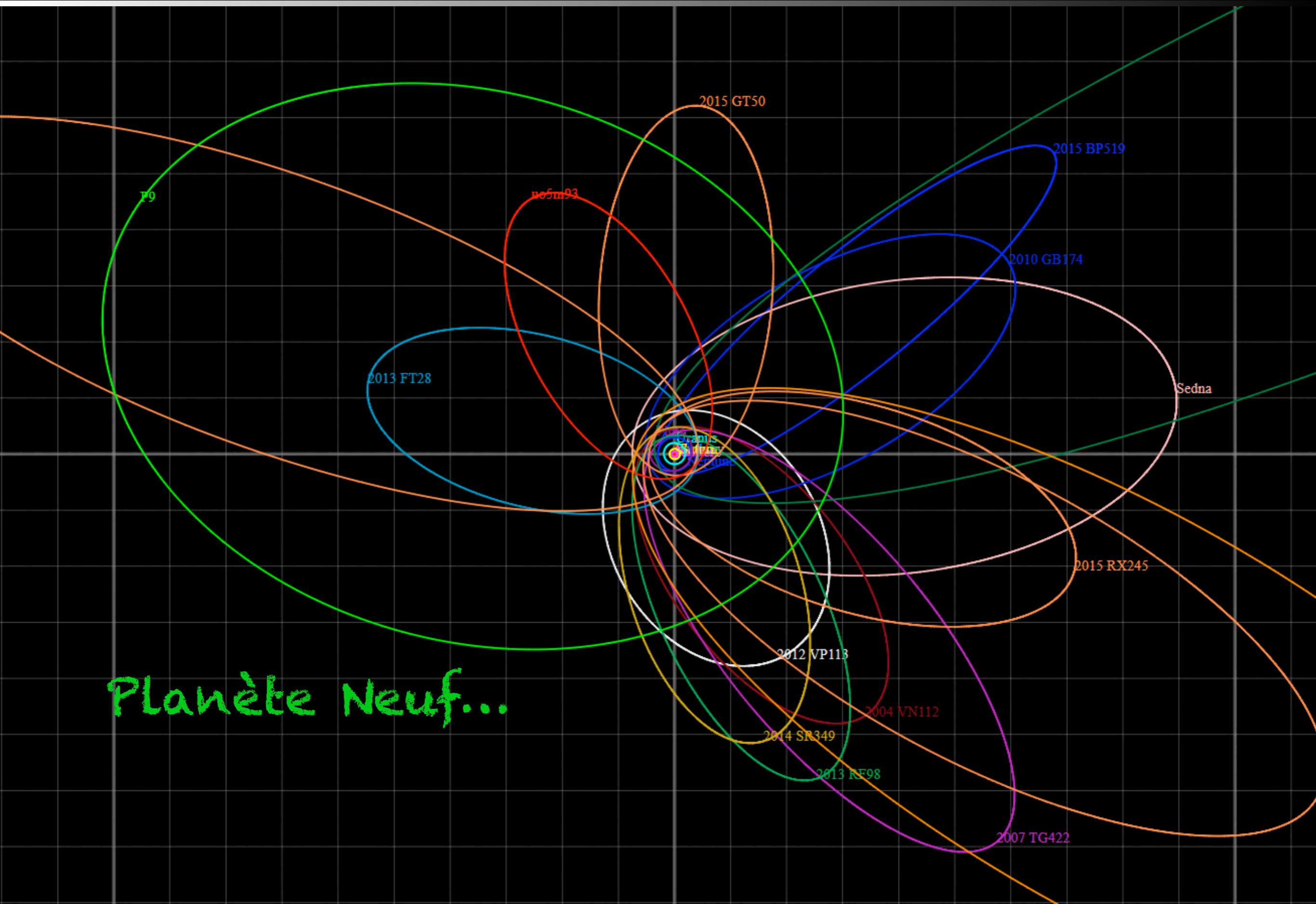
ratio of the object to perturber semimajor axis to be nearly unity. This means that trapping all of the distant objects within the known range of semimajor axes into Kozai resonances likely requires multiple planets, finely tuned to explain the particular data set.

Further problems may potentially arise with the Kozai hypothesis. Trujillo & Sheppard (2014) point out that the Kozai

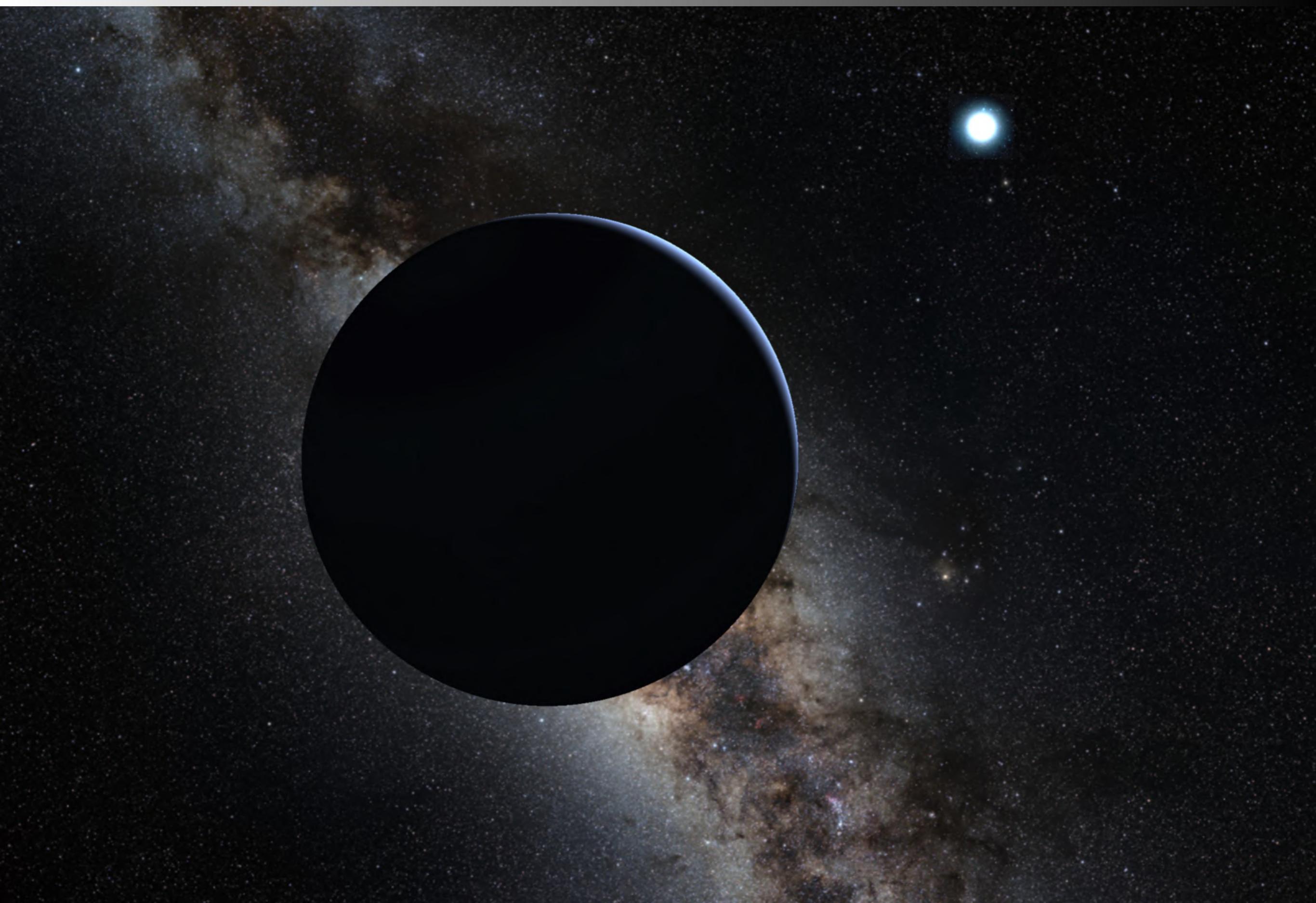


- 2016: de telles orbites pourraient être expliquées par une planète massive!

# Une neuvième planète?

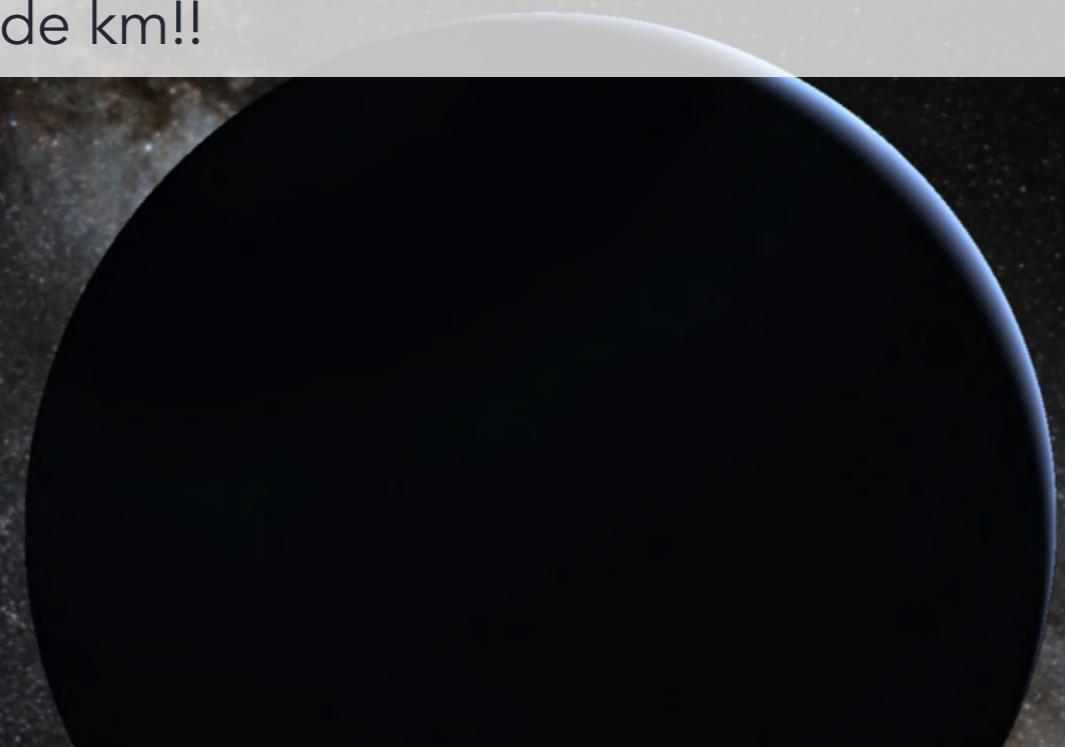


# Une neuvième planète?

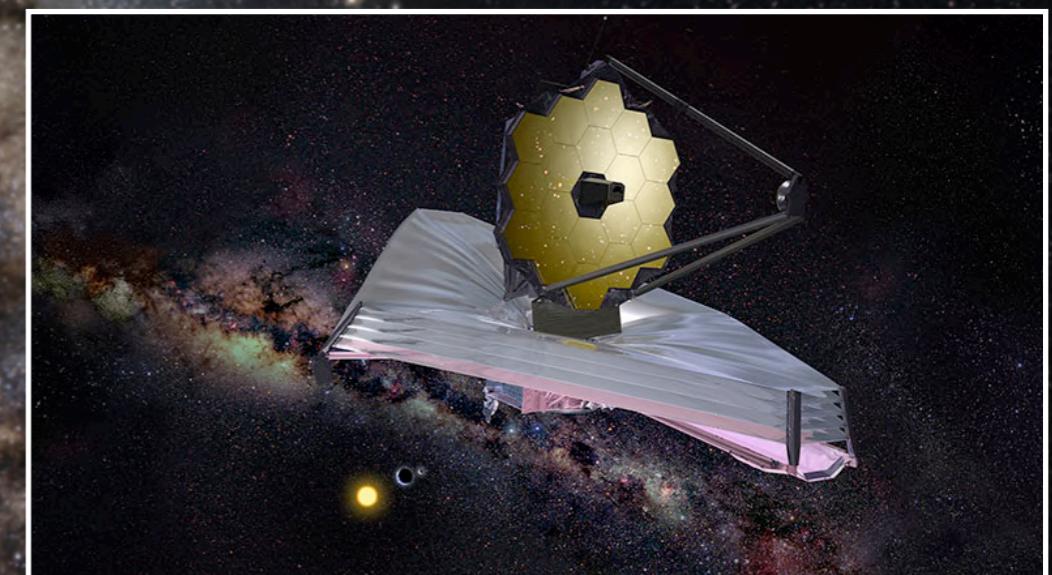


# Une neuvième planète?

- Masse: environ 10 fois celle de la Terre (un peu moins massive que Neptune)
  - Pour une telle masse, la planète serait gazeuse...
- 350 - 800 u.a. (!!)
  - 30 milliards de km!!



- Exploration in situ?
  - Si confirmation lors du lancement du télescope spatial James Webb: 2021
  - Préparation de la "Mission Planète Neuf": +10 ans = 2031
  - Temps de voyage au périhélie: +57 ans = 2088
  - Temps de voyage à l'aphélie: +343 ans = 2374



# Conclusions

- 📌 Pluton nous donne de précieuses informations sur la formation de notre Système Solaire!
- 📌 Une mission spatiale d'exploration, ça prend du temps!
- 📌 On n'est même pas sûrs du nombre de planètes dans notre propre Système Solaire!