



**Leçon N. 1 - 23 Octobre 2024**

**Alessandro  
MORBIDELLI**

Chaire

**Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes**

***Origine et évolution du Système solaire externe:  
La ceinture de Kuiper***

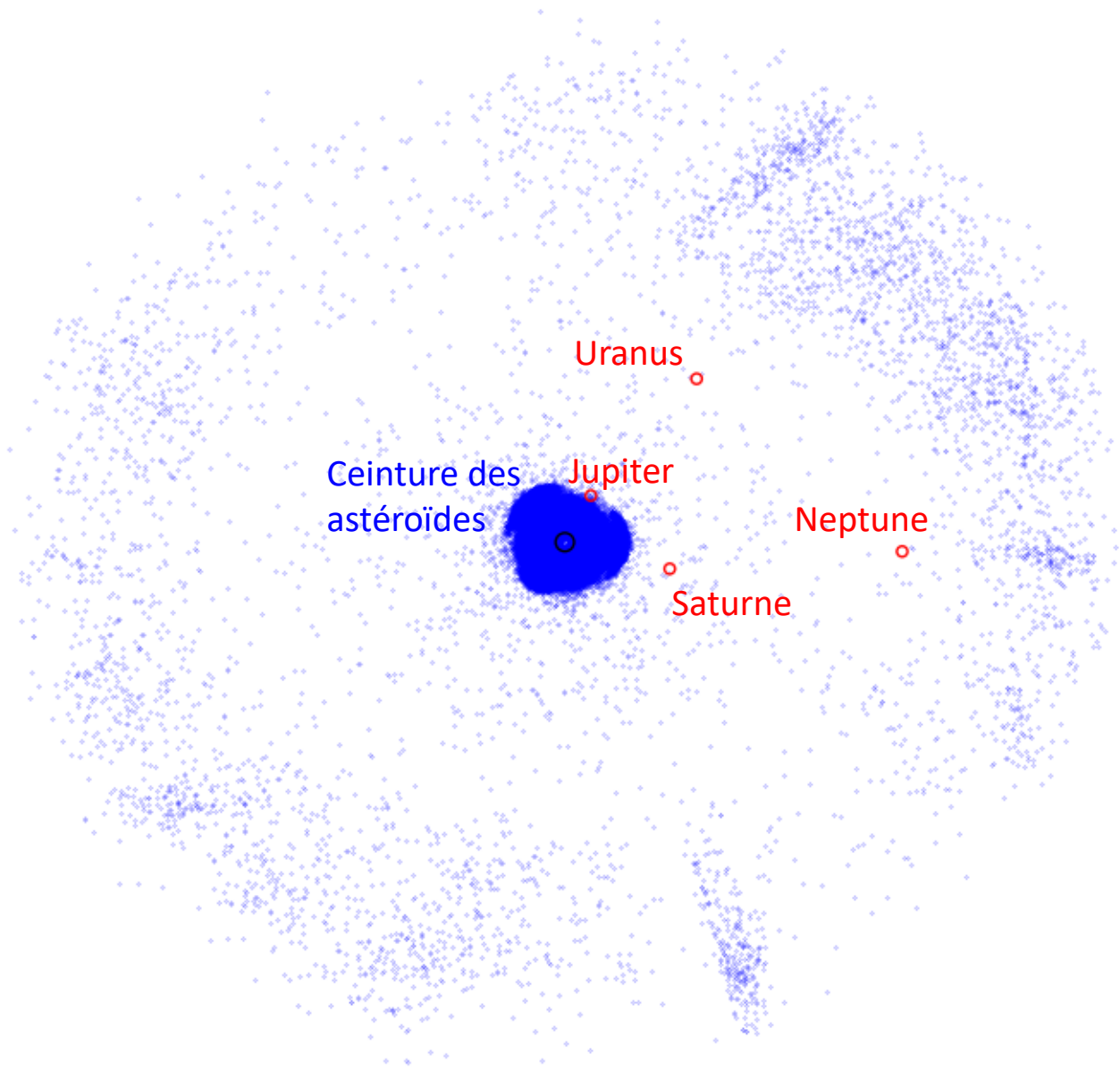


## Le Système solaire externe





# La population des objets trans-neptuniens (TNO) – ceinture de Kuiper



Premier objet découvert: Pluton en 1930

Deuxième objet découvert: 15760 Albion

Objets connus en 2024: ~ 3 000

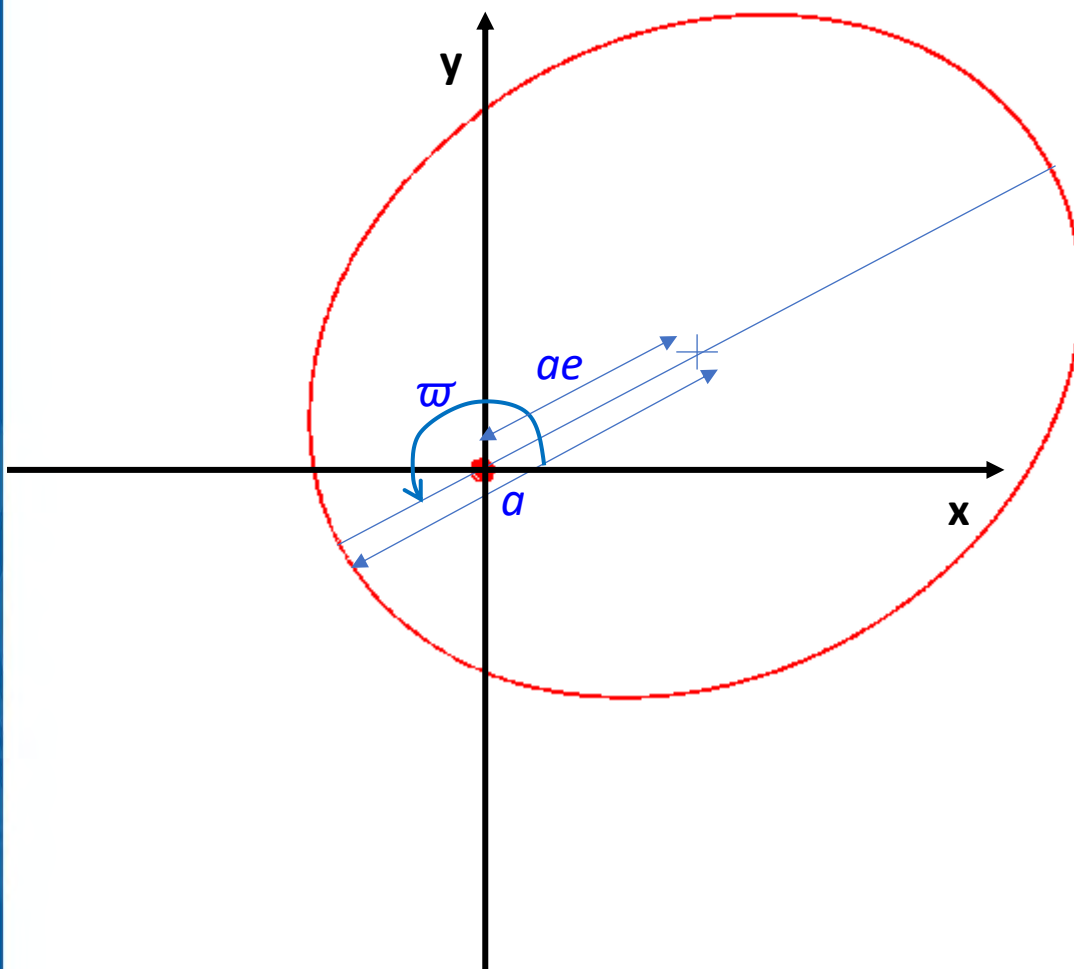


# Les éléments orbitaux

$a$ : demi grand axe

$e$ : excentricité

$\varpi$ : longitude du périhélie



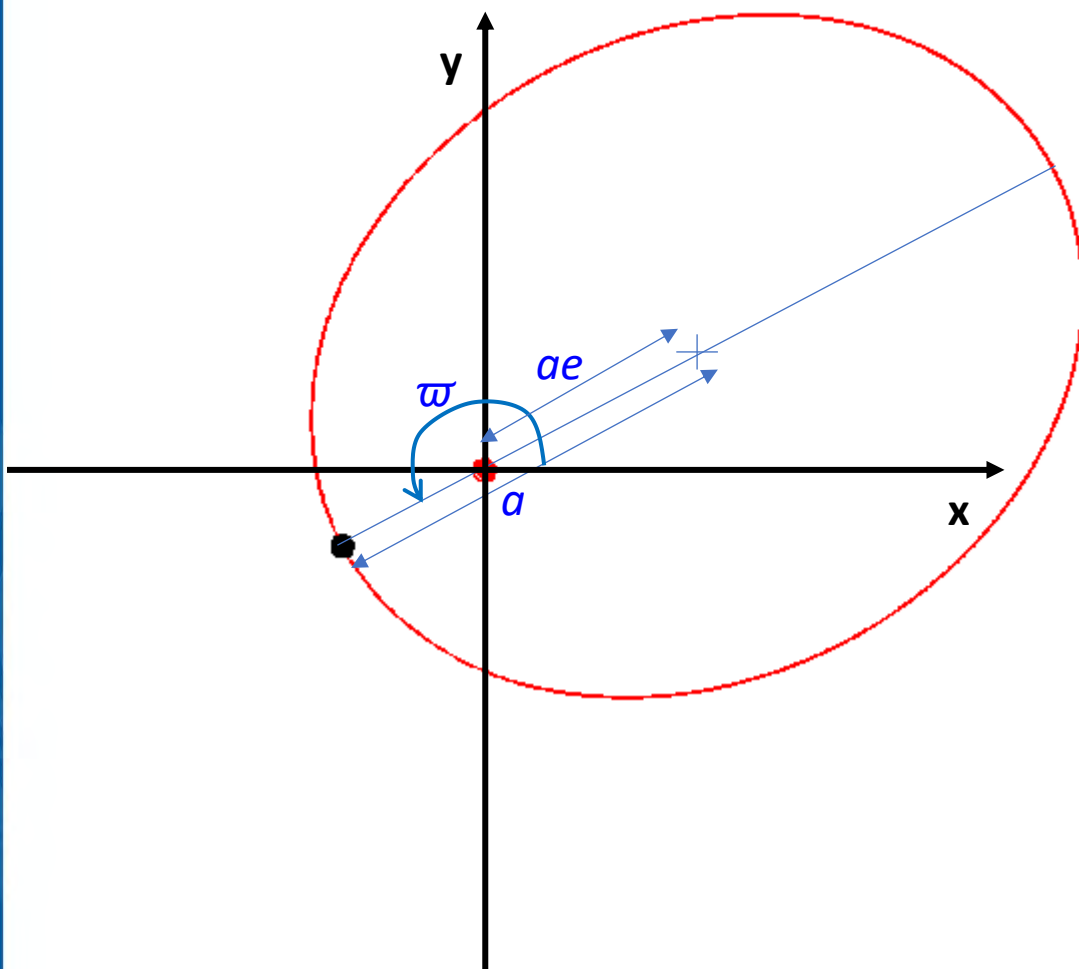


# Les éléments orbitaux

$a$ : demi grand axe

$e$ : excentricité

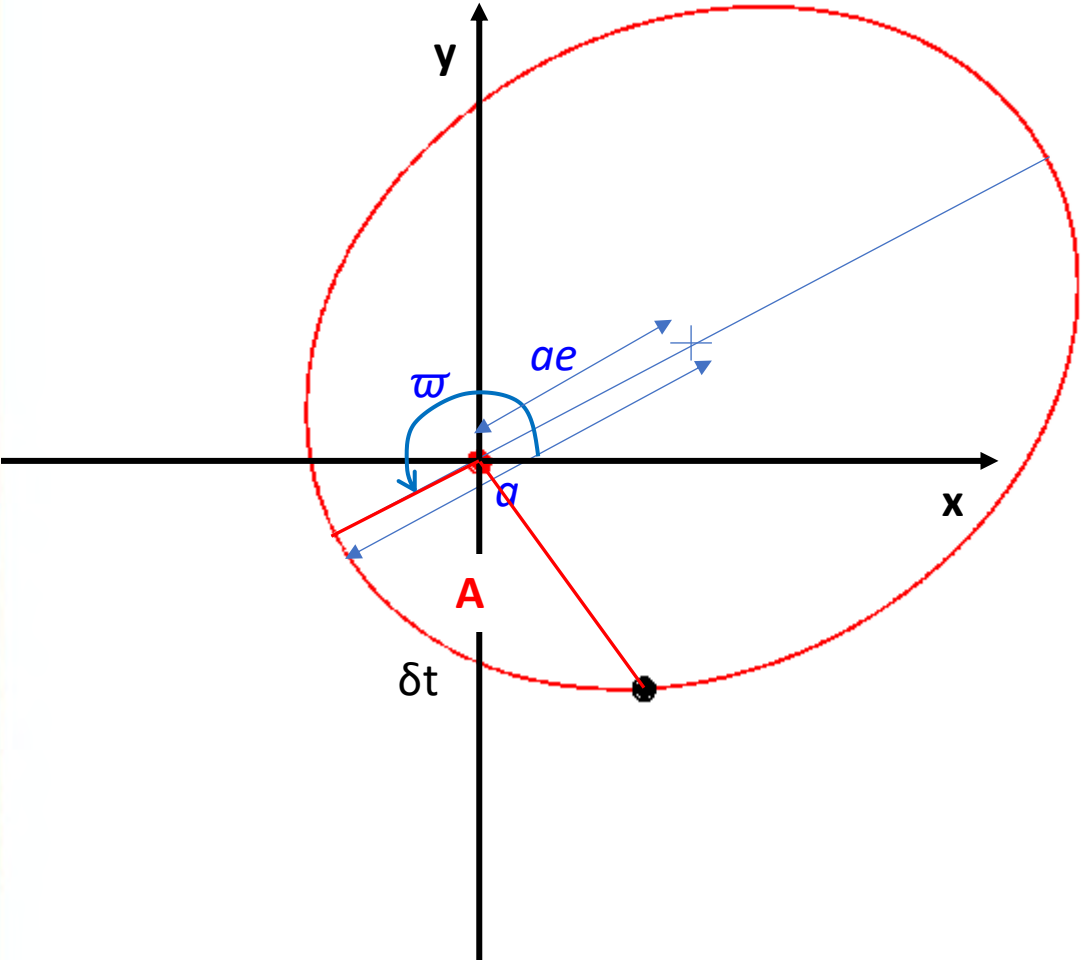
$\varpi$ : longitude du périhélie





# Les éléments orbitaux

- $a$ : demi grand axe
- $e$ : excentricité
- $\varpi$ : longitude du périhélie





# Les éléments orbitaux

$a$ : demi grand axe

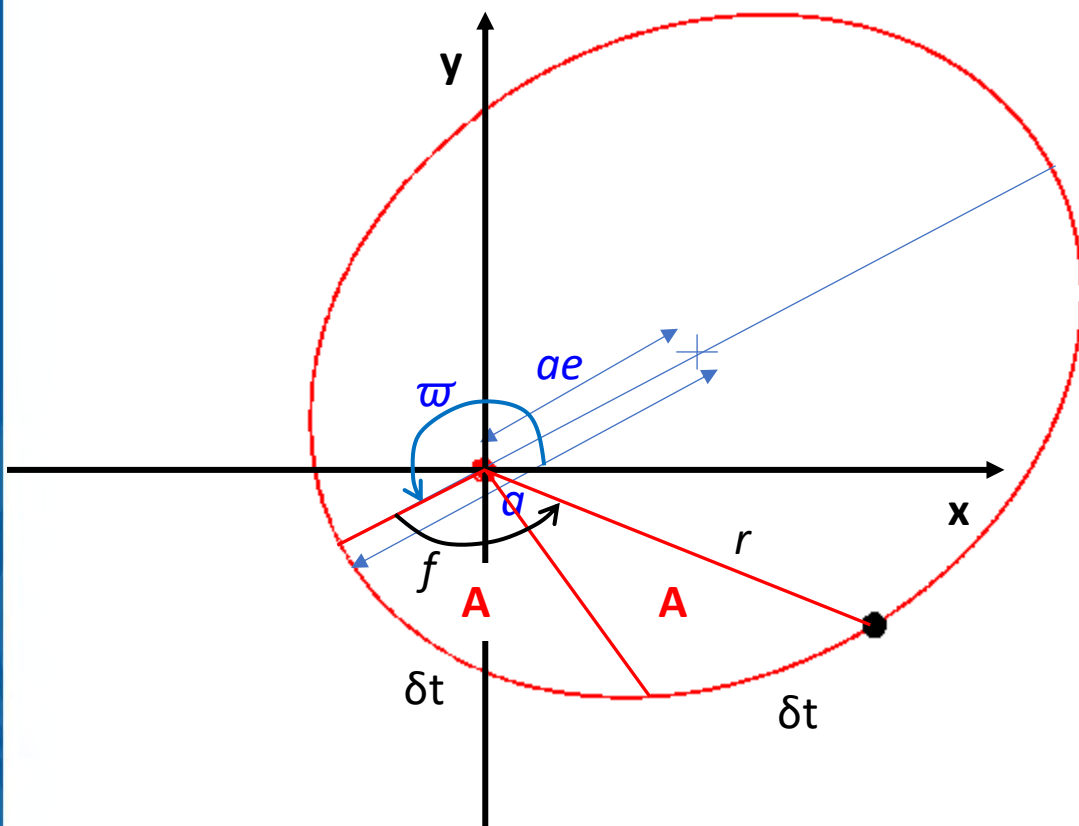
$e$ : excentricité

$\varpi$ : longitude du périhélie

$M = 2\pi A(t)/A_{\text{tot}}$ : anomalie moyenne

$$E - e \sin E = M$$

$$r = a(1 - e \cos E), \quad \cos f = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}$$

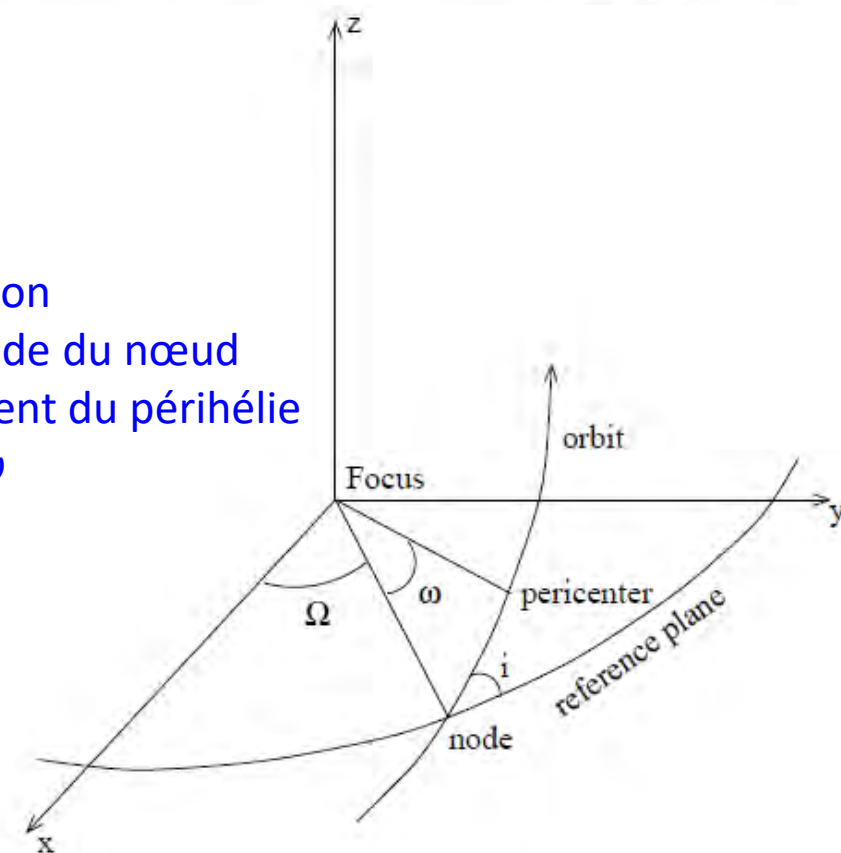


$i$ : inclinaison

$\Omega$ : longitude du nœud

$\omega$ : argument du périhélie

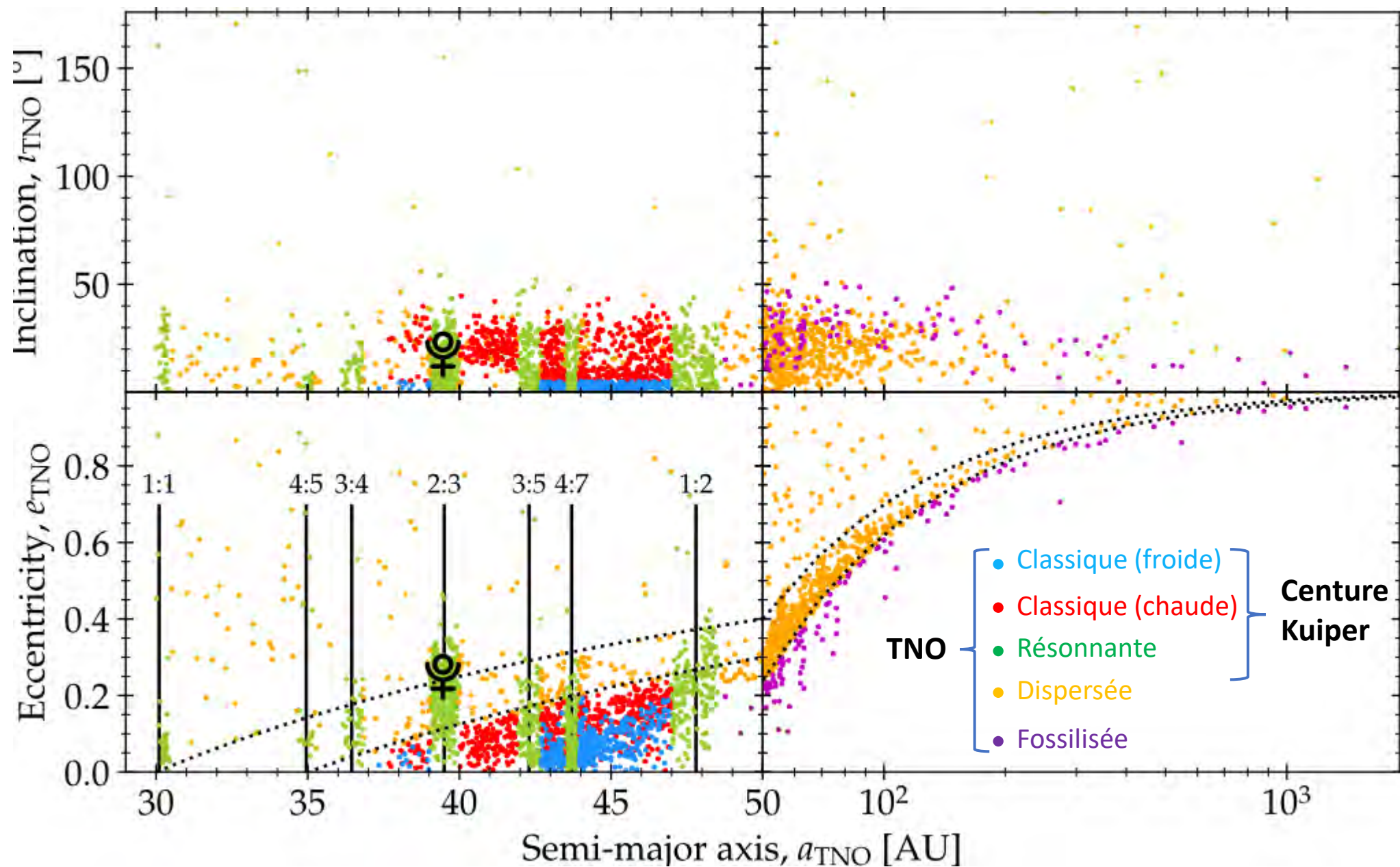
$$\varpi = \Omega + \omega$$



**La période orbitale dépend uniquement du demi grand axe**



# La population trans-neptunienne en éléments orbitaux

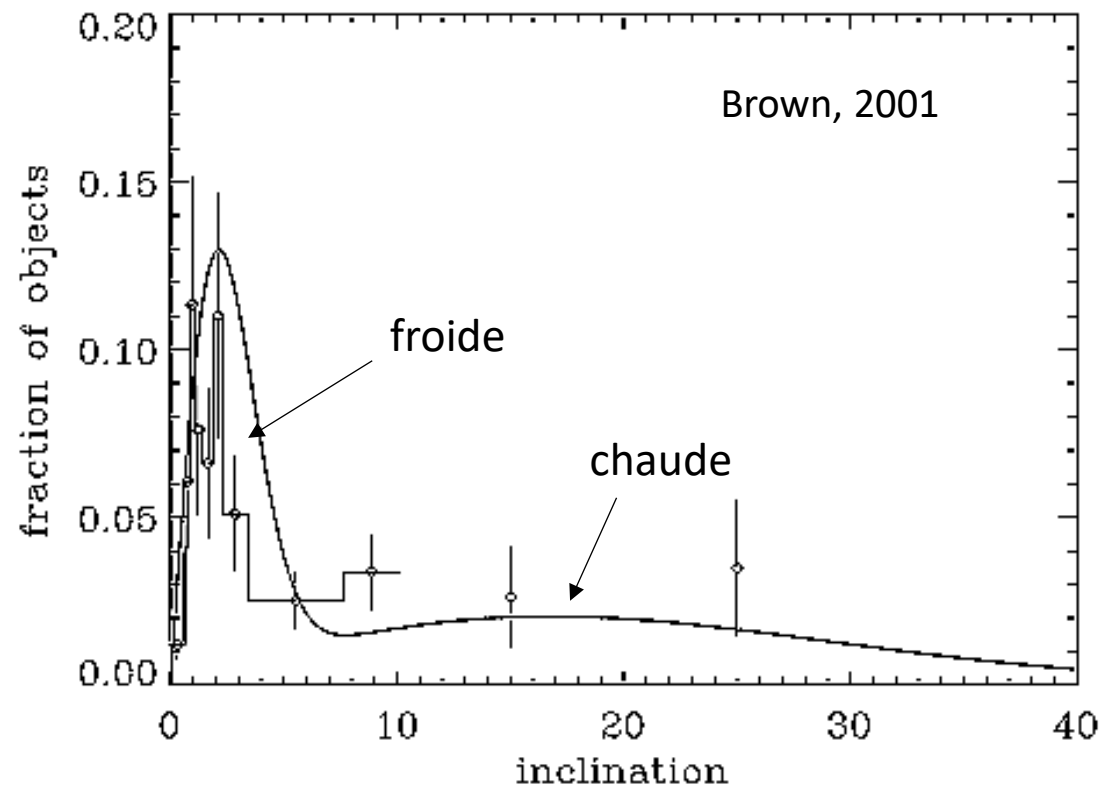






# La ceinture classique

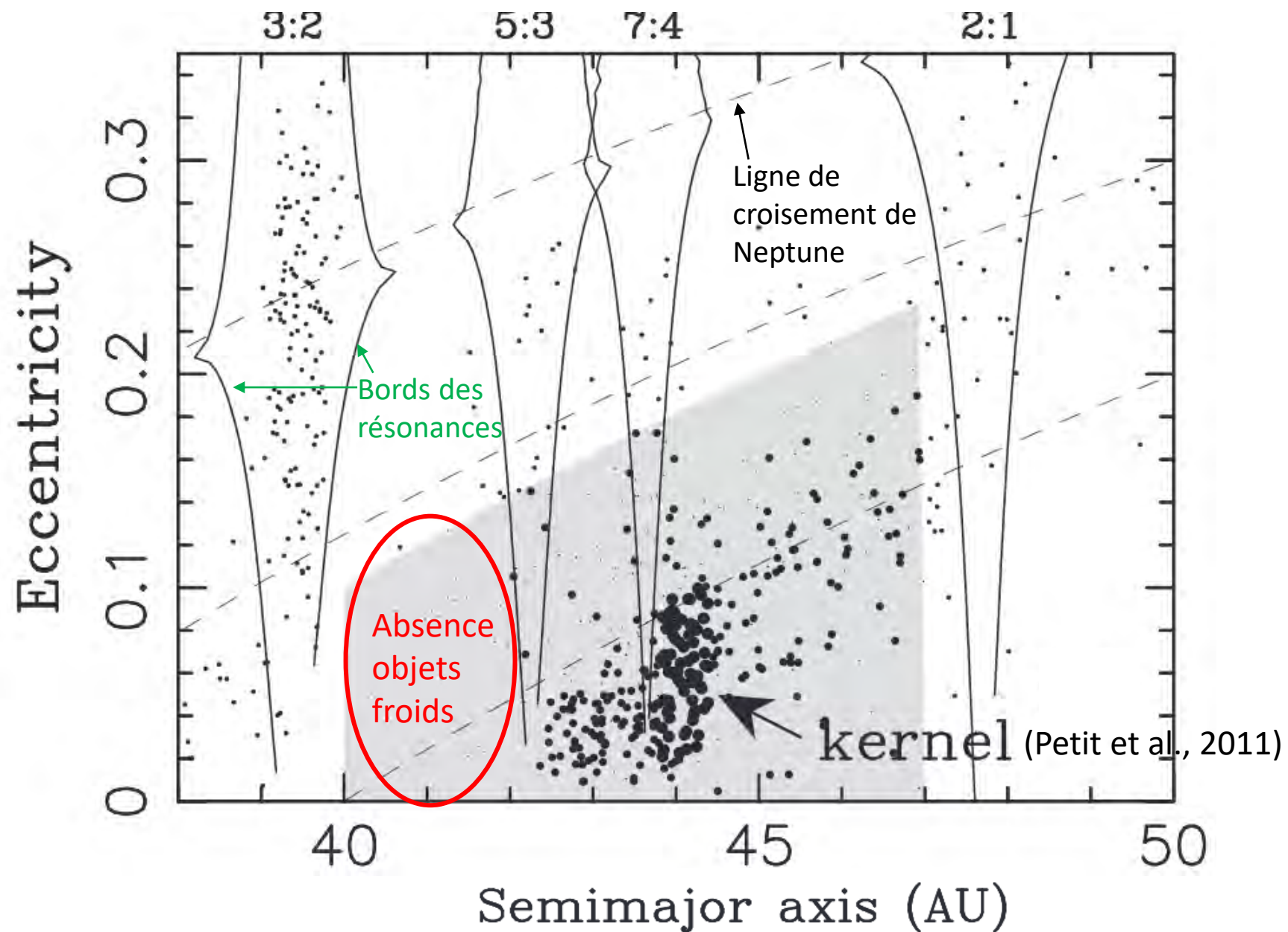
Distribution bimodale des inclinaisons





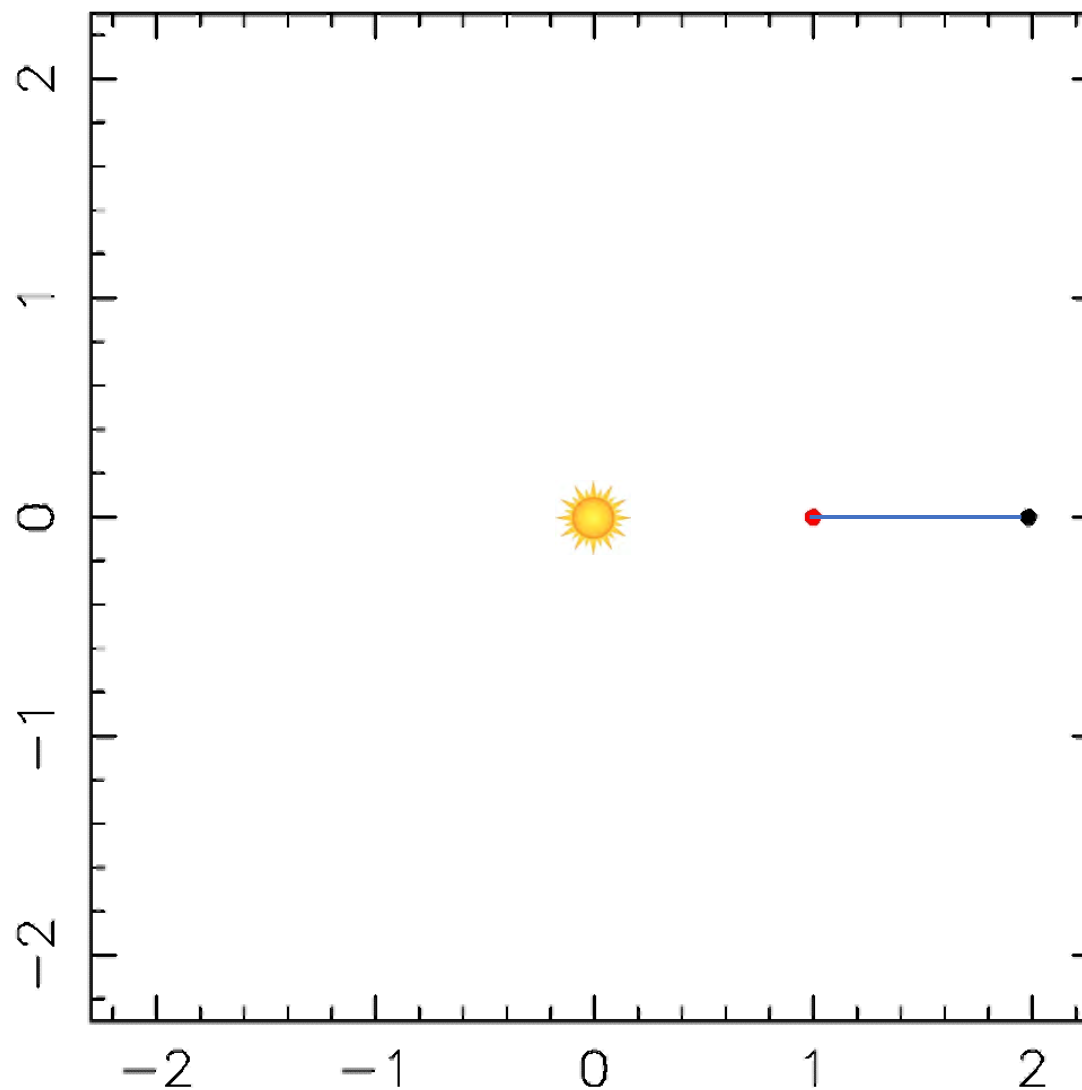
## La ceinture classique

- pop. froide
- pop. chaude
- pop. résonnante ou dispersée





## Exemple de résonance (2:1)

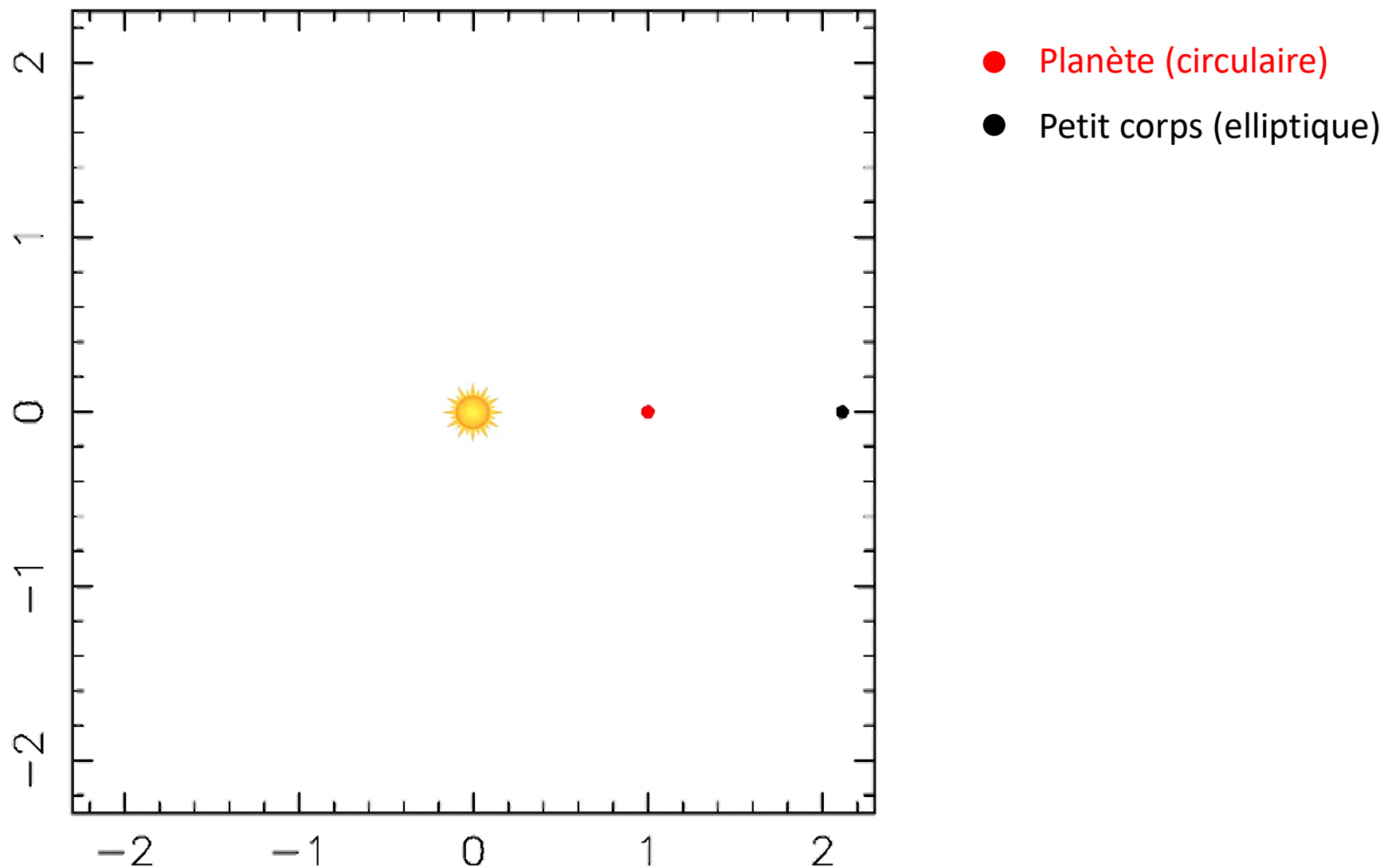


- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)

Conjonction = distance d'approche minimale

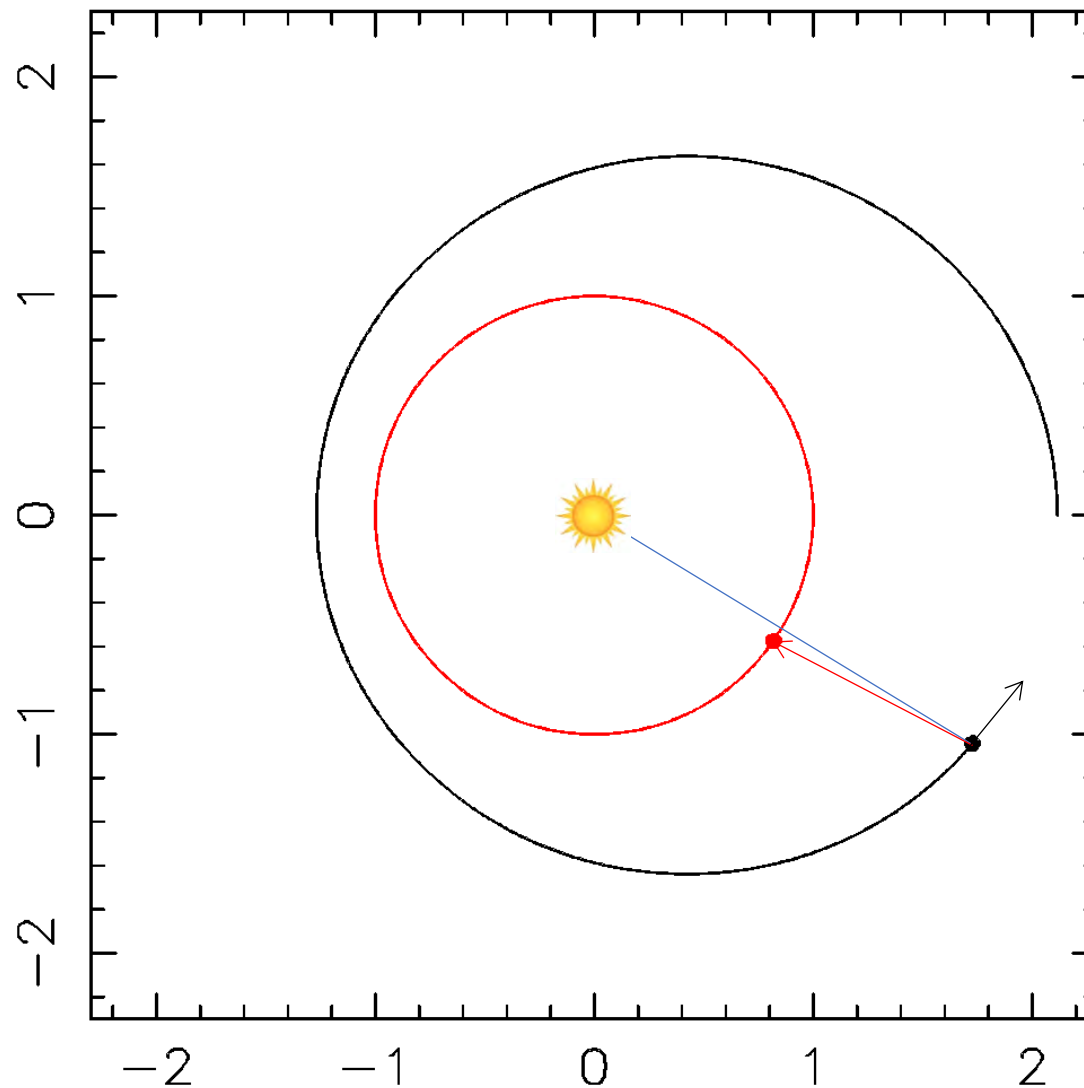


## Cas légèrement extérieur à la résonance (2:1)





## Configuration d'approche minimale



- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)

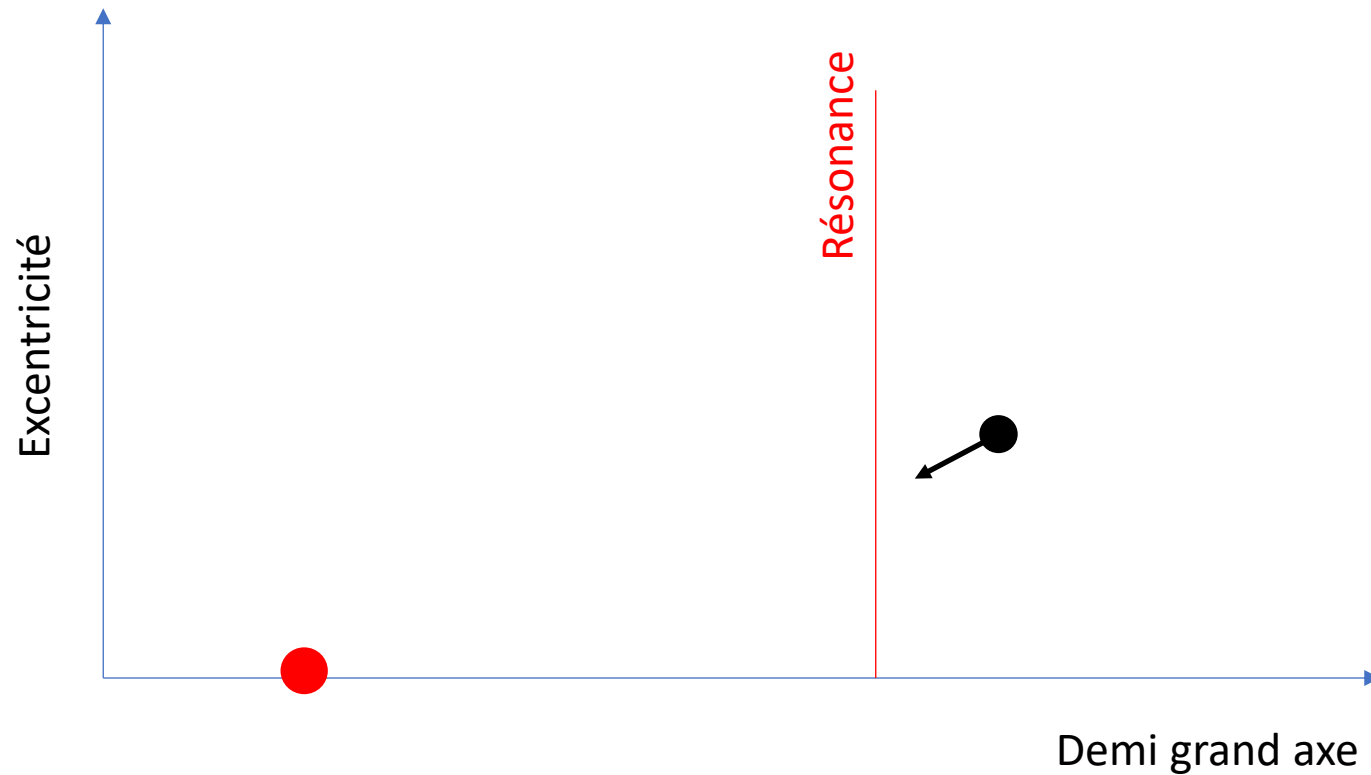
Distance minimale d'approche :

- Le mouvement radial positif du petit corps est freiné (l'excentricité diminue)
- La vitesse azimutale est aussi freinée (le demi-grand axe diminue)



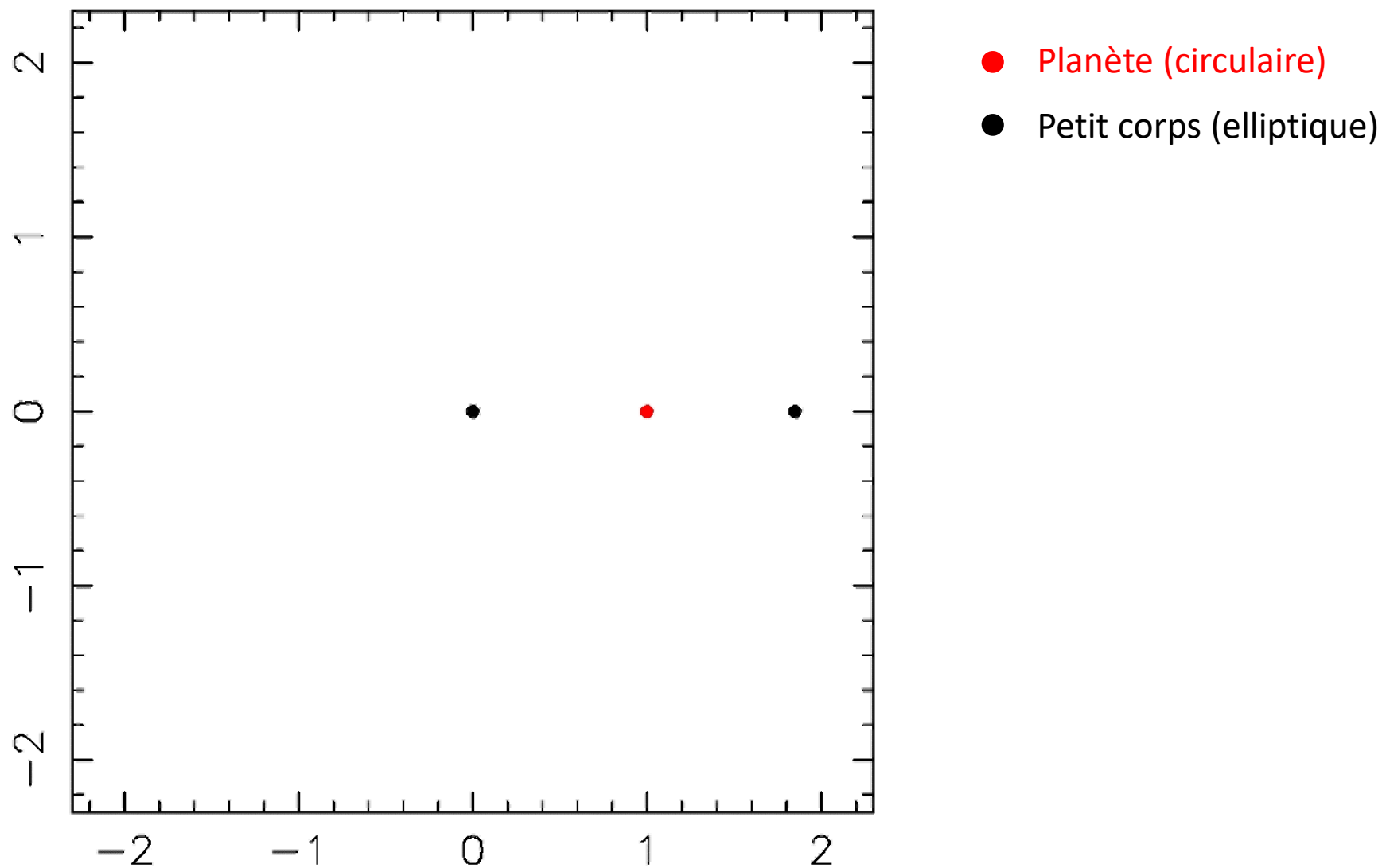
# Changement par rapport à la résonance

- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)



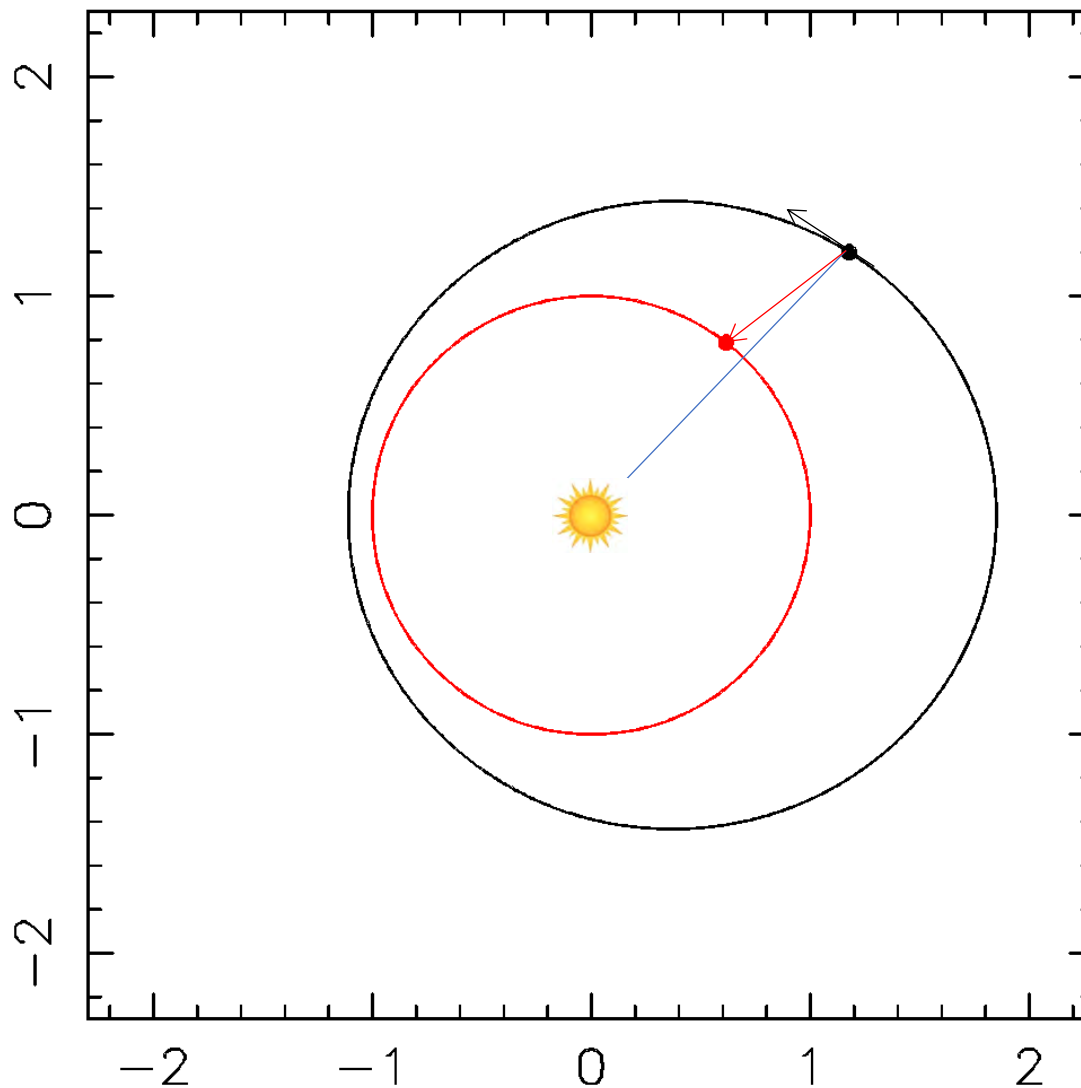


## Cas légèrement intérieur à la résonance (2:1)





## Configuration d'approche minimale



- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)

Distance minimale d'approche:

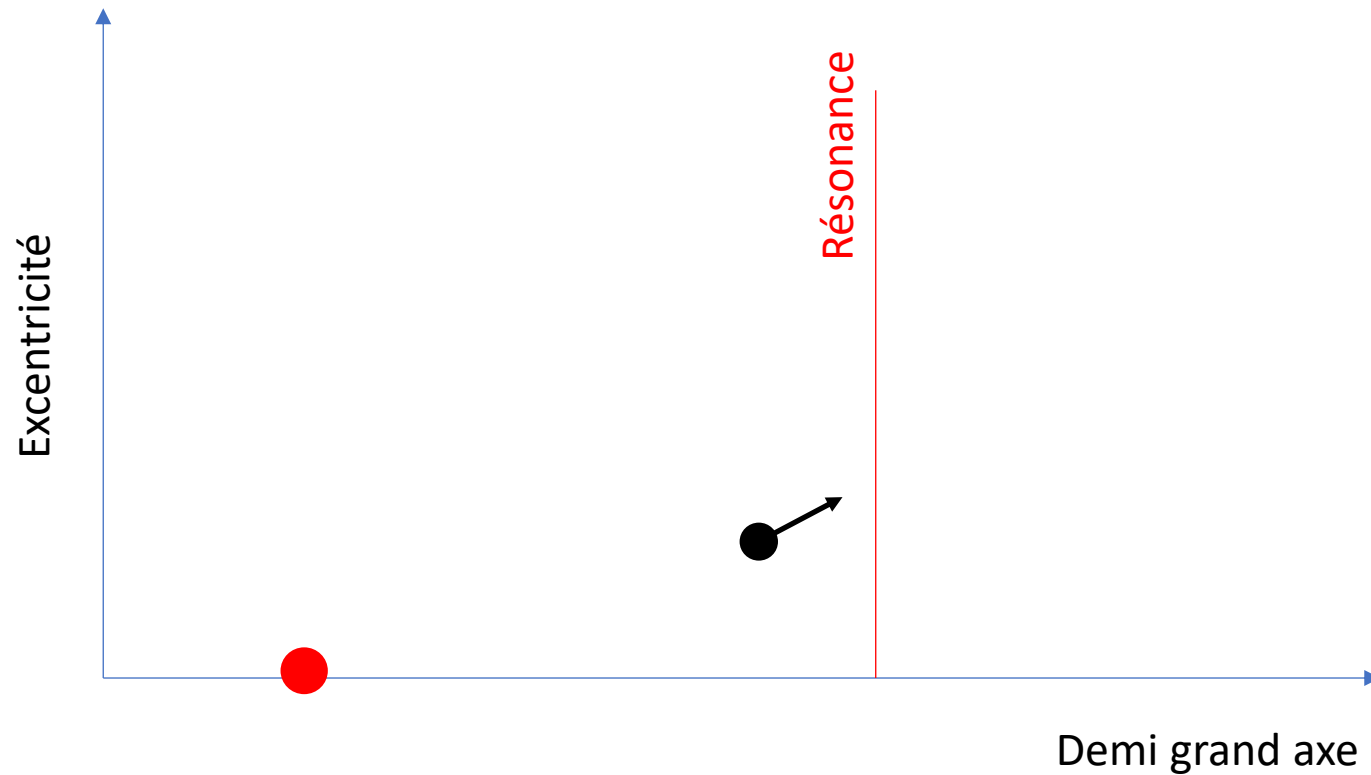
- Le mouvement radial négatif du petit corps est accéléré (l'excentricité augmente)
- La vitesse azimutale est aussi accélérée (le demi-grand axe augmente)





# Changement par rapport à la résonance

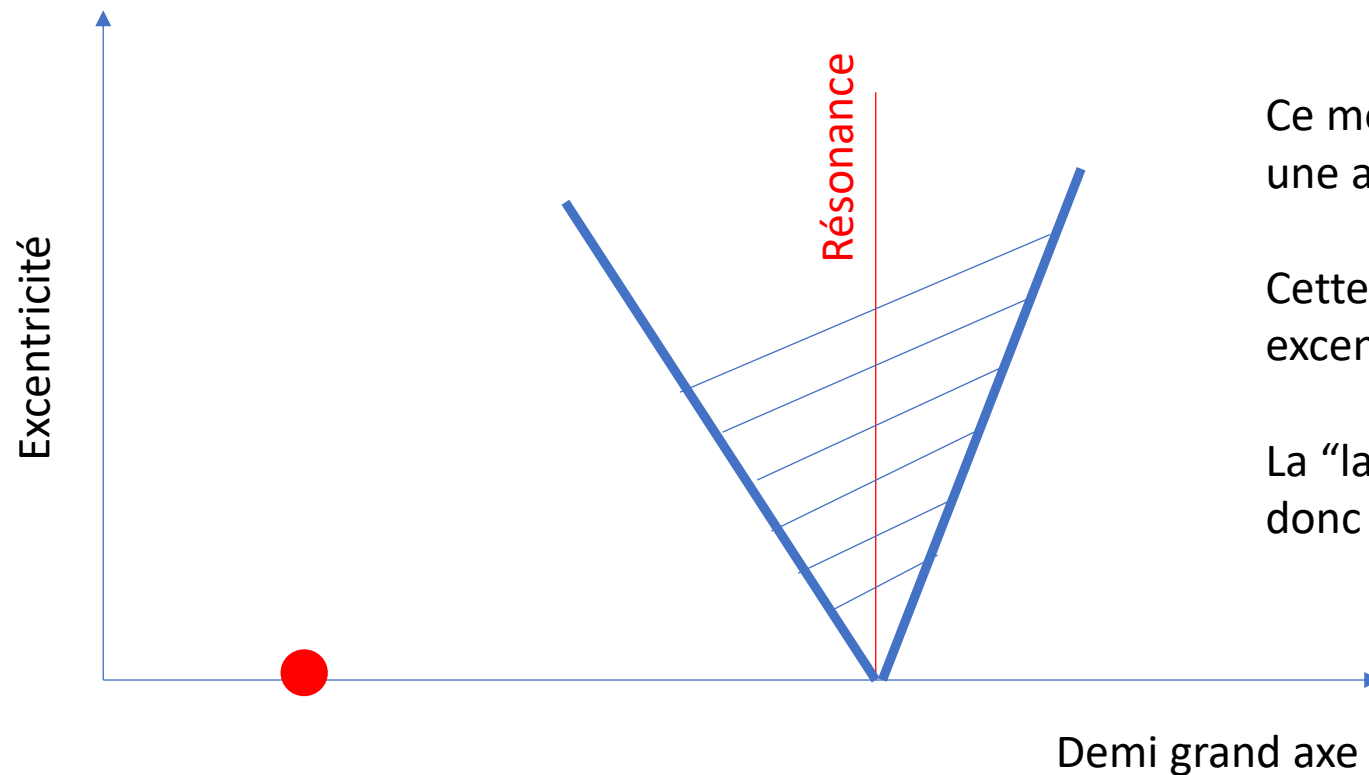
- Planète (circulaire)
- Petit corps (elliptique)





## Mouvement oscillatoire autour de la résonance

● Planète (circulaire)



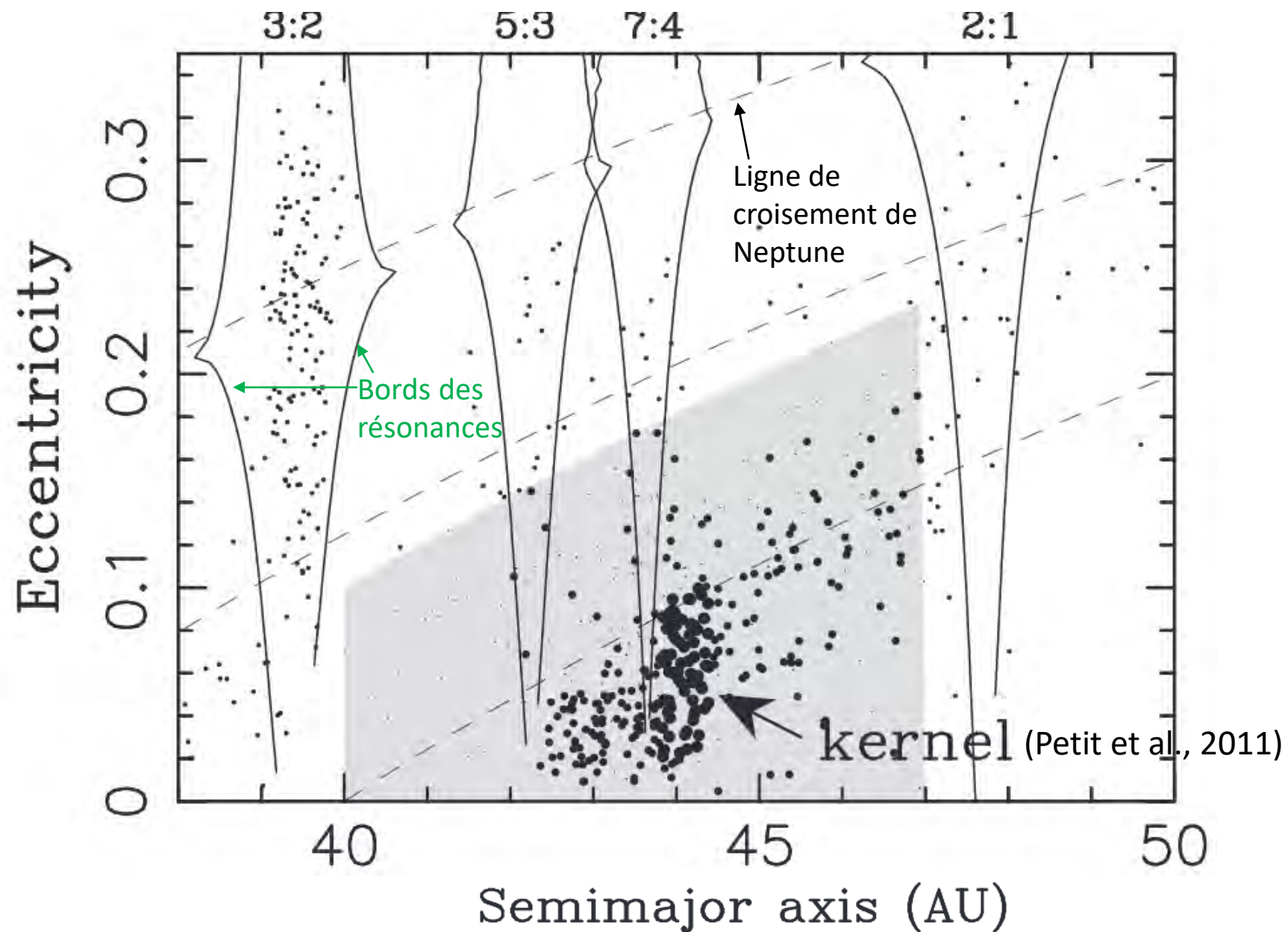
Ce mouvement oscillatoire a une amplitude maximale finie.

Cette amplitude est nulle à excentricité nulle

La "largeur" de la resonance a donc une forme de V

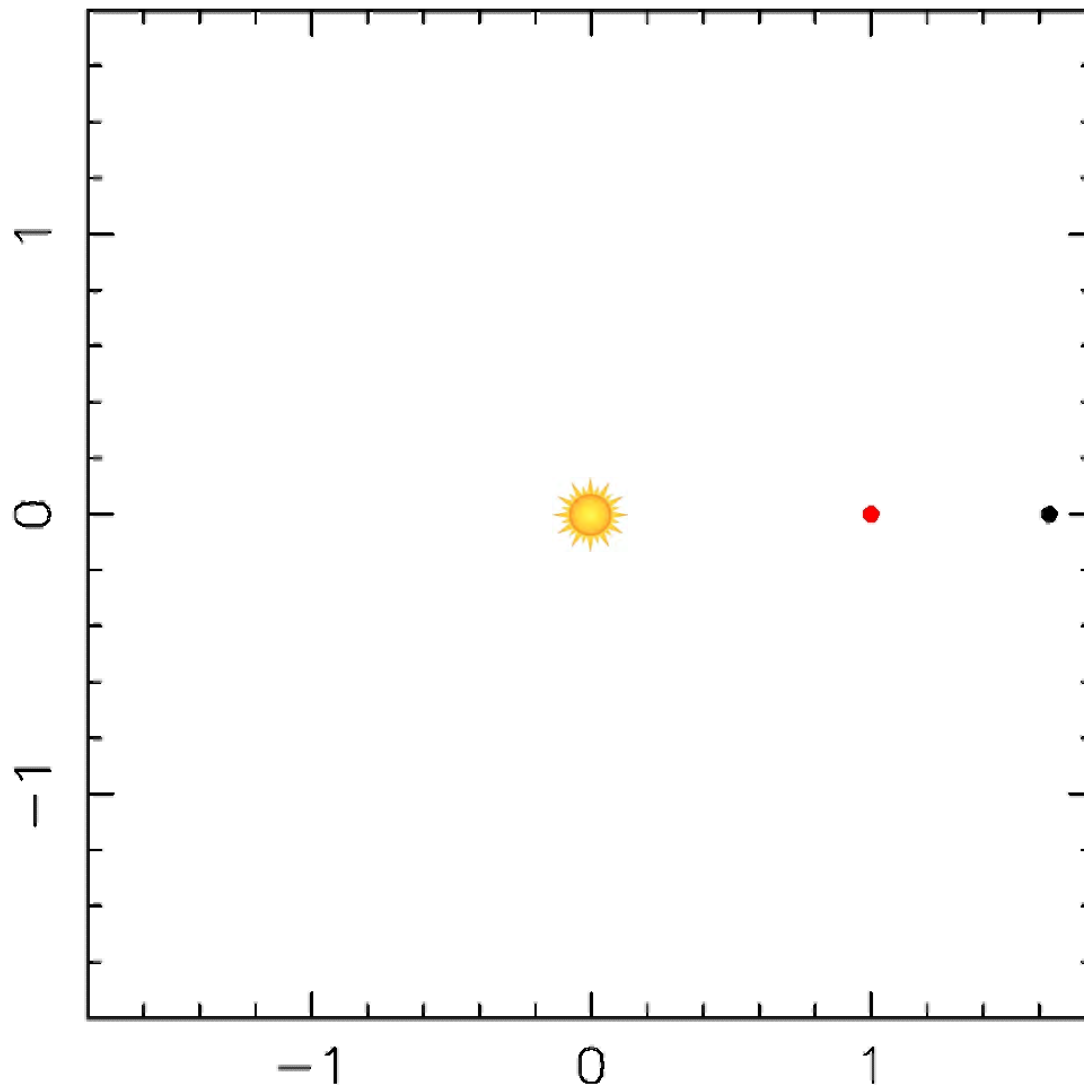


## La ceinture classique



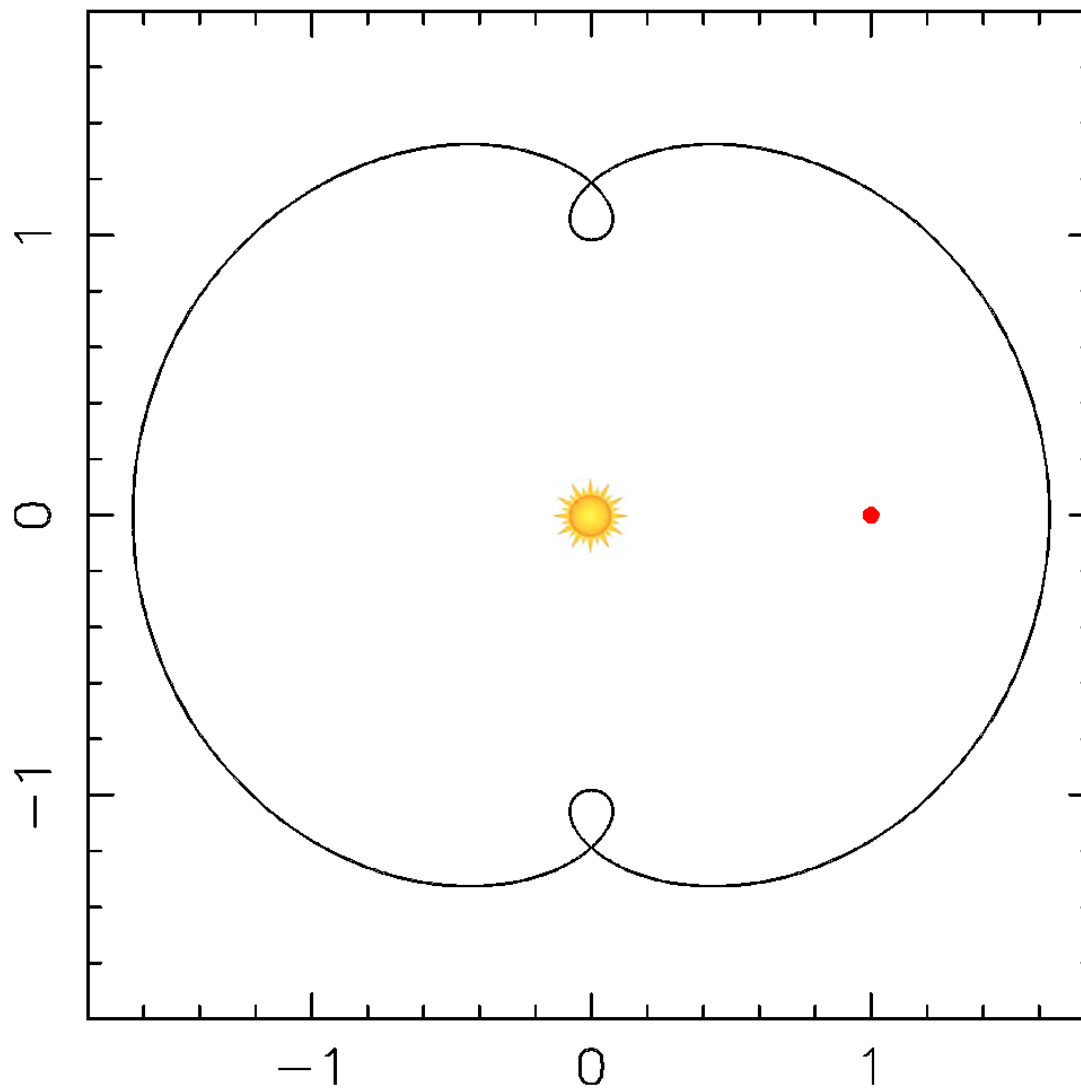


## Protection résonnante vis-à-vis des rencontres proches





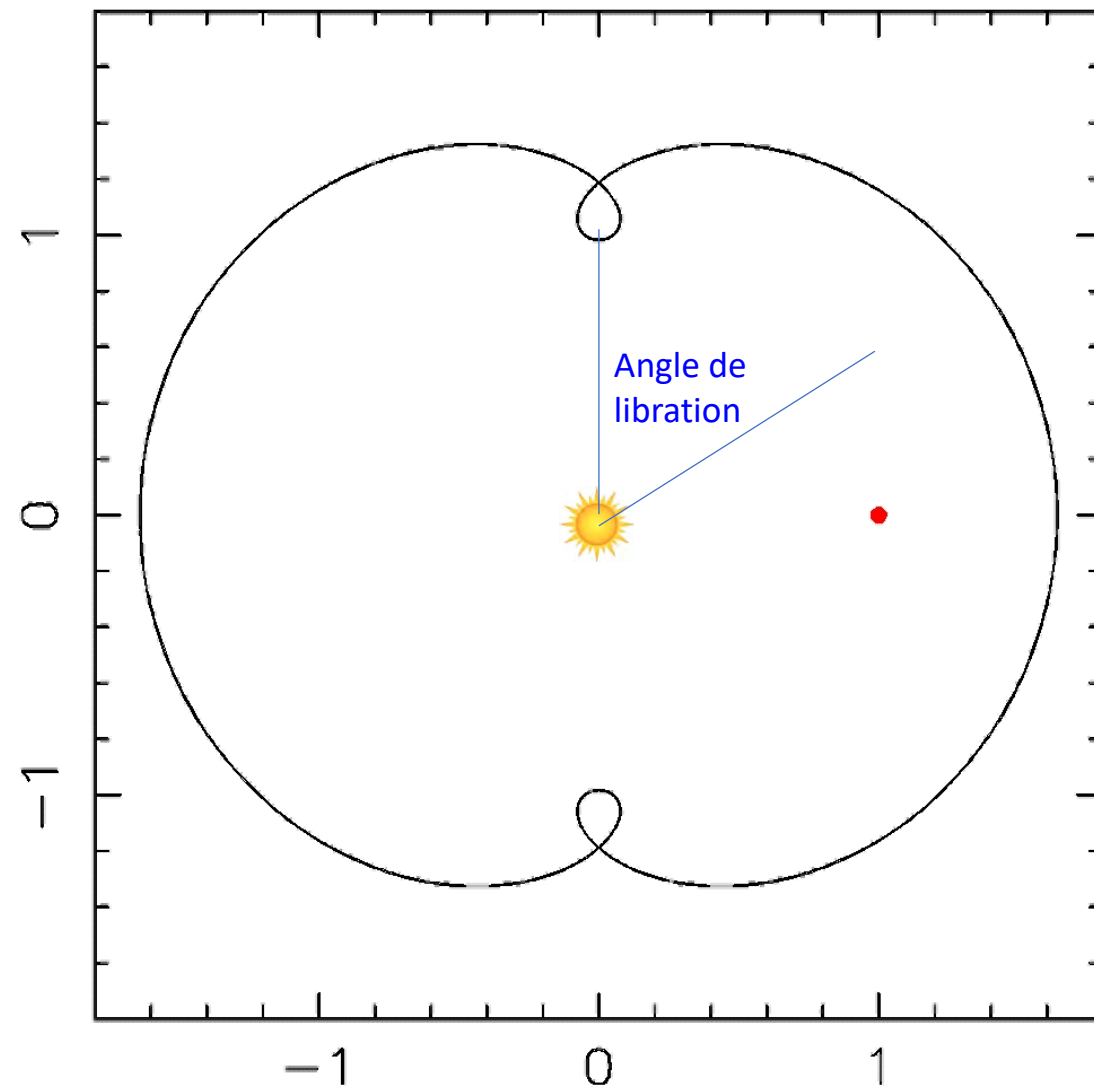
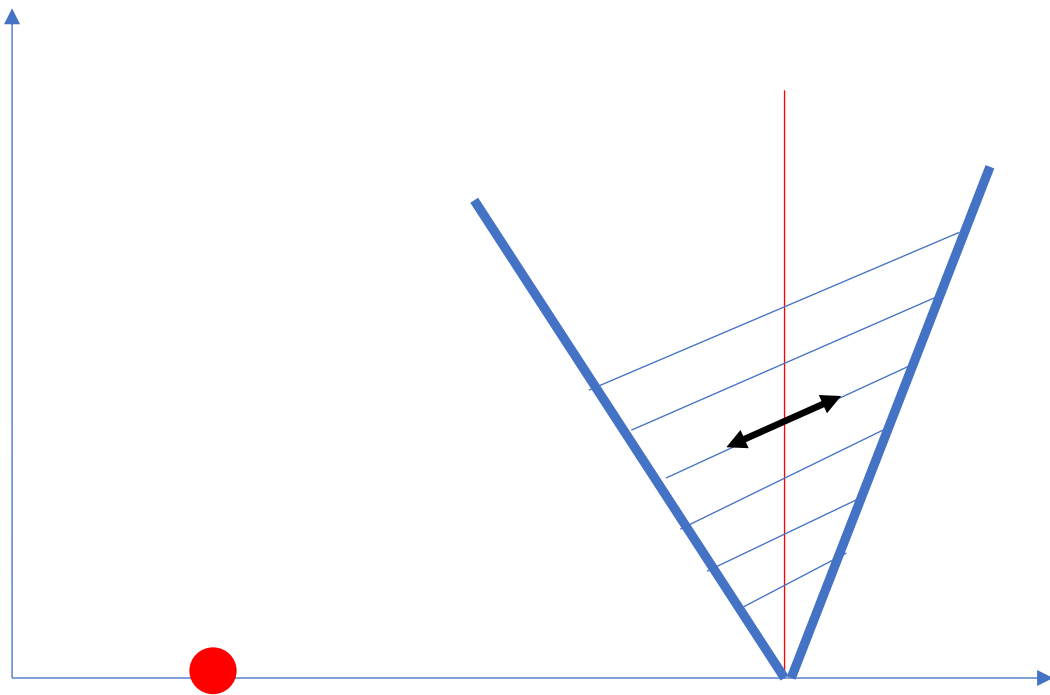
## Protection résonnante vis-à-vis des rencontres proches



Dans le repère tournant  
avec la planète

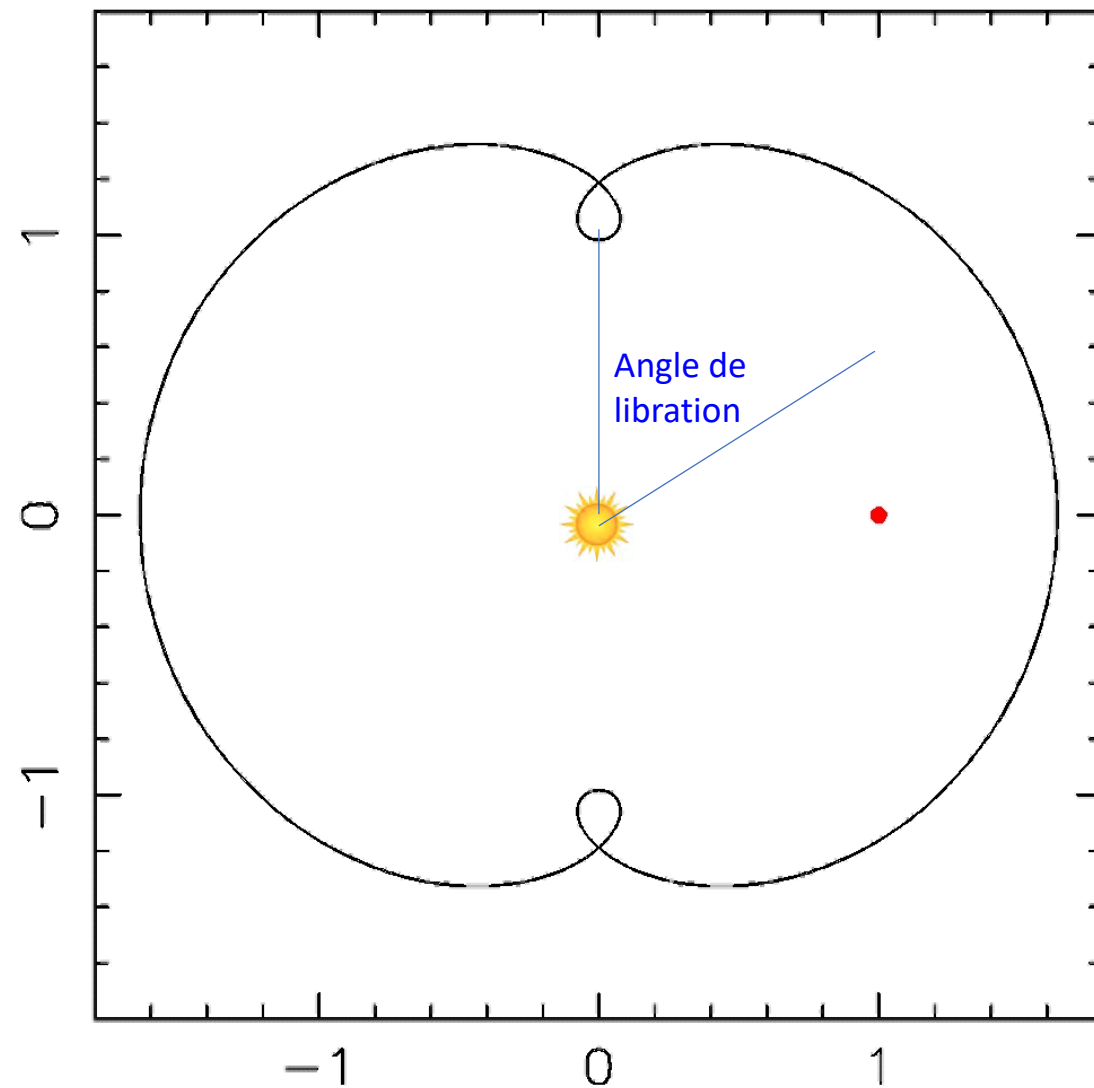
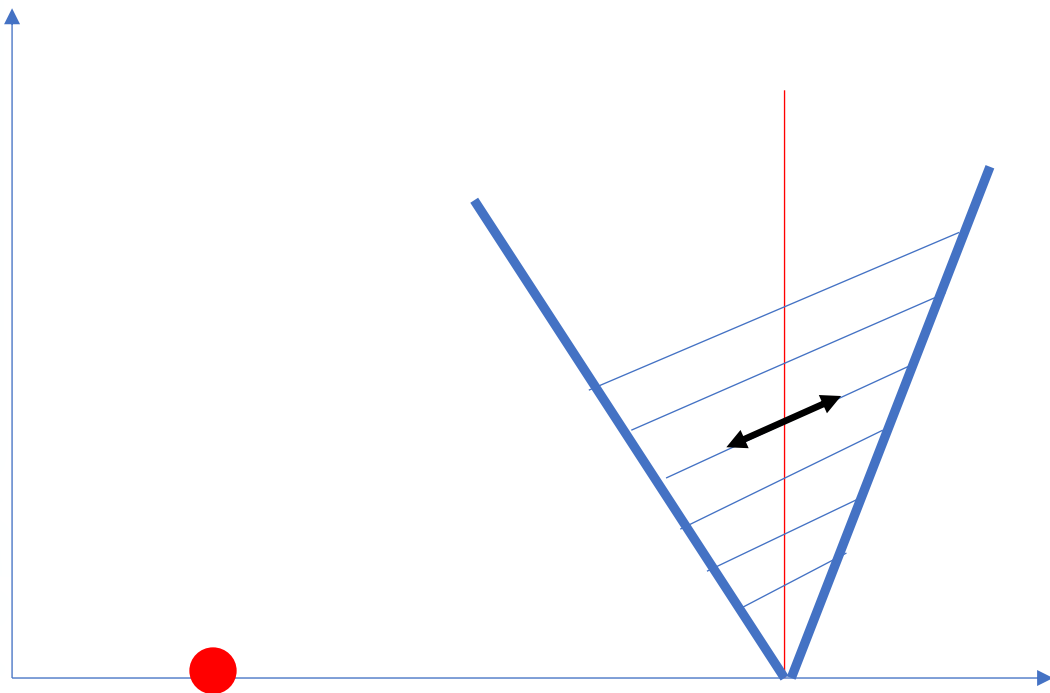


# Librations résonnantes



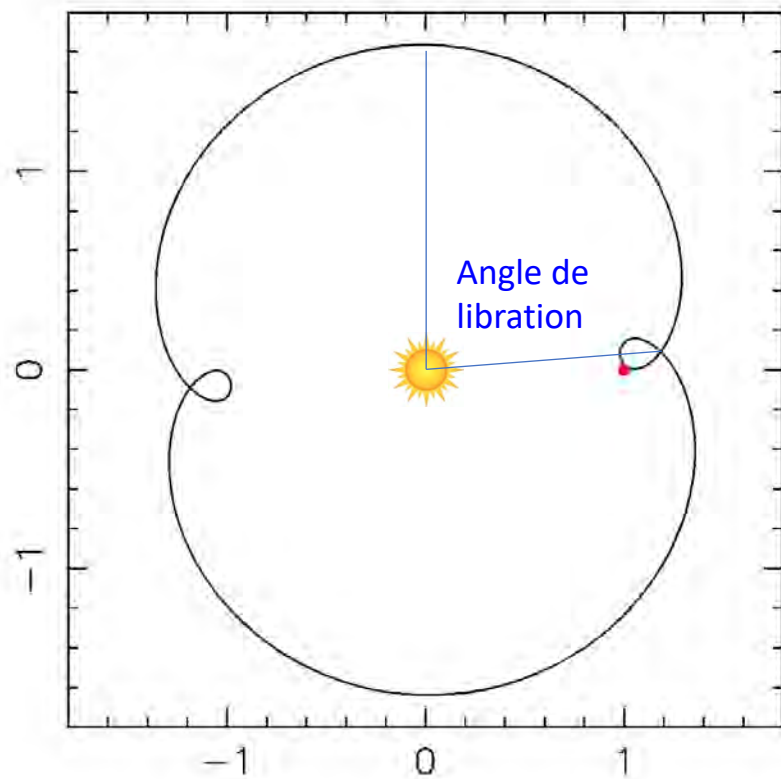


# Librations résonnantes

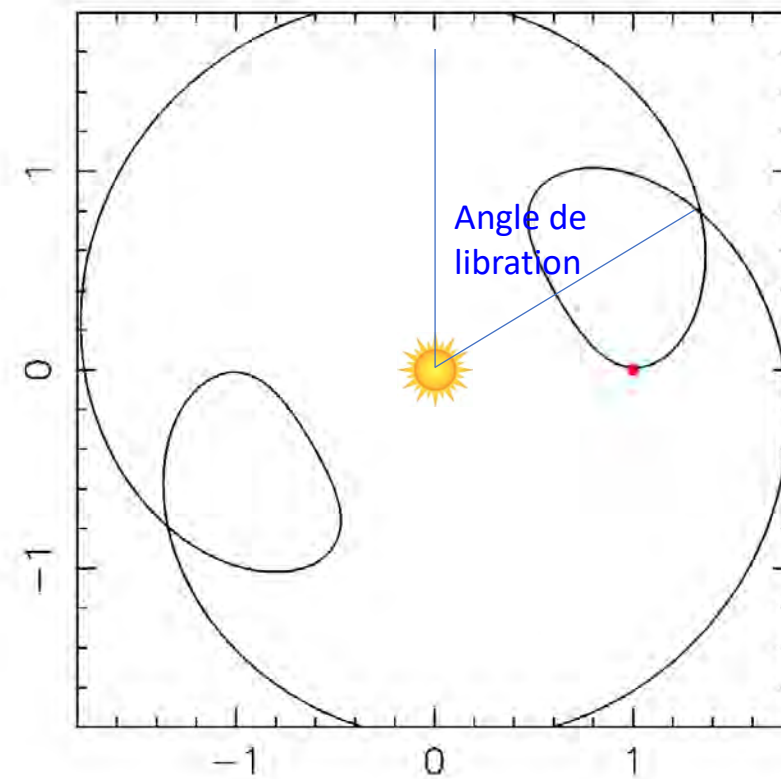




## Amplitude maximale de libration vs. excentricité



Excentricité petite



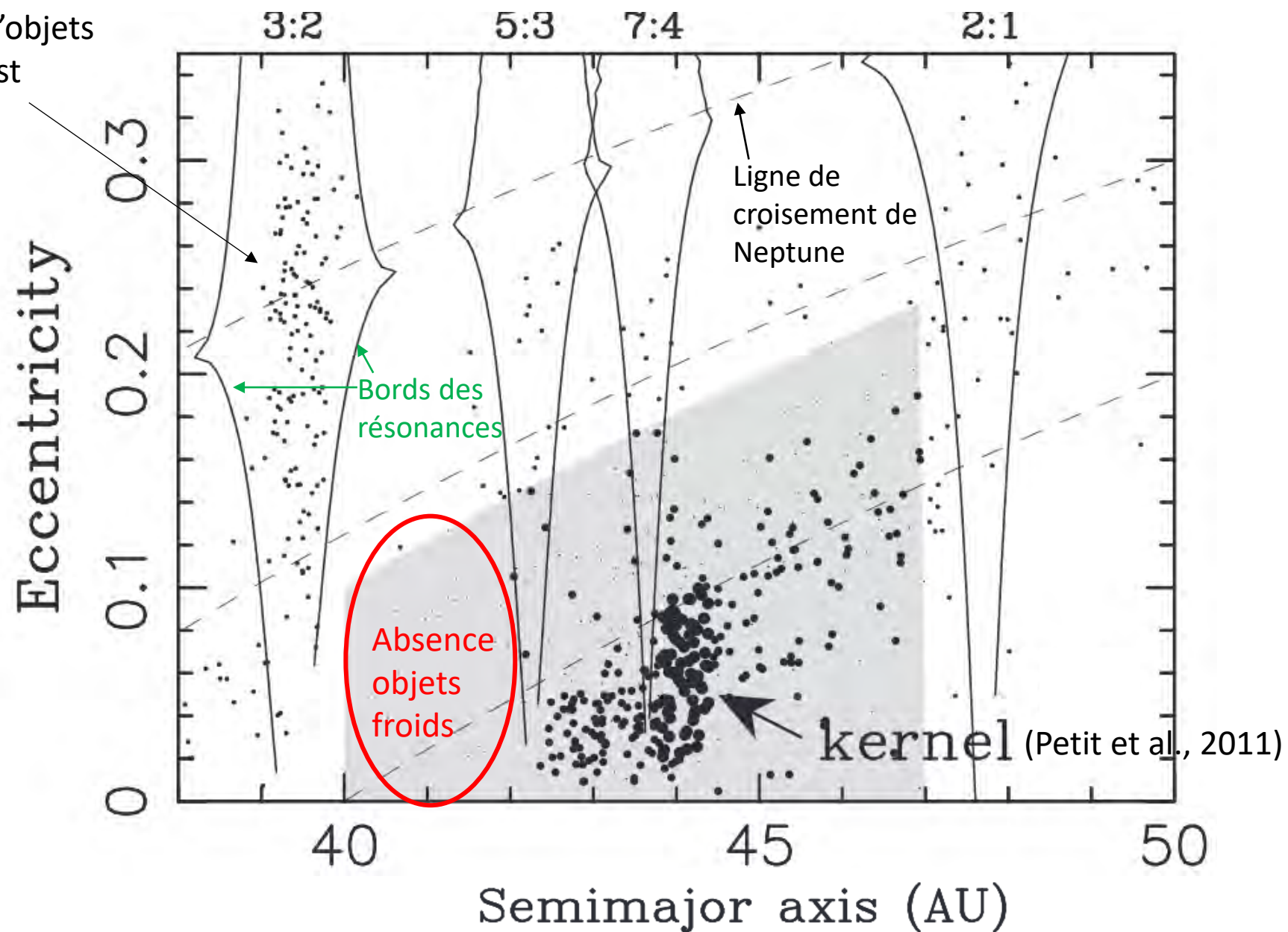
Excentricité grande





## La ceinture classique

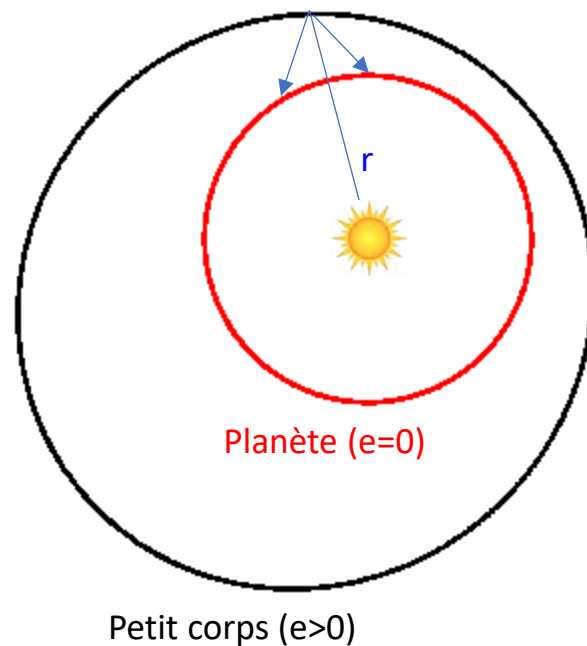
La quantité d'objets résonnants est étonnante





## Précession orbitale

S'il n'y a pas résonance orbitale, on peut considérer la planète et le petit corps dans toutes leurs positions possibles et calculer la force moyenne exercée par l'un sur l'autre.



Par symétrie, la composante tangentielle de la force est nulle.

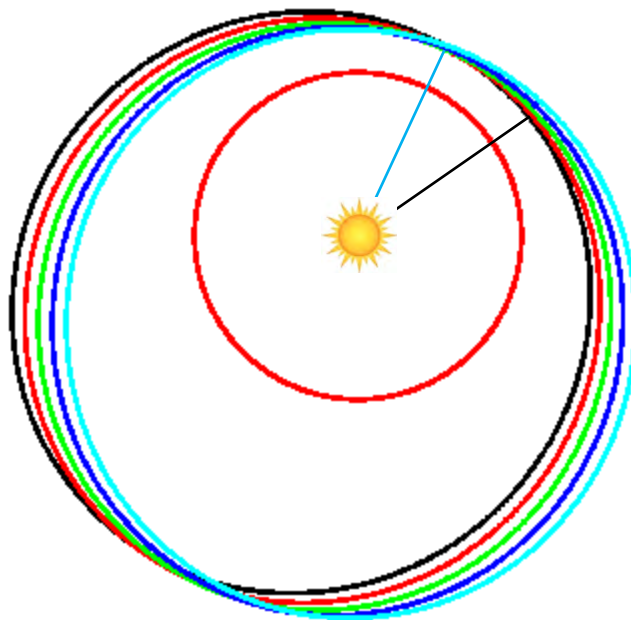
La composante radiale est non-nulle et n'est pas proportionnelle à  $1/r^2$

Or, seule une force en  $1/r^2$  permet à l'orbite de se fermer (fréquence d'oscillation radiale égale à la fréquence de révolution autour de l'astre).



## Précession orbitale

S'il n'y a pas résonance orbitale, on peut considérer la planète et le petit corps dans toutes leurs positions possibles et calculer la force moyenne exercée par l'un sur l'autre.



Par symétrie, la composante tangentielle de la force est nulle.

La composante radiale est non-nulle et n'est pas proportionnelle à  $1/r^2$

Or, seule une force en  $1/r^2$  permet à l'orbite de se fermer (fréquence d'oscillation radiale égale à la fréquence de révolution autour de l'astre).

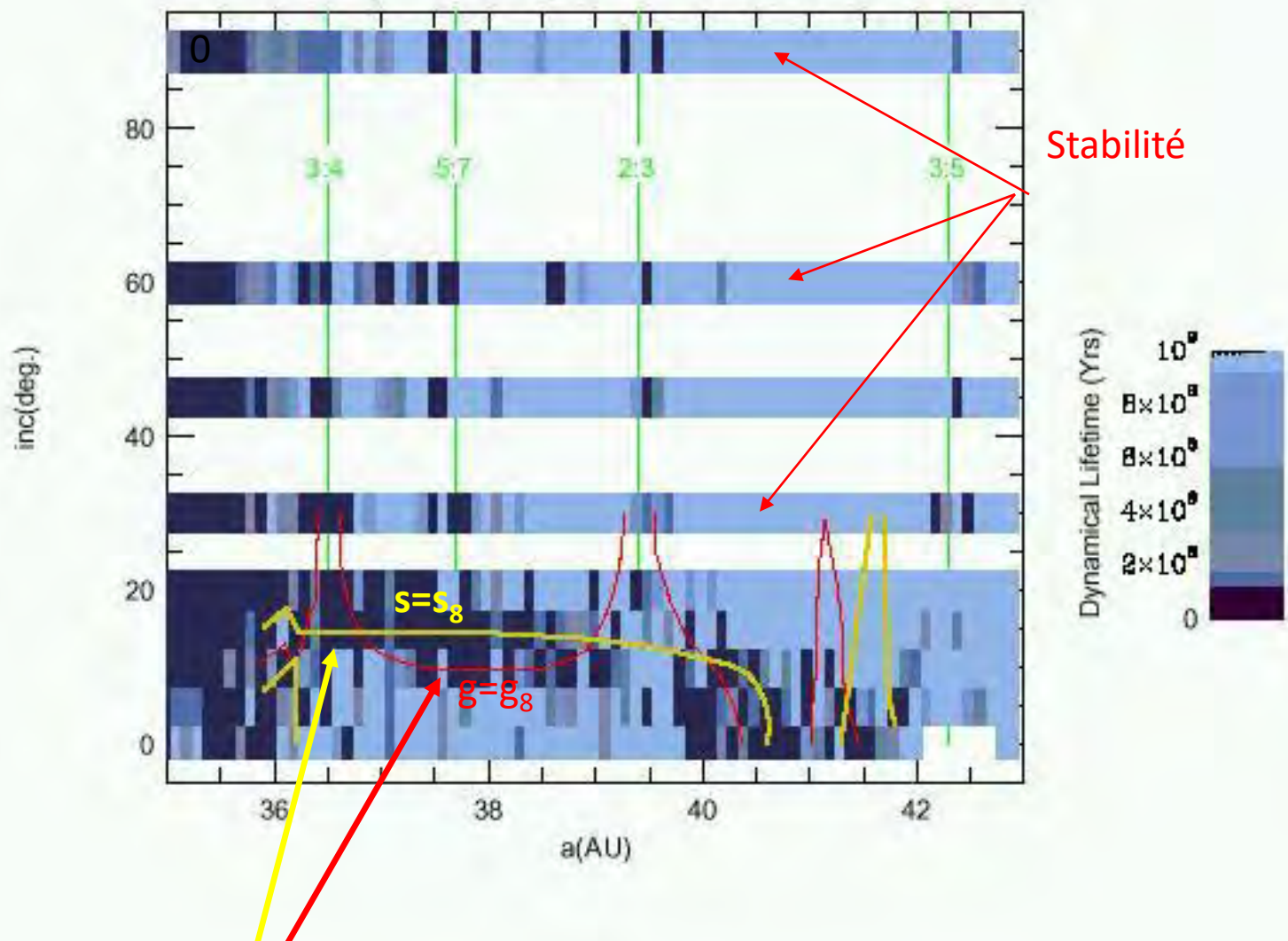
Une orbite qui ne se referme pas est une orbite qui précesse: la direction du périhélie change dans le temps

**TOUTES LES ORBITES PRECESSENT (petits corps, planètes...)**



# Stabilité dynamique et résonances séculaires

Carte de stabilité @  $e=0$  (Duncan Levison and Budd, 1995)

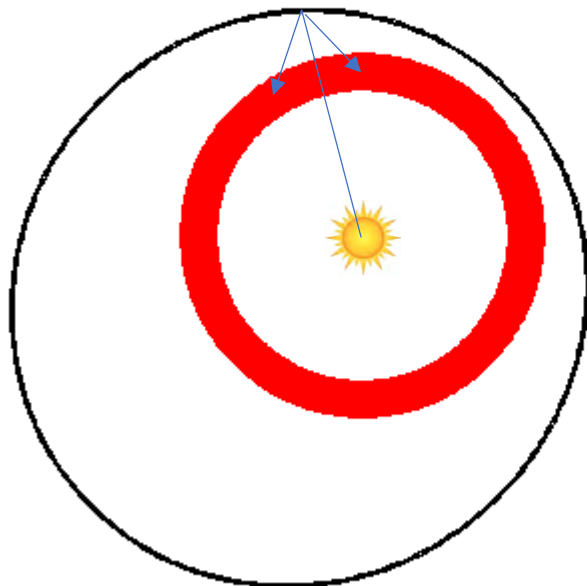


Résonances séculaires (Knezevic et al., 1991)



## Stabilité dynamique et résonances séculaires

Repère tournant avec la précession du petit corps (l'ellipse noire paraît fixe)



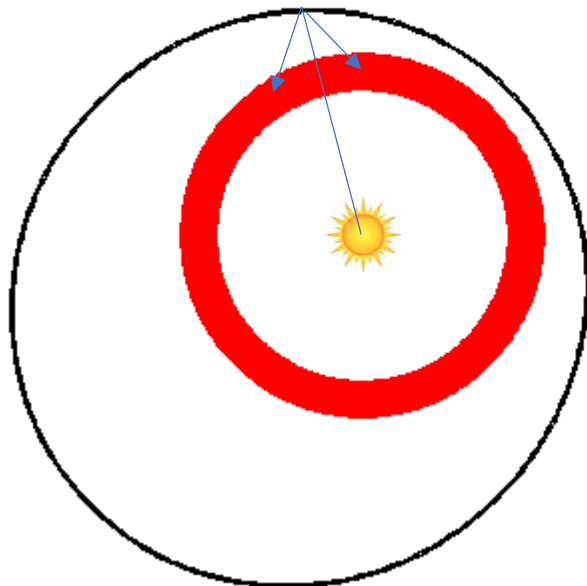
Cas où l'orbite de la planète est elliptique et précesse avec une fréquence différente de celle de l'orbite du petit corps.

Symétrie de forces -> précession



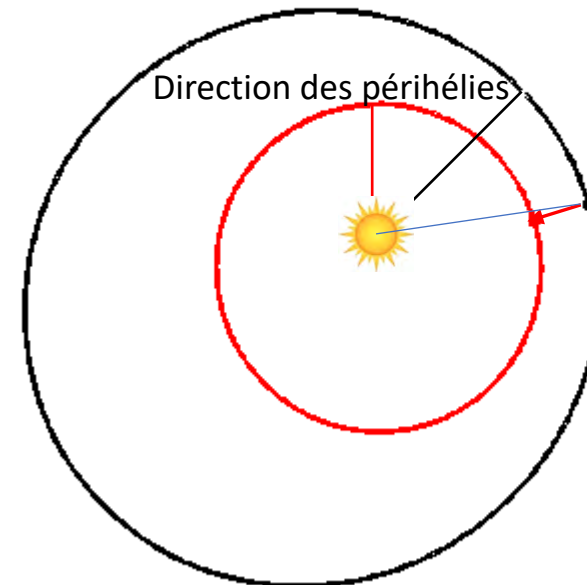
## Stabilité dynamique et résonances séculaires

Repère tournant avec la précession du petit corps (l'ellipse noire paraît fixe)



Cas où l'orbite de la planète est elliptique et précesse avec une fréquence différente de celle de l'orbite du petit corps.

Symétrie de forces -> précession

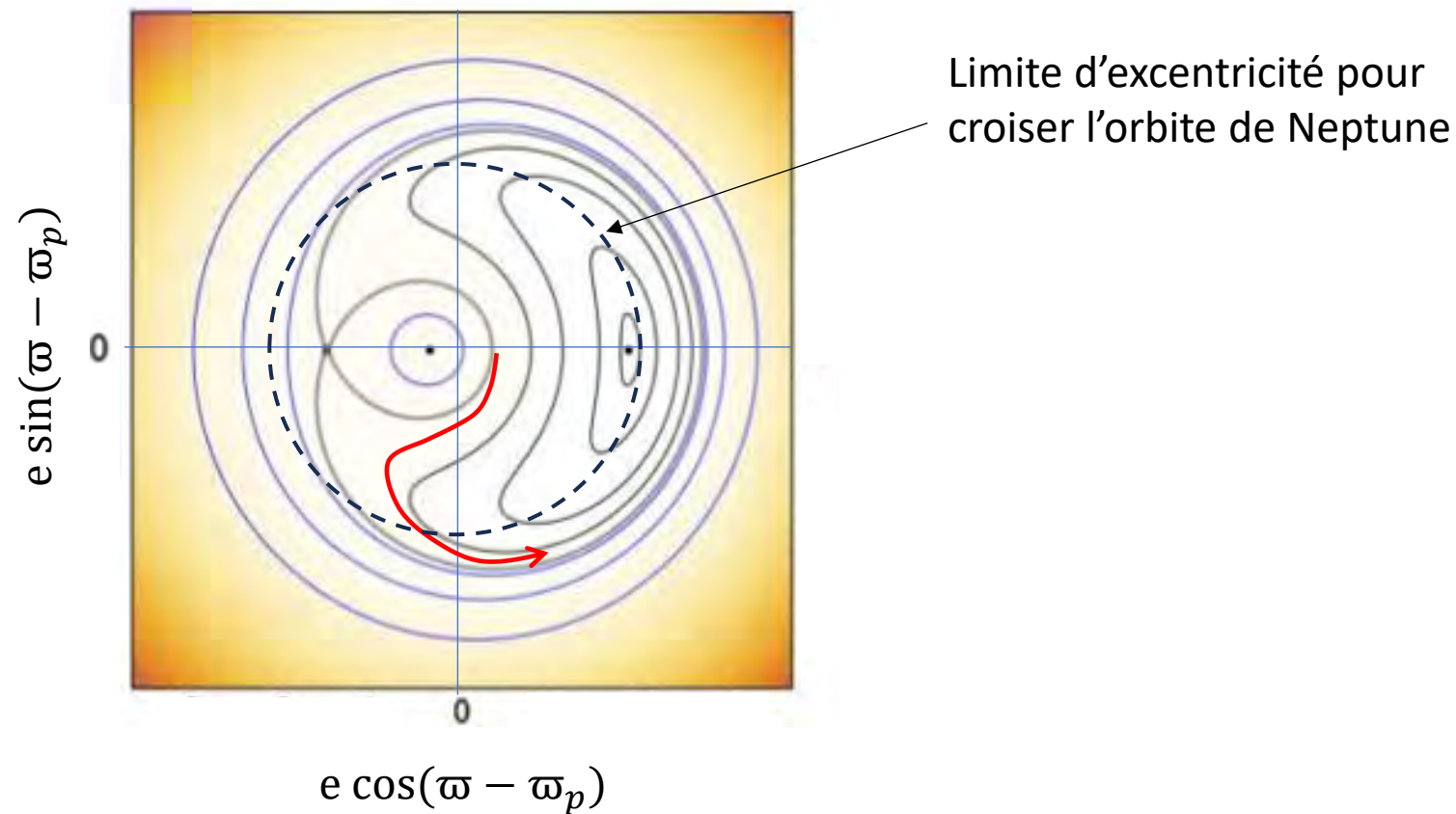


Cas où les deux orbites co-précessent (résonance séculaire)  
si périhélie non-alignés -> rupture de symétrie

La force maximale n'est pas dirigée radialement.  
Elle exerce donc un couple qui fait changer le moment cinétique du corps  $G = \sqrt{a(1 - e^2)}$   
 $a = \text{const.}$  (travail nul), donc  $e$  change.

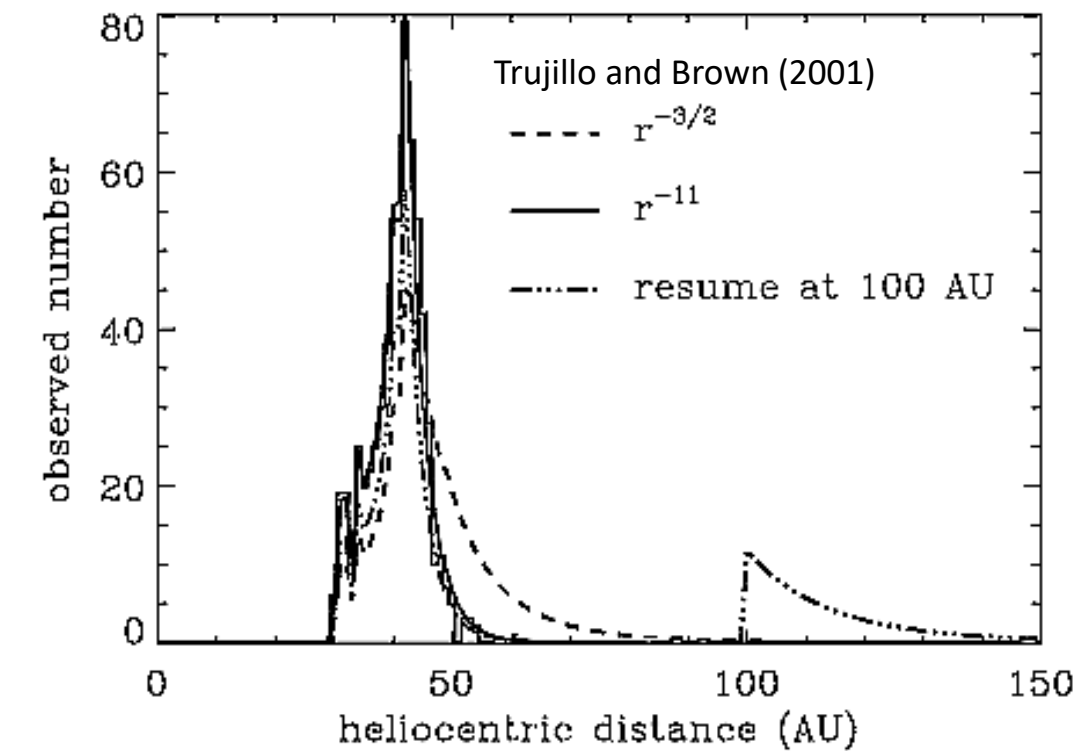
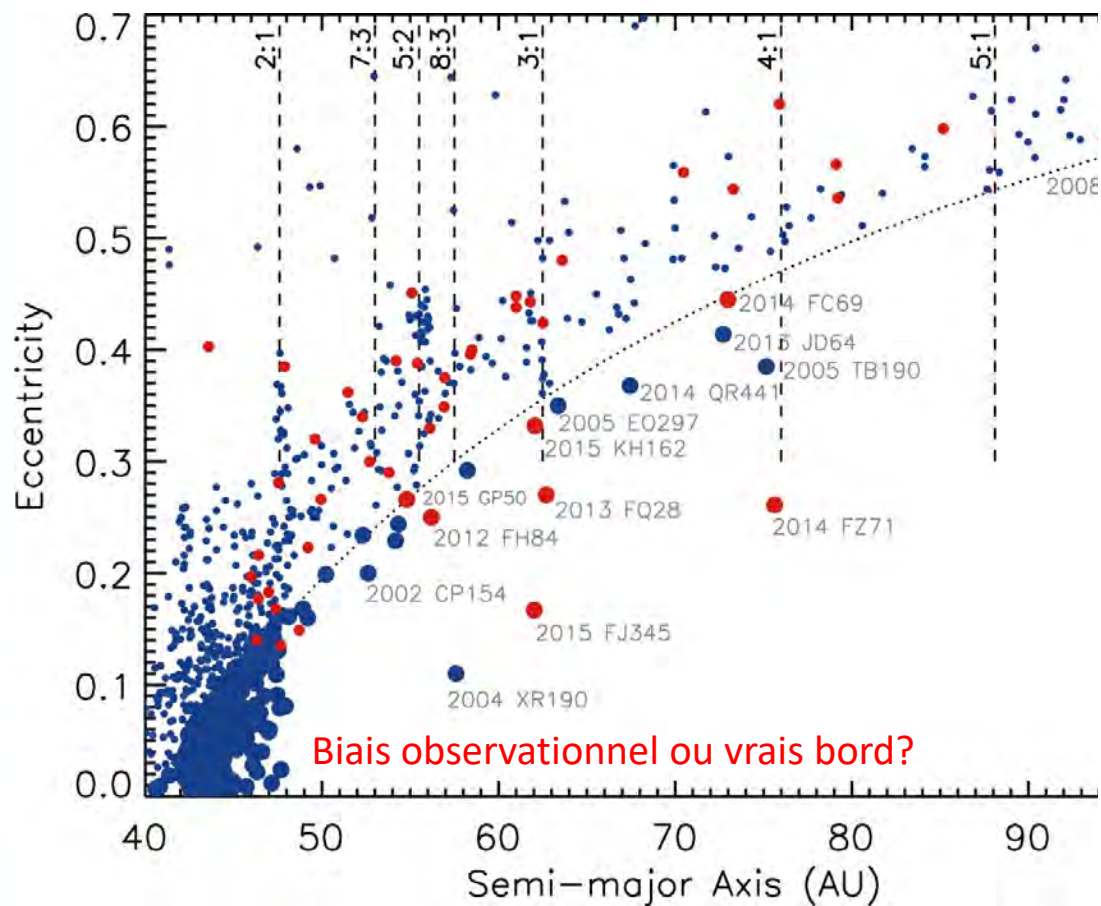


## Stabilité dynamique et résonances séculaires





## Le bord externe de la ceinture "classique"







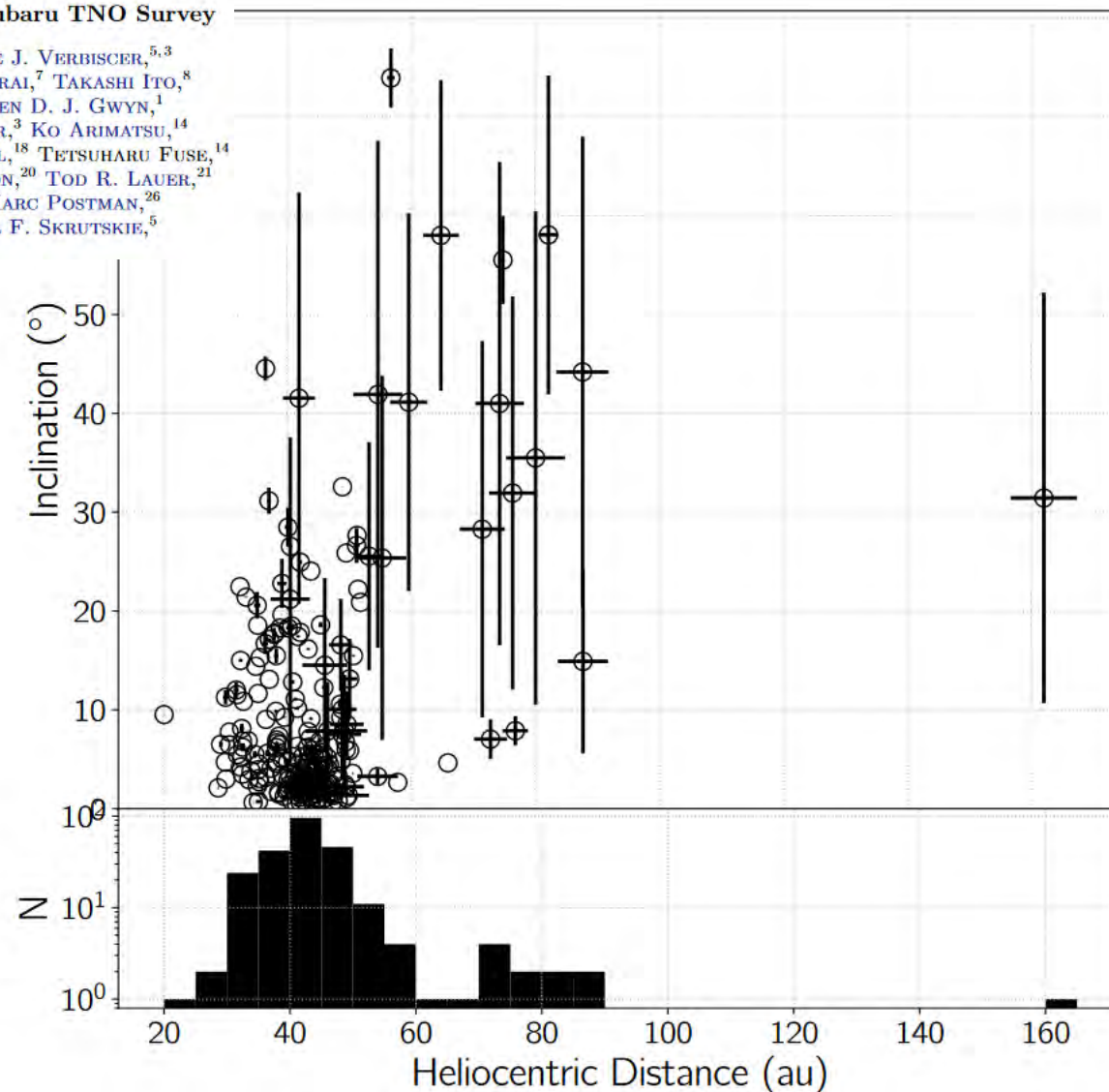
## Le bord externe de la ceinture “classique”

### Candidate Distant Trans-Neptunian Objects Detected by the New Horizons Subaru TNO Survey

WESLEY C. FRASER,<sup>1,2</sup> SIMON B. PORTER,<sup>3</sup> LOWELL PELTIER,<sup>1,2,4</sup> JJ KAVELAARS,<sup>1,2</sup> ANNE J. VERBISCHER,<sup>5,3</sup>  
MARC W. BUIE,<sup>3</sup> S. ALAN STERN,<sup>3</sup> JOHN R. SPENCER,<sup>3</sup> SUSAN D. BENECCHI,<sup>6</sup> TSUYOSHI TERAI,<sup>7</sup> TAKASHI ITO,<sup>8</sup>  
FUMI YOSHIDA,<sup>9,10</sup> DAVID W. GERDES,<sup>11,12</sup> KEVIN J. NAPIER,<sup>11</sup> HSING WEN LIN,<sup>11</sup> STEPHEN D. J. GWYN,<sup>1</sup>  
HAYDEN SMOTHERMAN,<sup>13</sup> SEBASTIEN FABBRO,<sup>1,2</sup> KELSI N. SINGER,<sup>3</sup> AMANDA M. ALEXANDER,<sup>3</sup> KO ARMATSU,<sup>14</sup>  
MARIA E. BANKS,<sup>15</sup> VERONICA J. BRAY,<sup>16</sup> MOHAMED RAMY EL-MAARRY,<sup>17</sup> CHELSEA L. FERRELL,<sup>18</sup> TETSU HARU FUSE,<sup>14</sup>  
FLORIAN GLASS,<sup>18</sup> TIMOTHY R. HOLT,<sup>19</sup> PENG HONG,<sup>10</sup> RYO ISHIMARU,<sup>10</sup> PERIANNE E. JOHNSON,<sup>20</sup> TOD R. LAUER,<sup>21</sup>  
RODRIGO LEIVA,<sup>22</sup> PATRYK S. LYKAWKA,<sup>23</sup> RAPHAEL MARSCHALL,<sup>24</sup> JORGE I. NÚÑEZ,<sup>25</sup> MARC POSTMAN,<sup>26</sup>  
ERIC QUIRICO,<sup>27</sup> ALYSSA R. RHODEN,<sup>3</sup> ANNA M. SIMPSON,<sup>28,29</sup> PAUL SCHENK,<sup>30</sup> MICHAEL F. SKRUTSKIE,<sup>5</sup>  
ANDREW J. STEFFL,<sup>3</sup> AND HENRY THROOP<sup>18</sup>

Les auteurs suggèrent que la ceinture de Kuiper pourrait s’étendre au-delà de 45 ua, mais les objets découverts ont tous des larges inclinaisons.

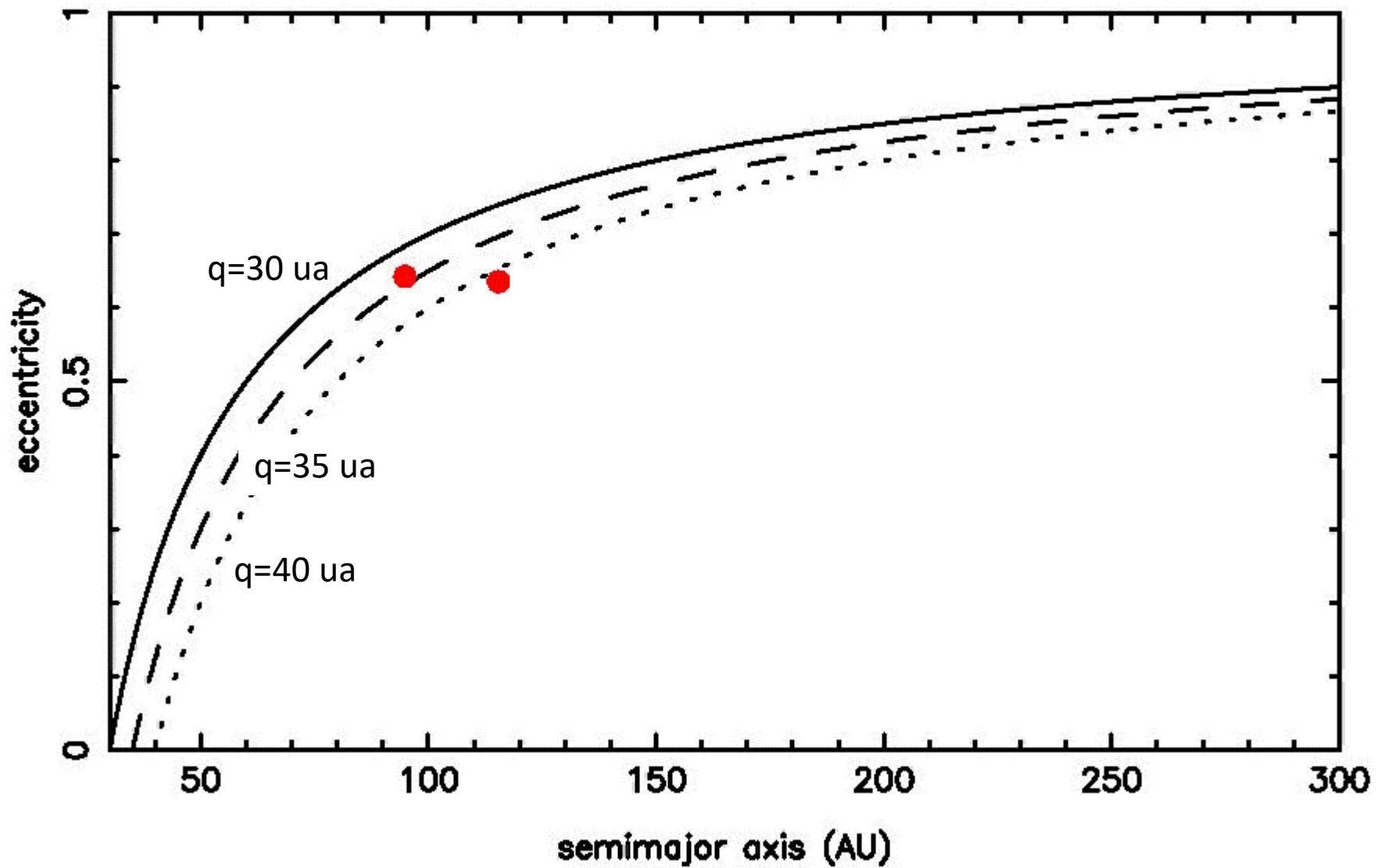
Ils ne font donc pas partie de la population froide, mais de celle chaude ou du disque dispersé





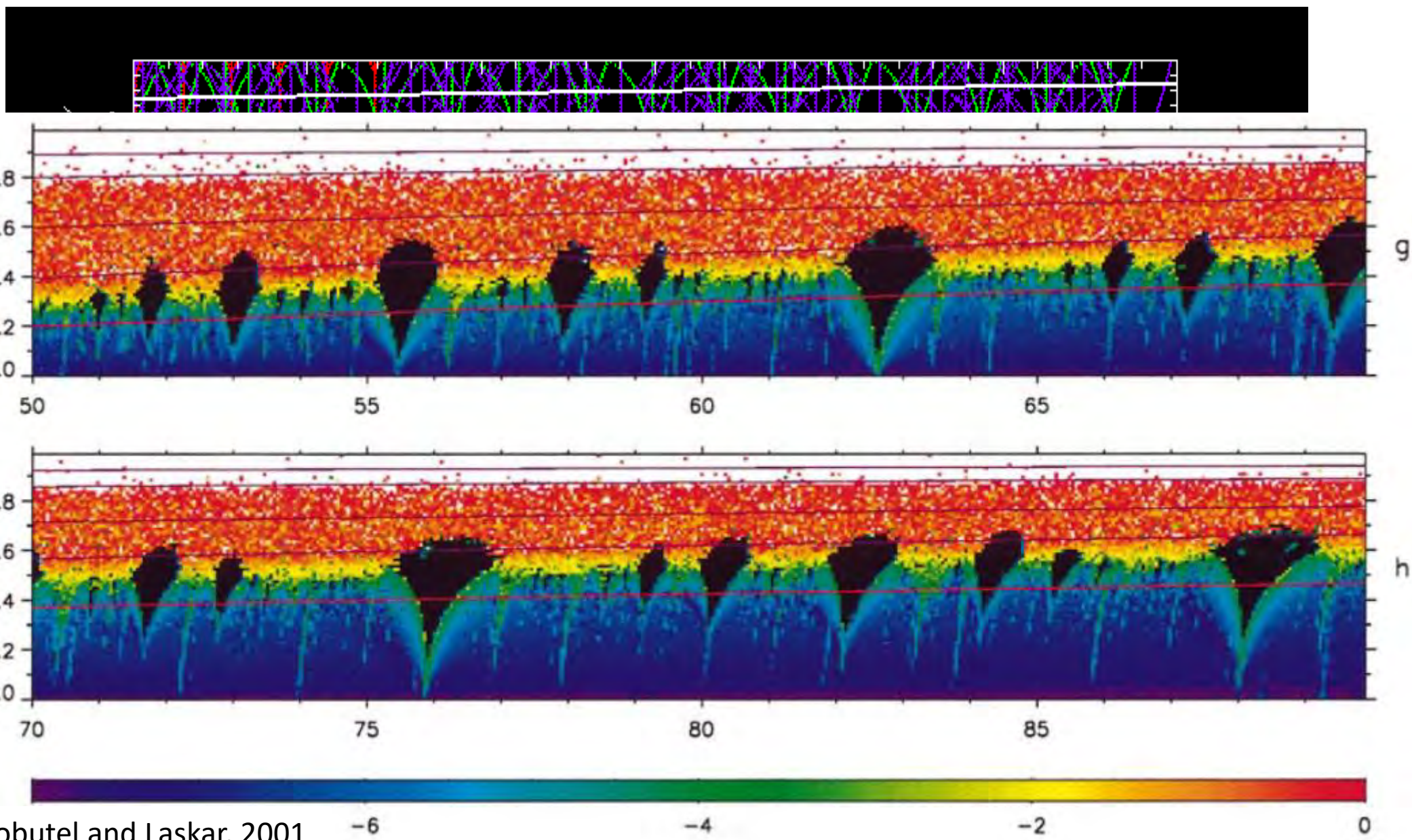
## Le disque dispersé

$T = 0.8 \text{ My}$





## La limite du disque dispersé



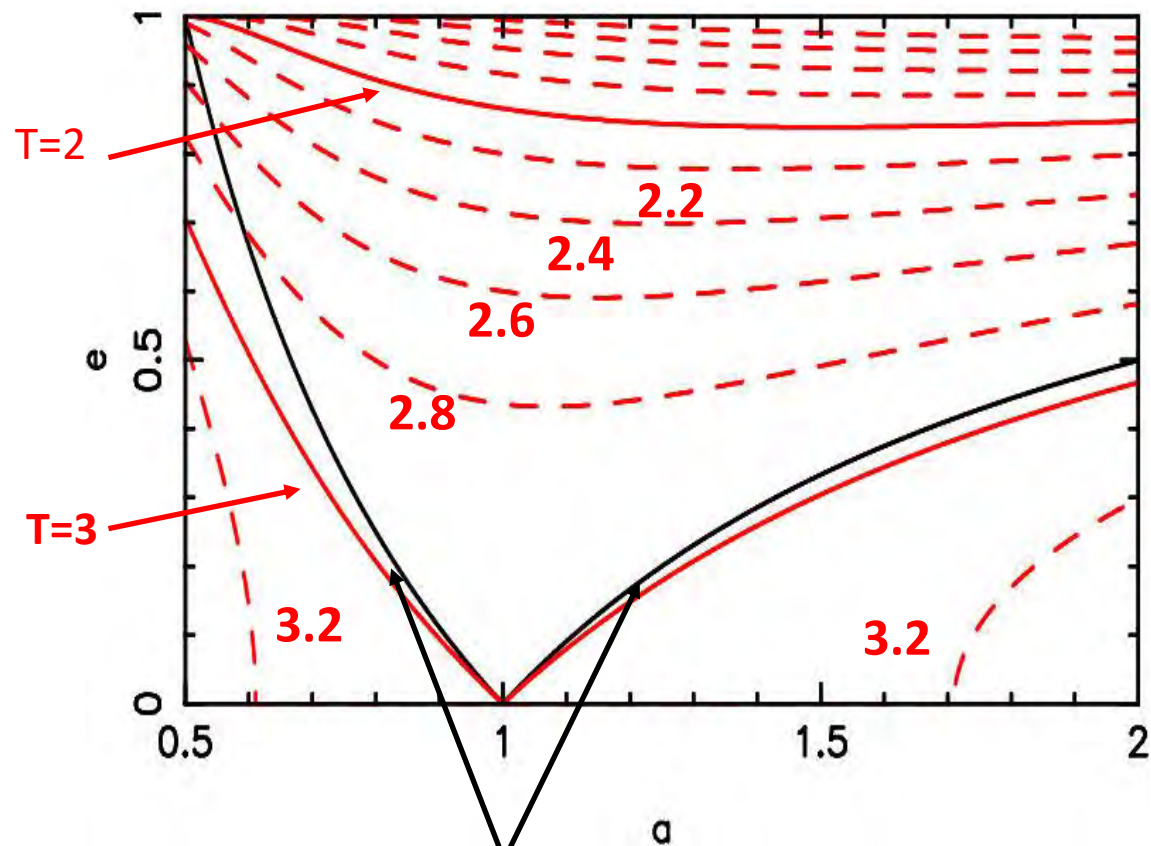


## La paramètre de Tisserand

Pourquoi lors de l'évolution dans le disque dispersé,  $q \sim \text{constante}$ ?

$$T \equiv \frac{1}{a} + 2\sqrt{a(1-e^2)} \cos i$$

C'est à cause de la quasi-conservation du paramètre de Tisserand, valable quand la dynamique est dominée par une seule planète sur orbite circulaire



Planet crossing curves



## Dérivation de la “constance” du paramètre de Tisserand

Hamiltonien du problème  
restreint des trois corps

$$\mathcal{H} = \frac{\|\vec{v}\|^2}{2} - \frac{1-\mu}{\|\vec{r}\|} - \mu \left( \frac{1}{\|\vec{\Delta}\|} - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{\|\vec{s}\|^3} \right)$$

$\vec{r}$  : position héliocentrique du petit corps;  $\vec{v}$  : sa vitesse héliocentrique

$\vec{s}$  : position de la planète de masse  $\mu$ ;  $\vec{\Delta}$  la distance corps-planète. Ici  $\mathcal{G} = m_* + \mu = 1$

Equations du mouvement:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vec{v}}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vec{r}}, \quad \frac{d\mathcal{H}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vec{v}} \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vec{r}} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial t}$$

Puisque la planète bouge,  $\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial t} \neq 0$  mais si la planète est sur une orbite circulaire  $\|\vec{s}\| = 1$ , dans un repère tournant avec elle la dépendance temporelle est éliminée:

Constante de  
Jacobi

$$\mathcal{H} = \frac{\|\vec{v}\|^2}{2} - \frac{1-\mu}{\|\vec{r}\|} - \mu \left( \frac{1}{\|\vec{\Delta}\|} - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{\|\vec{s}\|^3} \right) - (r_x v_y - r_y v_x)$$

Loin des rencontres

(ici  $\vec{r}$  coordonnées tournantes  
et  $\vec{v}$  vitesses inertielles)

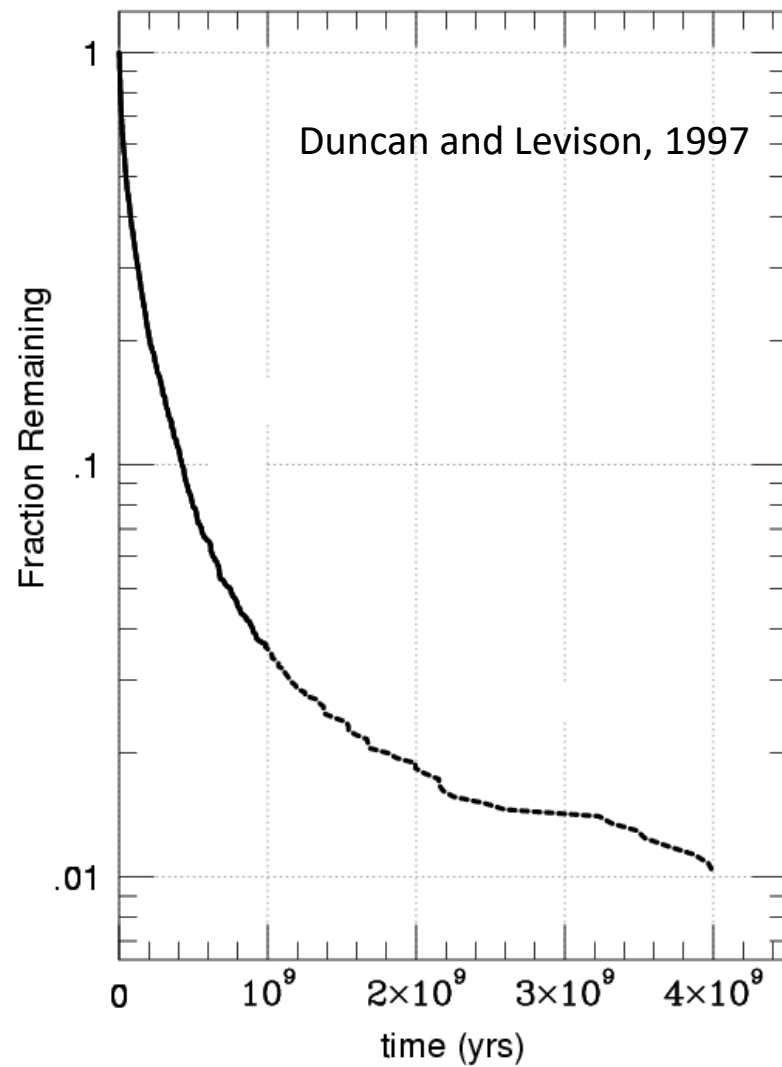
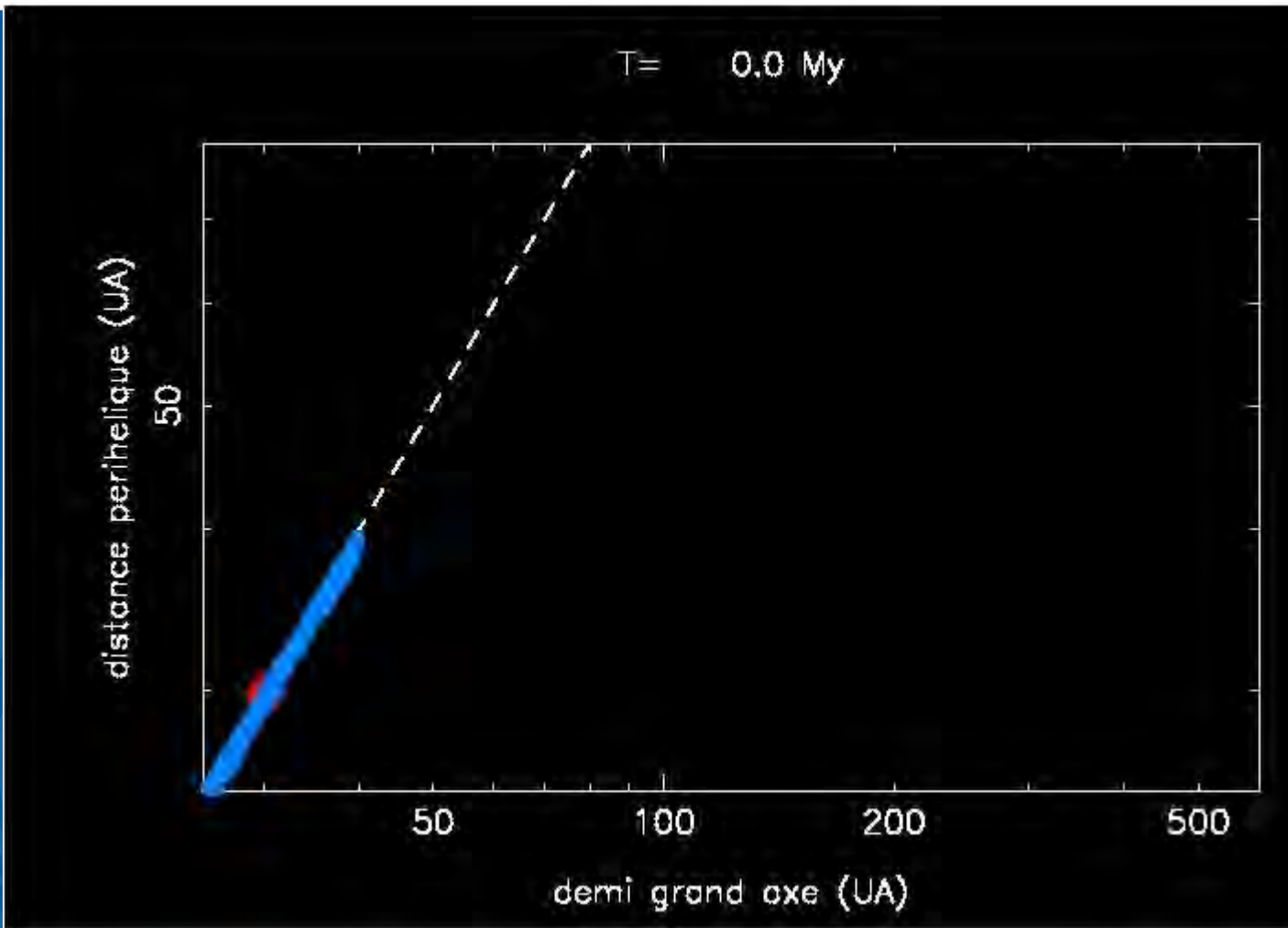
$$T \equiv \frac{1}{a} + 2\sqrt{a(1-e^2)} \cos i$$

$$E = -\frac{1}{2a}$$

$$H_z = \sqrt{a(1-e^2)} \cos i$$

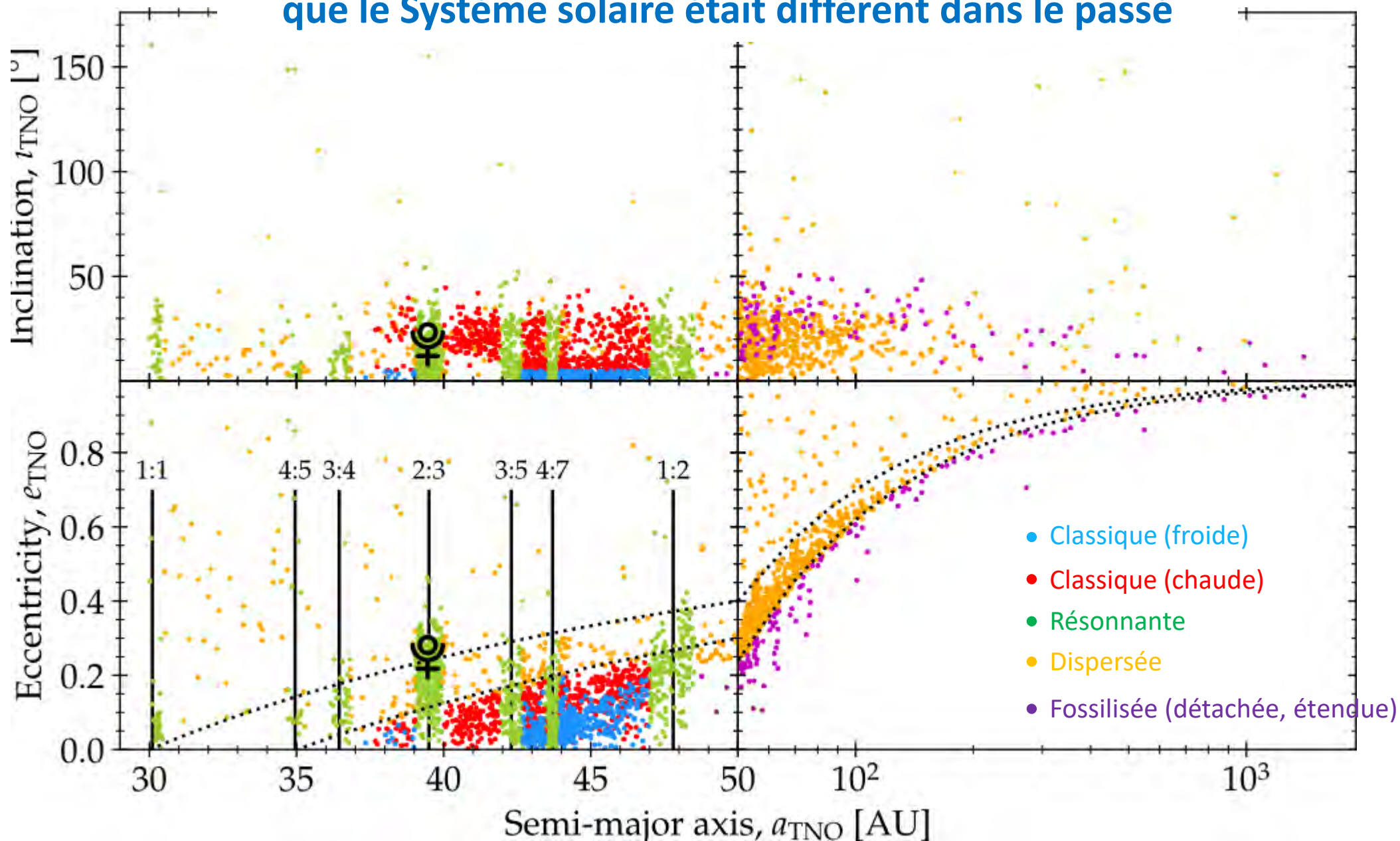


# Origine du disque dispersé





## Origine de la composante fossilisée? – un premier indice que le Système solaire était différent dans le passé



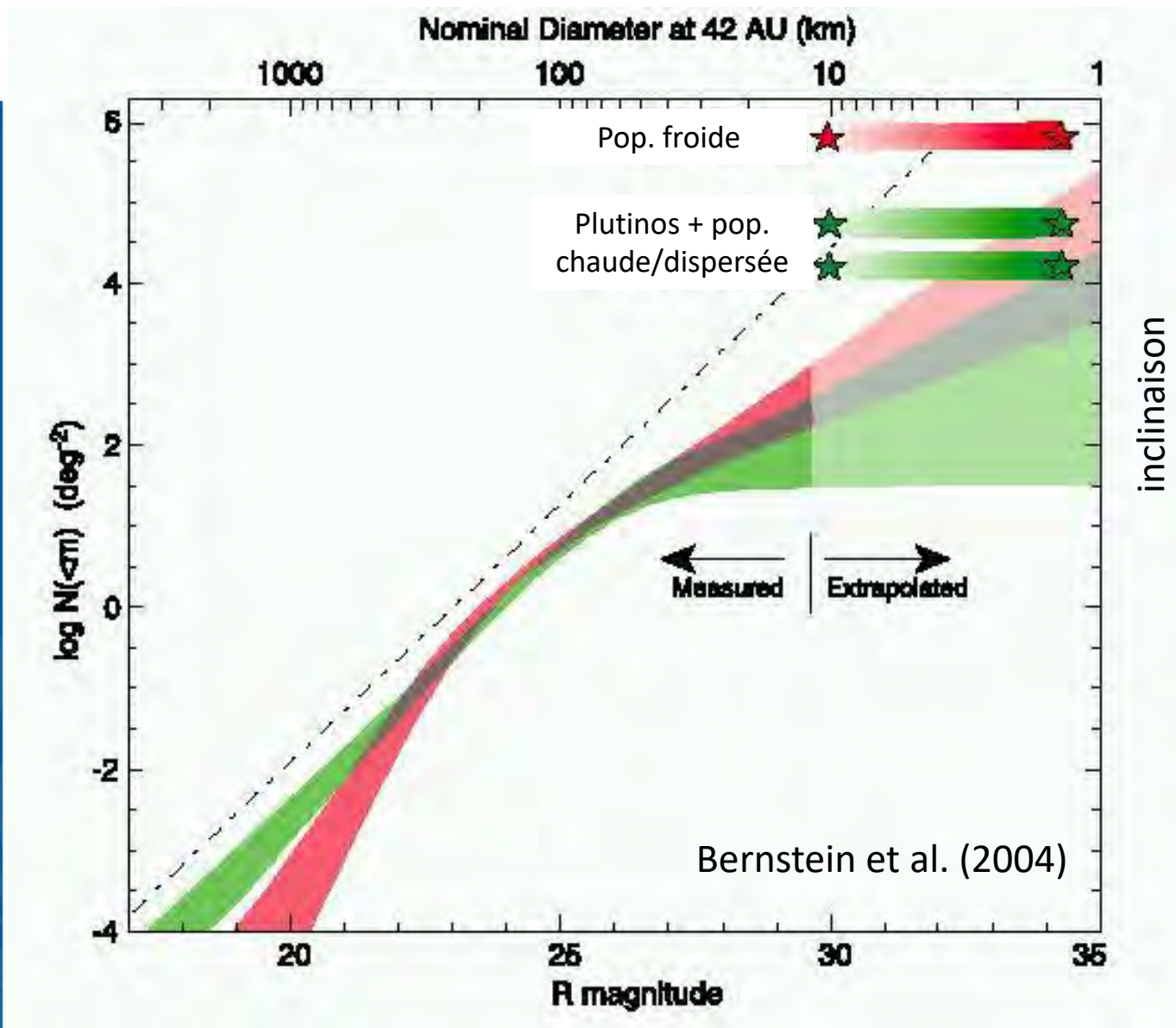


# Les propriétés physiques des TNOs et leur corrélation avec les classes dynamiques





# Distribution de tailles

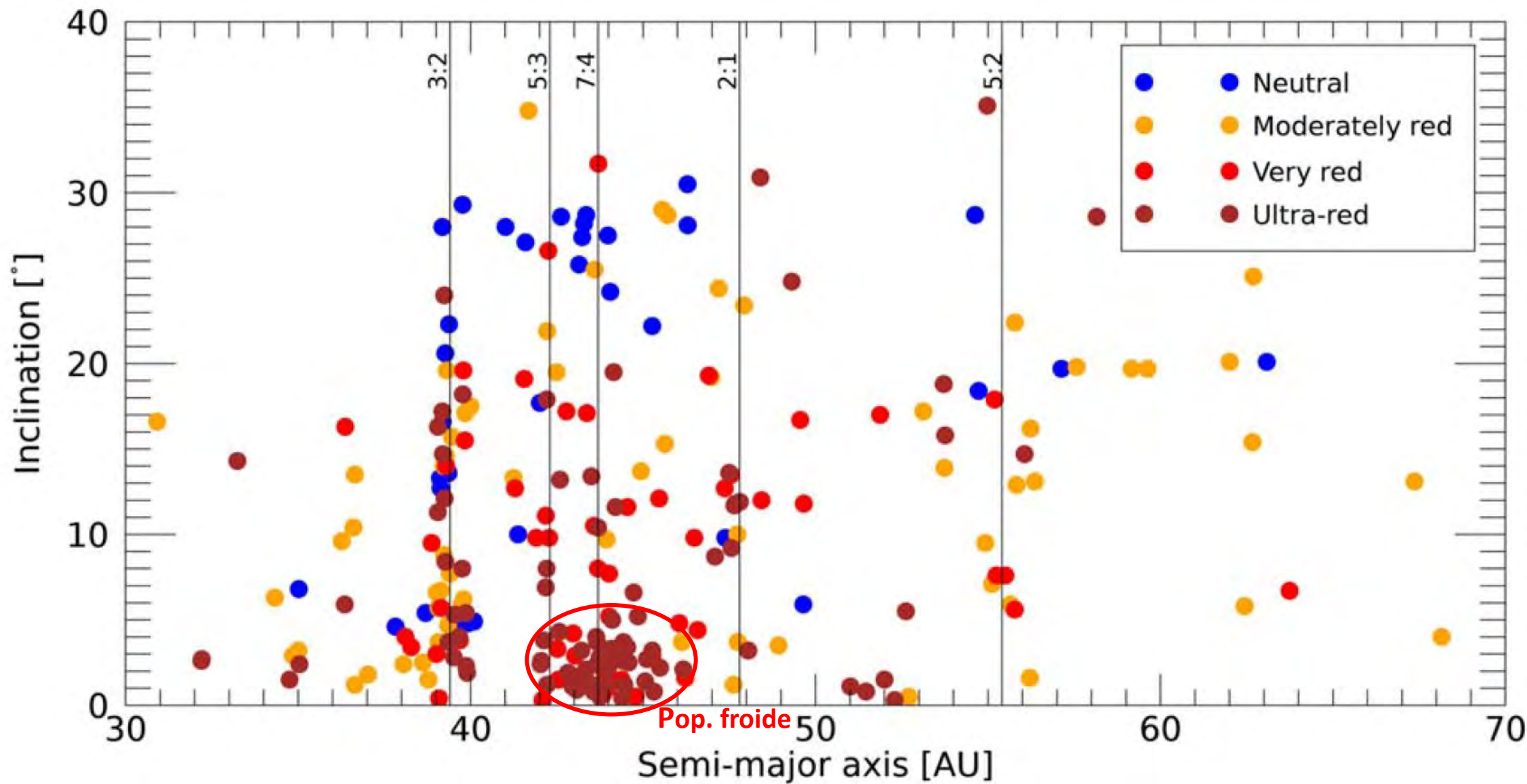


Tous les grands TNO (Pluton, Quaoar, Ixion, Varuna, Chaos, Eris,...) sont à haute inclinaison

Masses totales:  
population froide:  $3 \times 10^{-4} M_E$   
Population chaude:  $0.01 M_E$   
(Fraser et al., 2014)  
disque dispersé:  $\sim 0.05 M_E$   
(Trujillo et al., 2001)

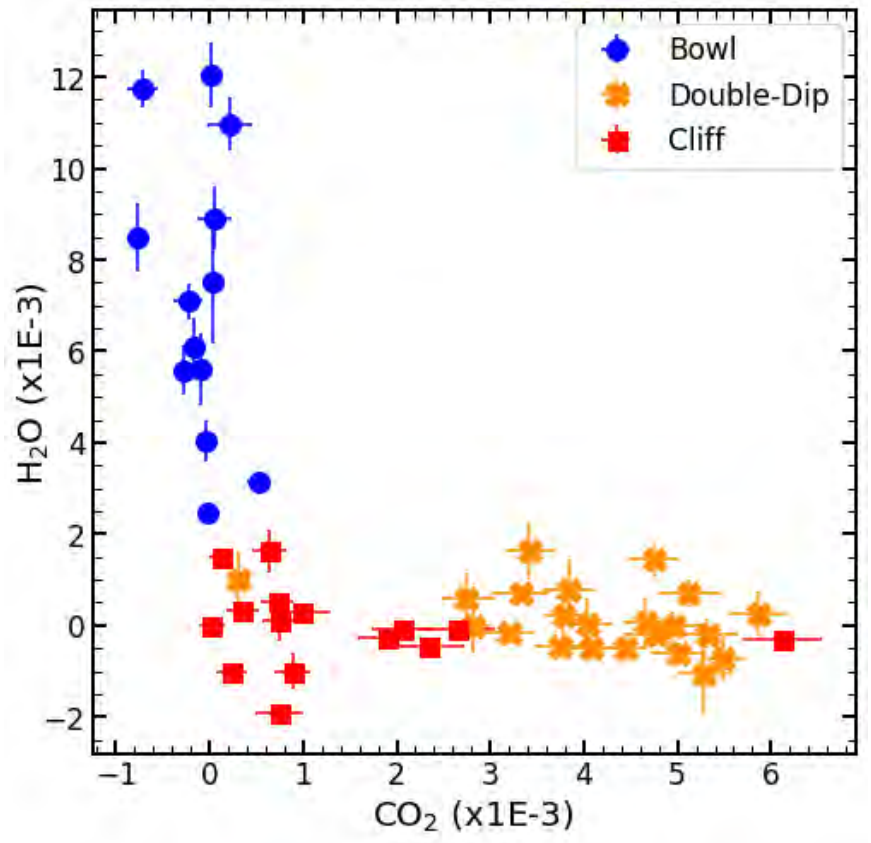
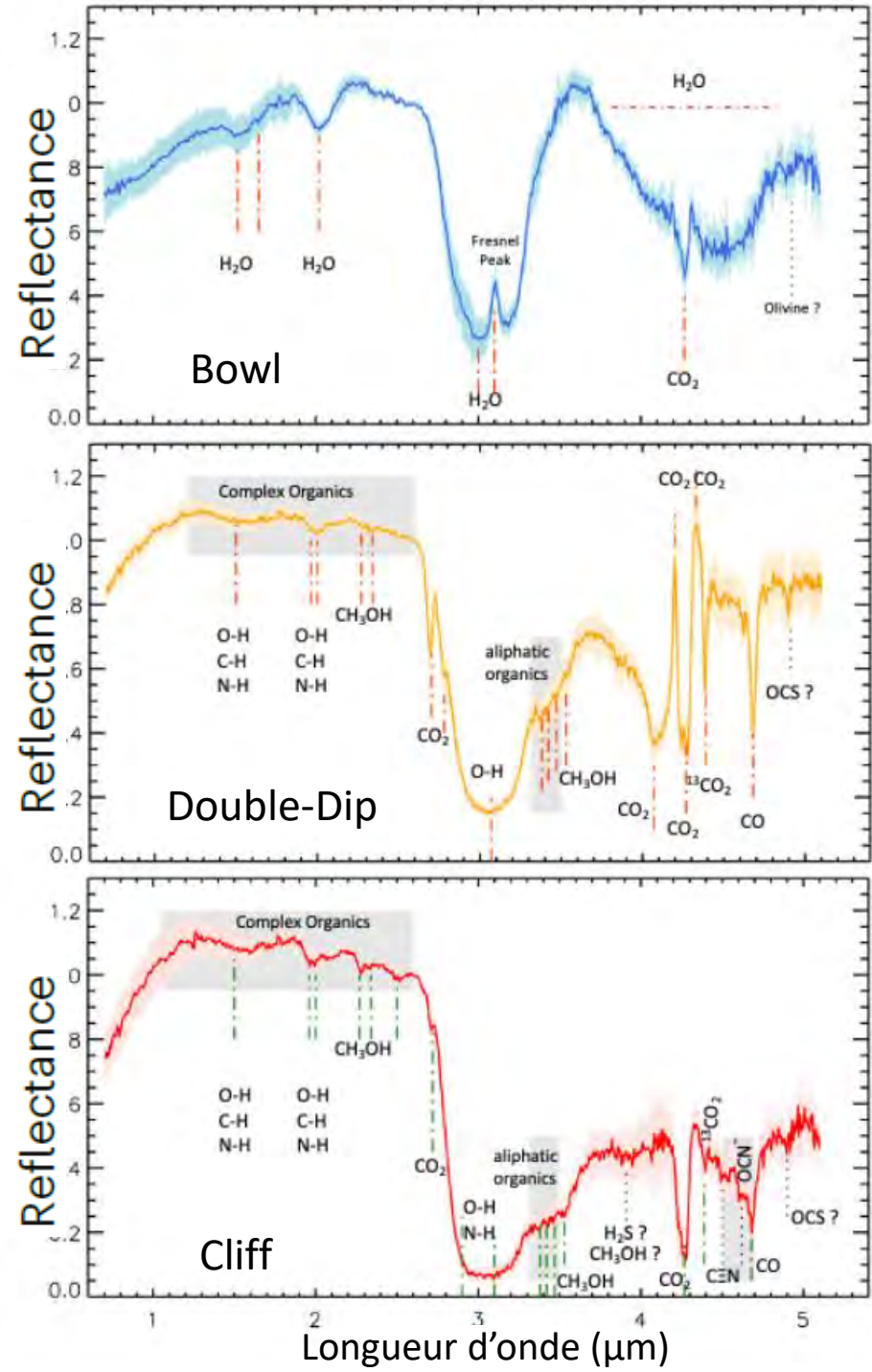
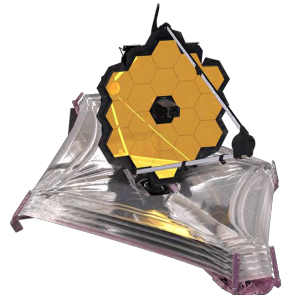


# Couleurs





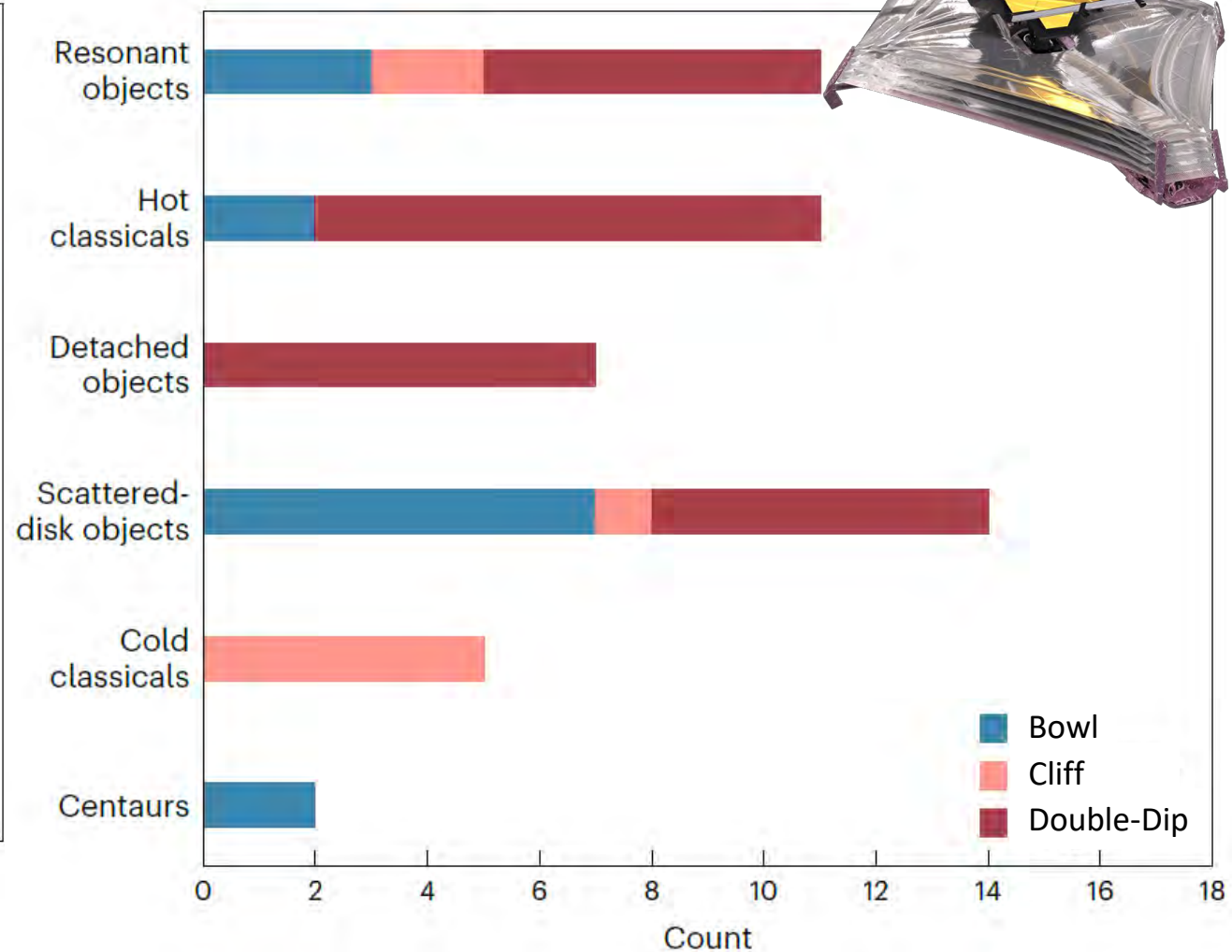
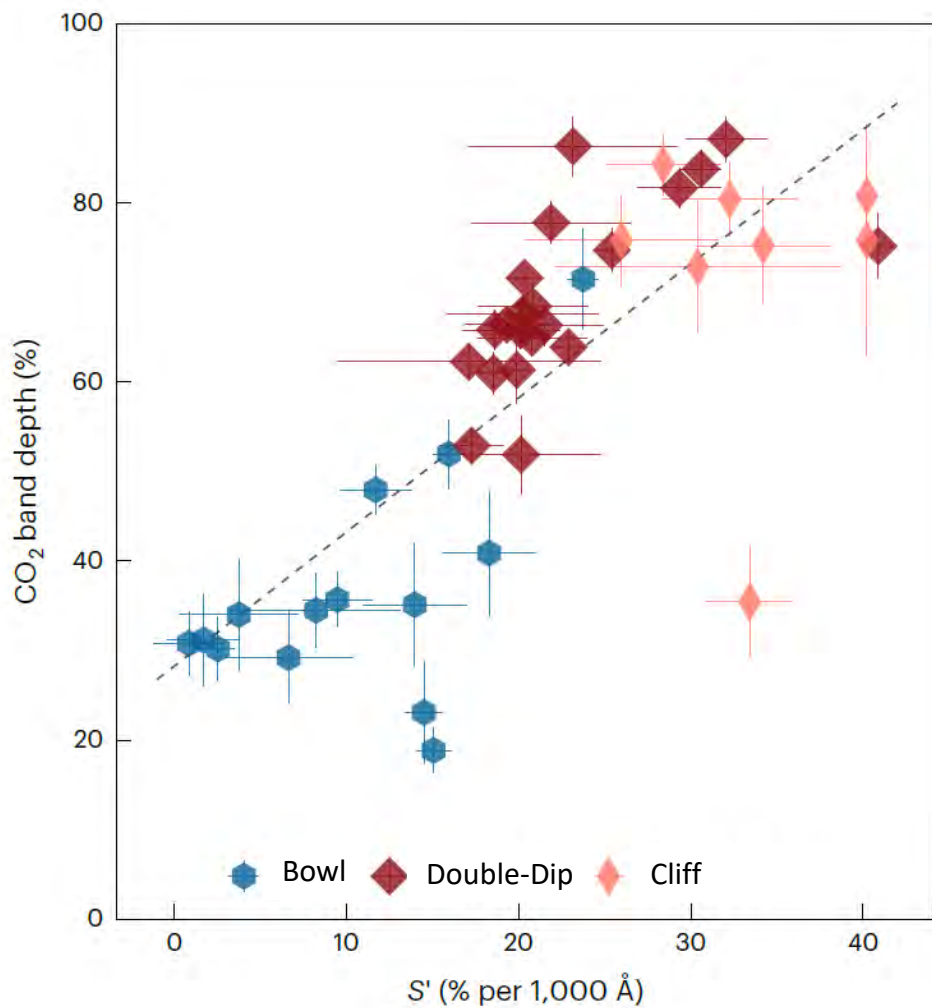
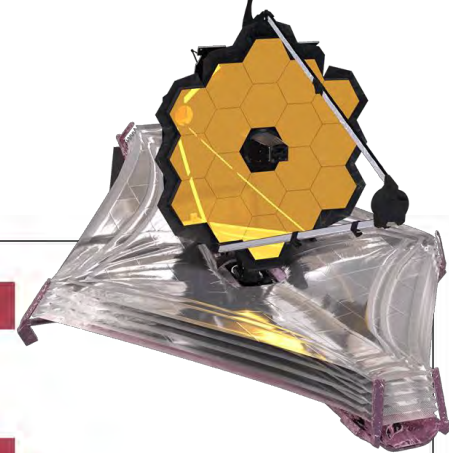
# Spectres JWST



Pinilla-Alonso et al., sous presse

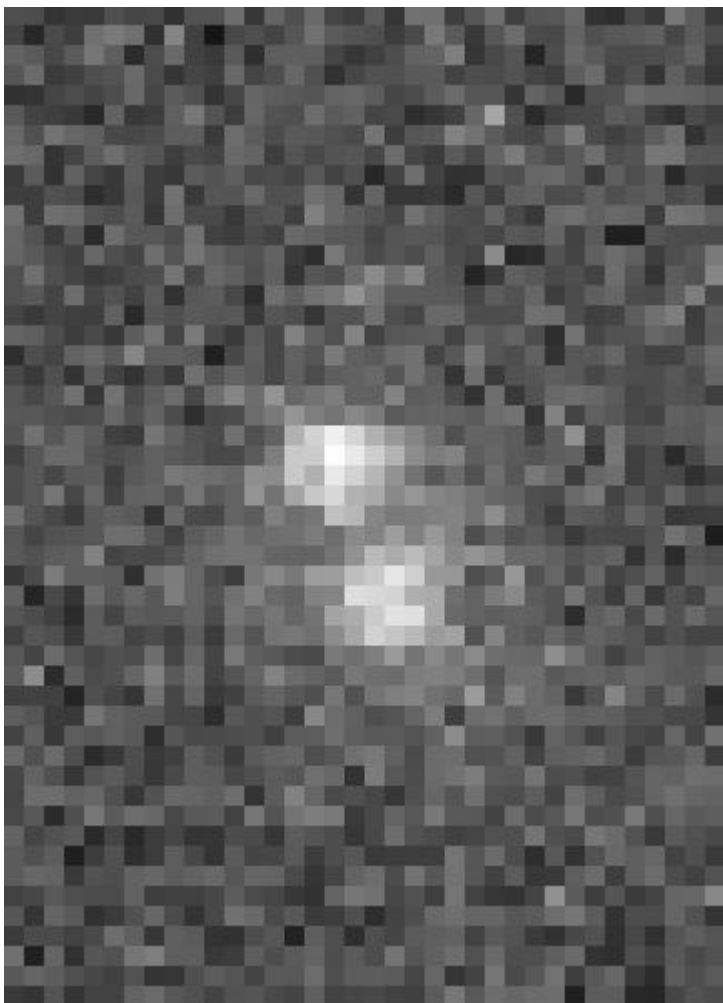


# Spectres JWST

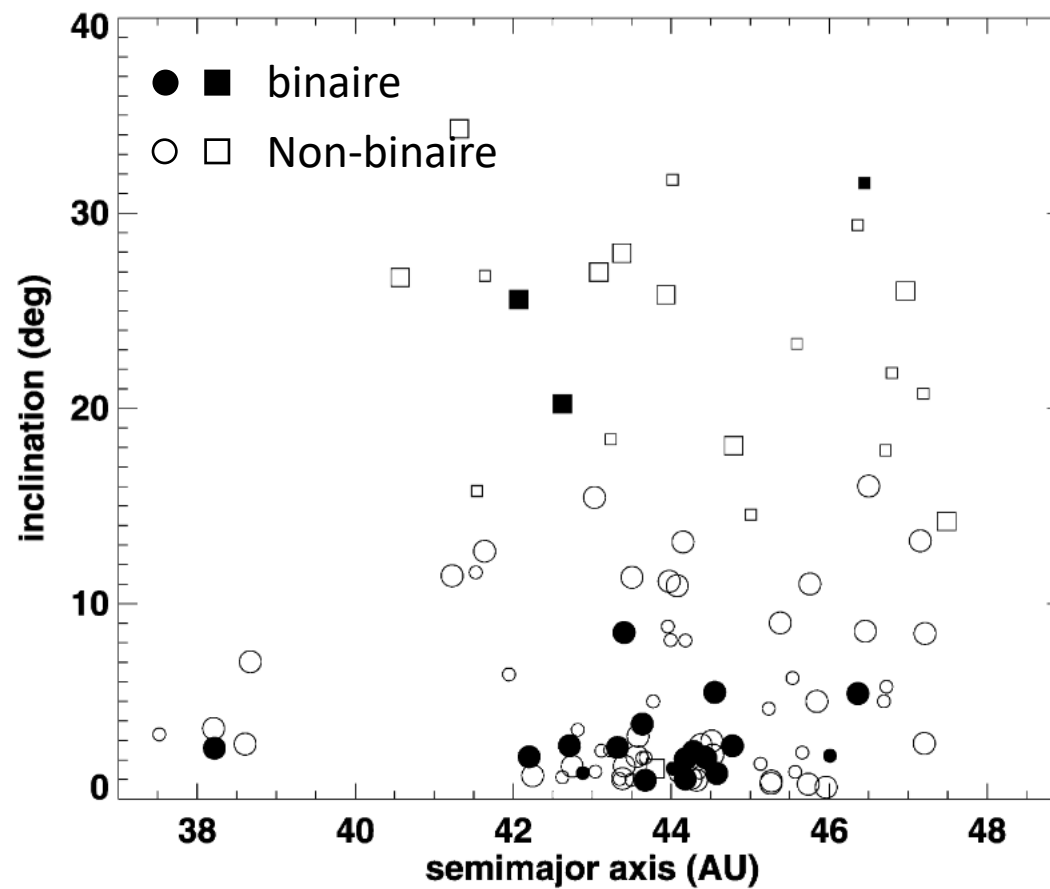




## Objets binaires



Tailles et couleurs similaires

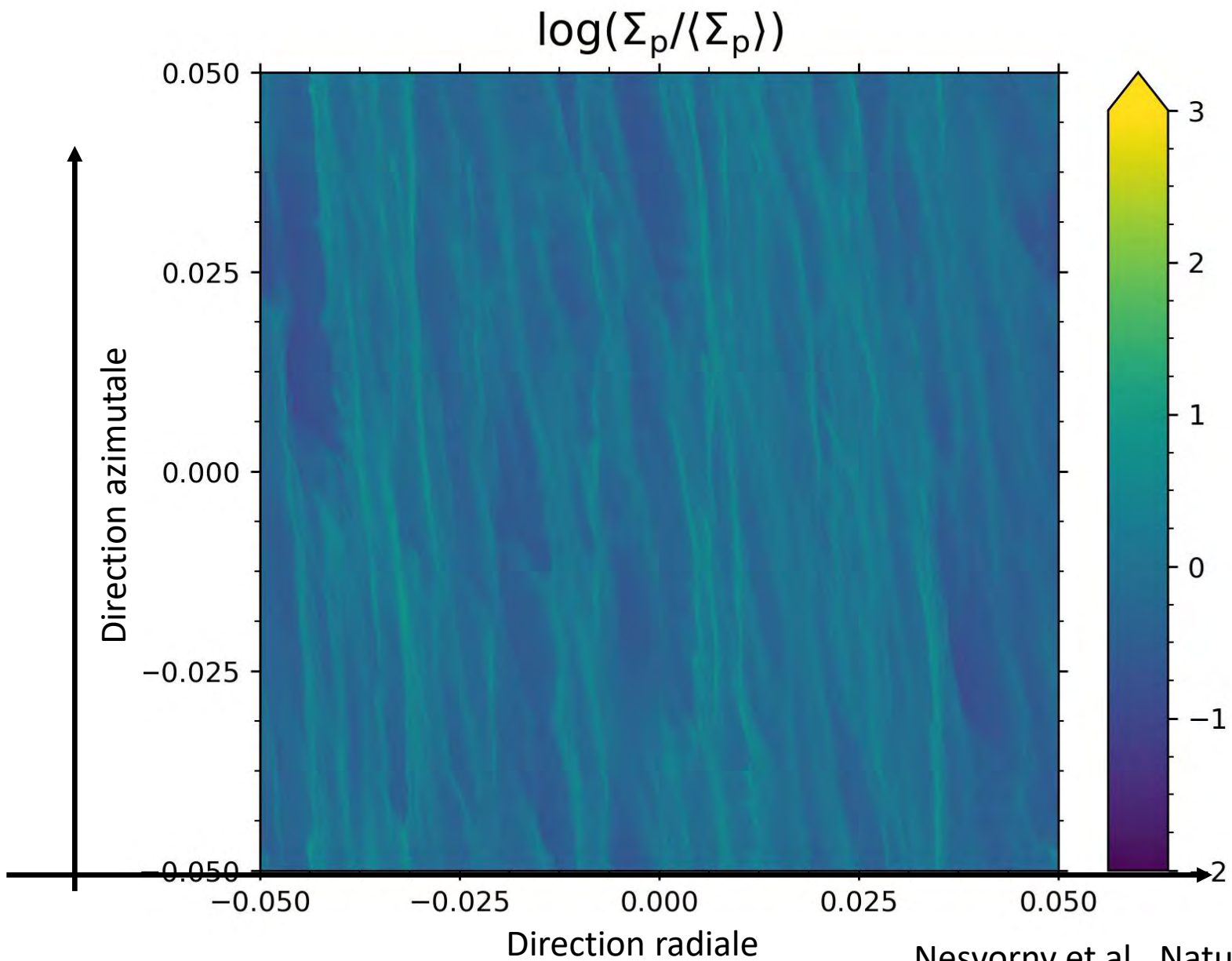


Pop. froide:  $29^{+7}_{-6}\%$  de binaires

Pop. chaude:  $\sim 2.5\%$  (Noll et al., 2008a,b)



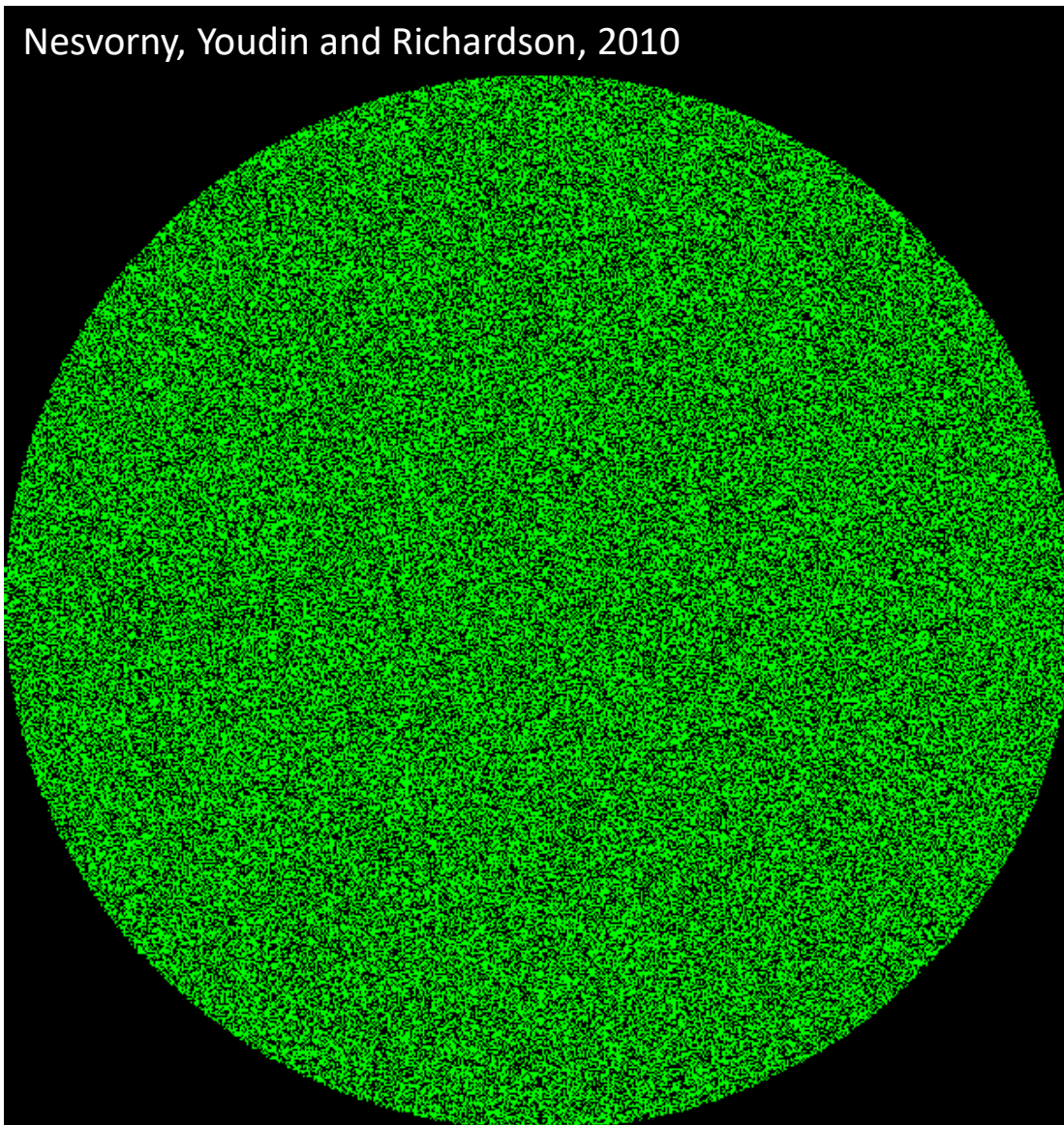
# Formation de planétésimaux binaires par instabilité de courant





## Contraction d'amas de poussières: l'obstacle du moment cinétique

Nesvorny, Youdin and Richardson, 2010



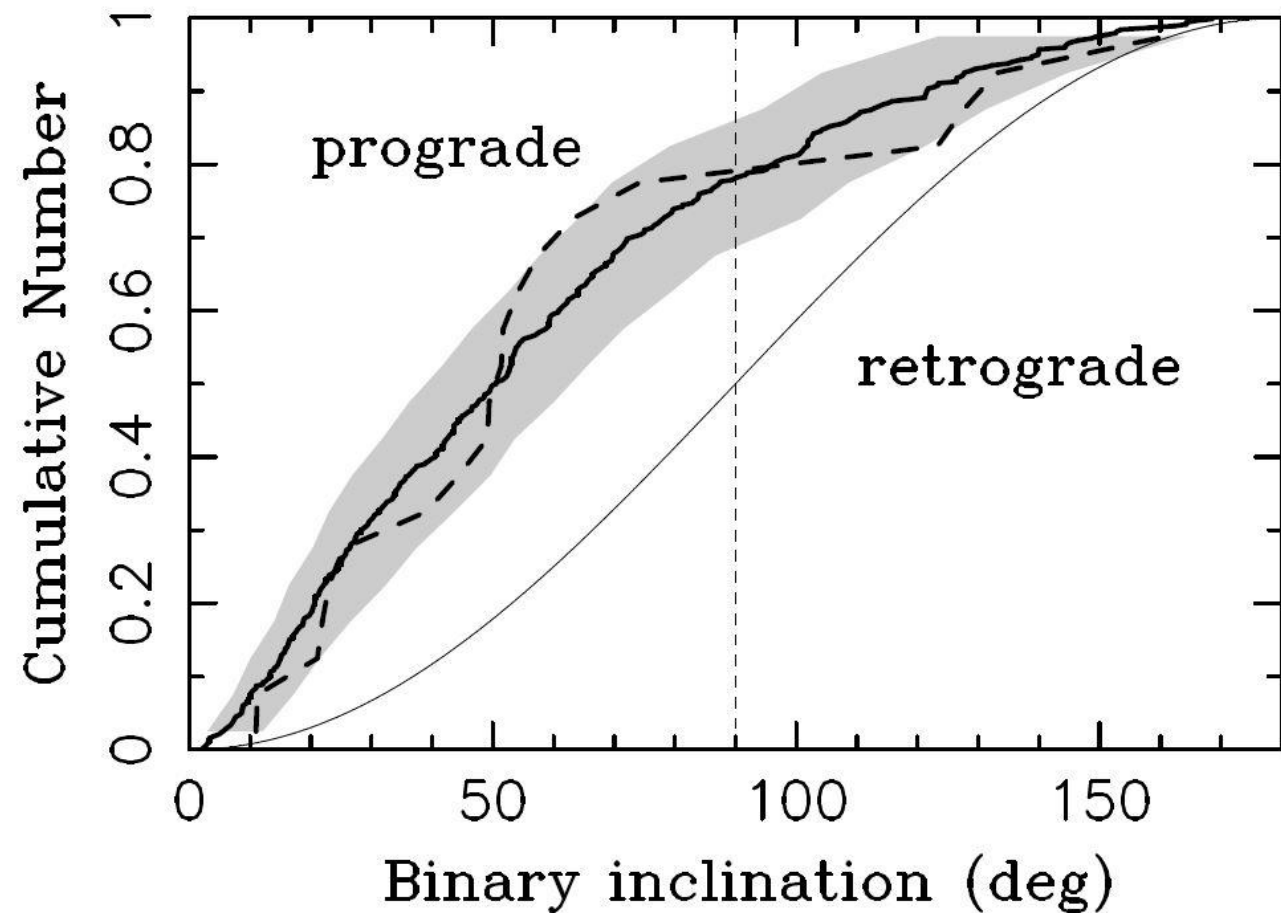
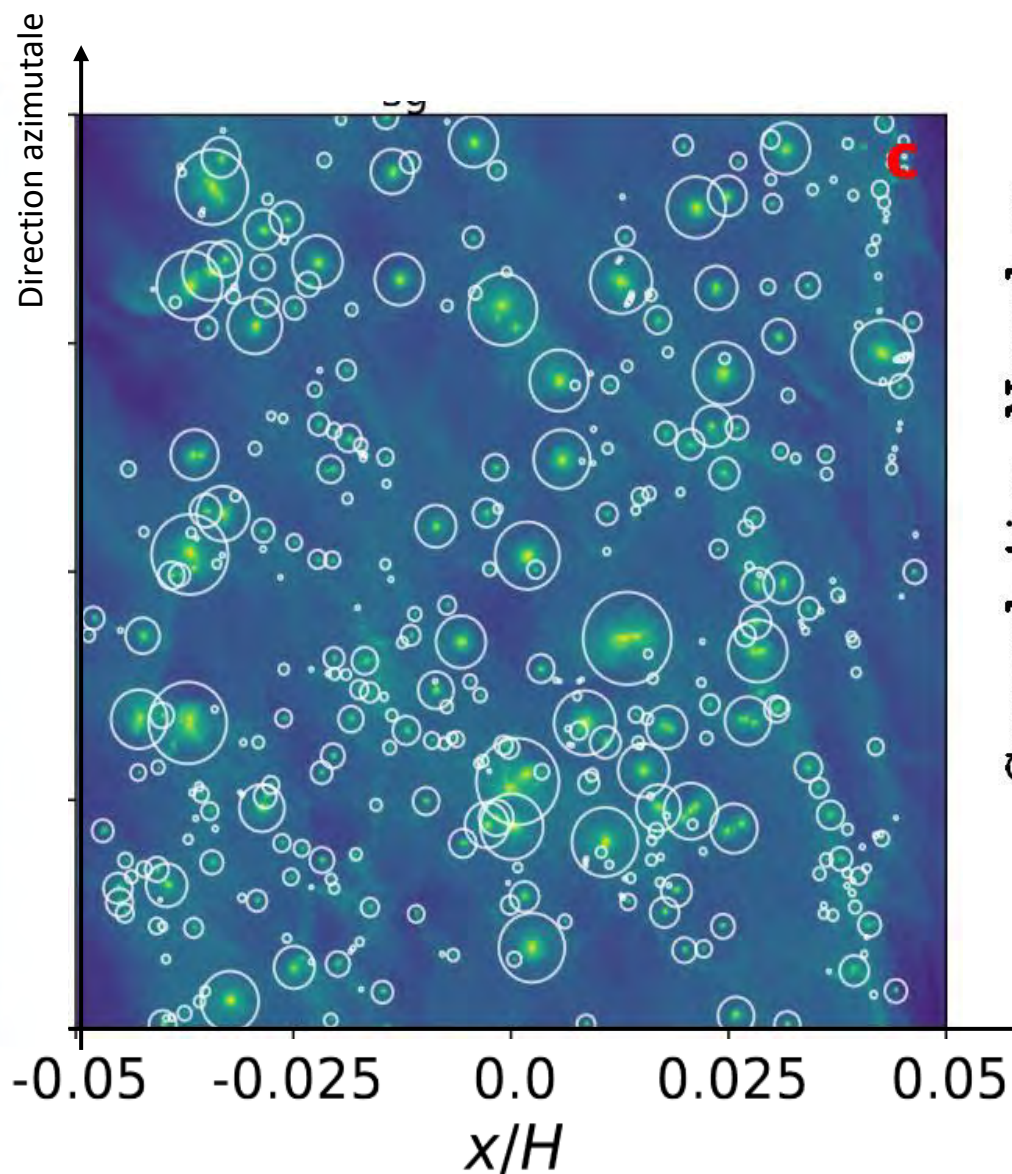
Explique le grand nombre d'objets binaires dans la ceinture de Kuiper, et les binaires en contact.



TNO Arrokoth



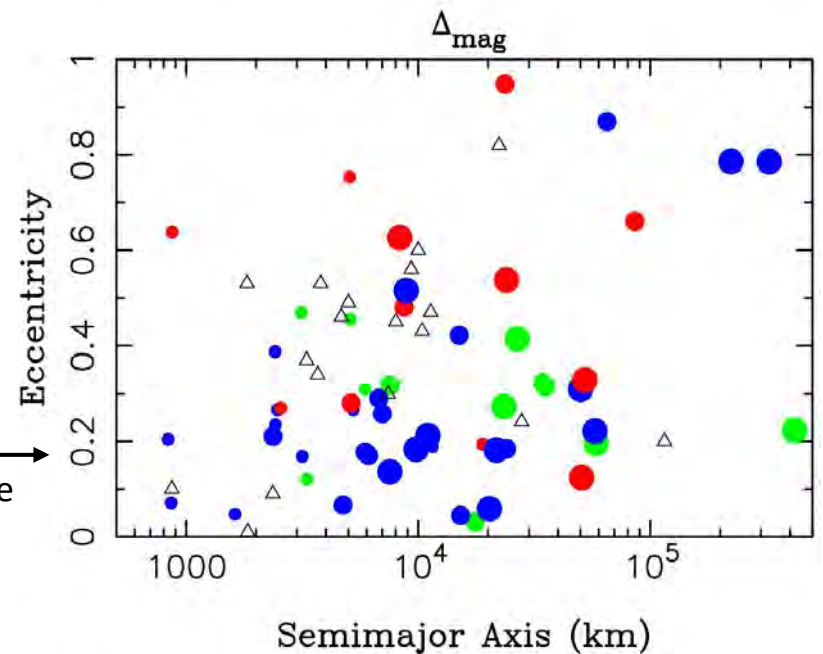
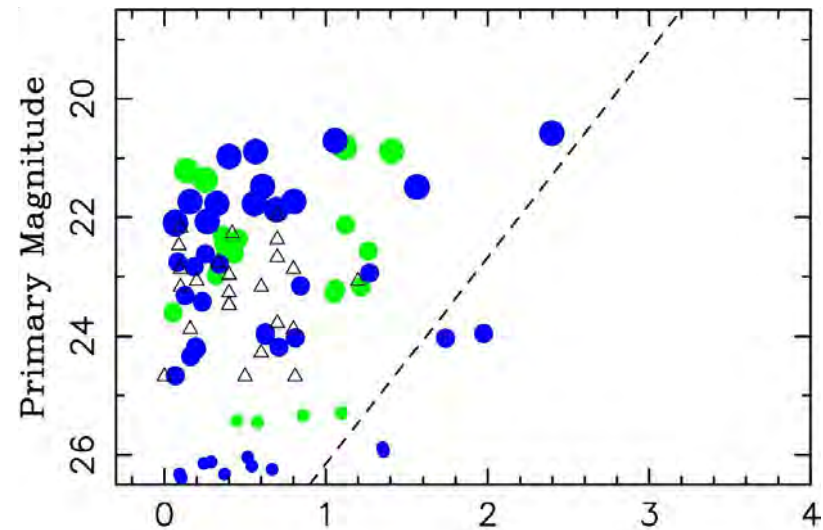
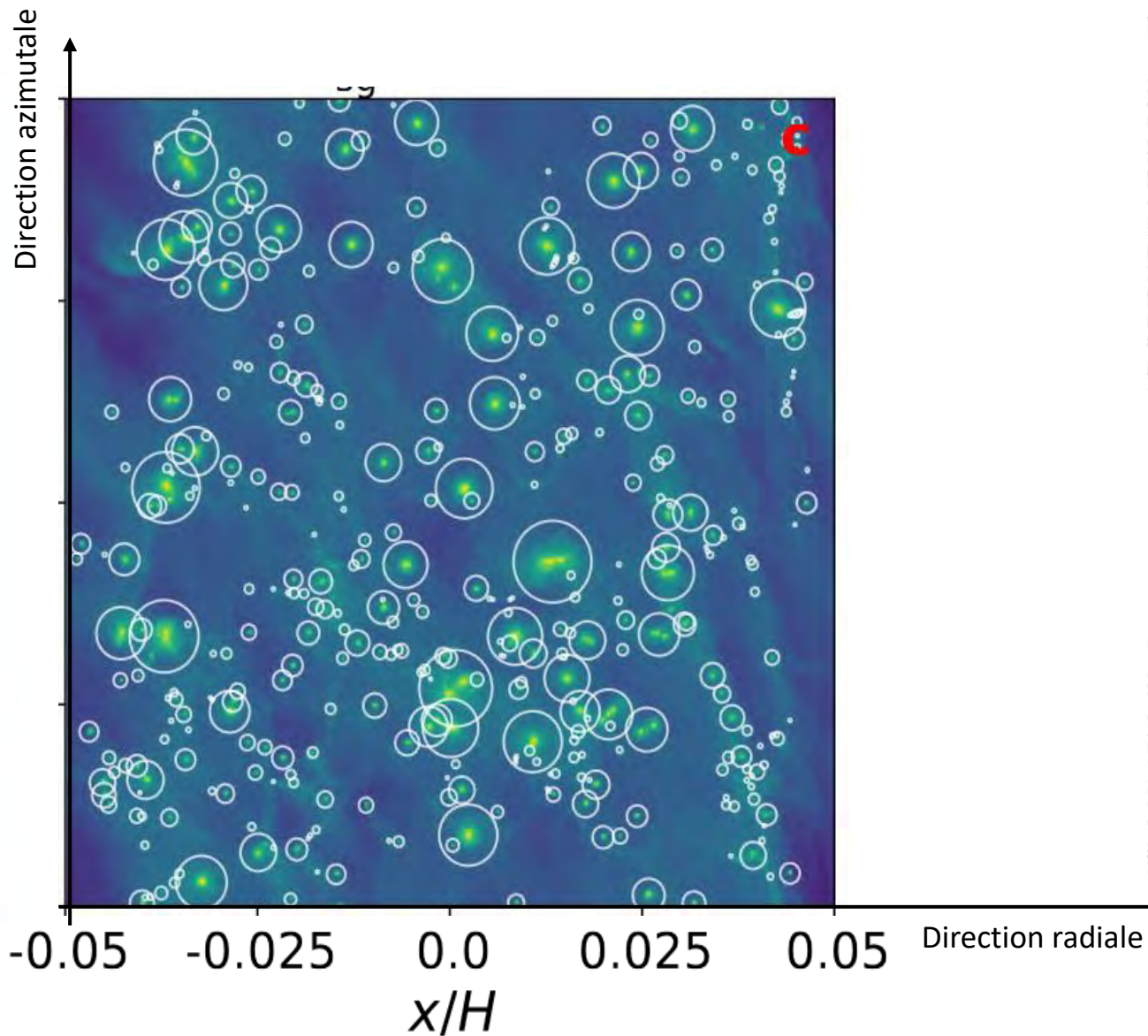
# Statistiques sur le moment cinétique et orientation du plan des binaires







# Autres propriétés des binaires

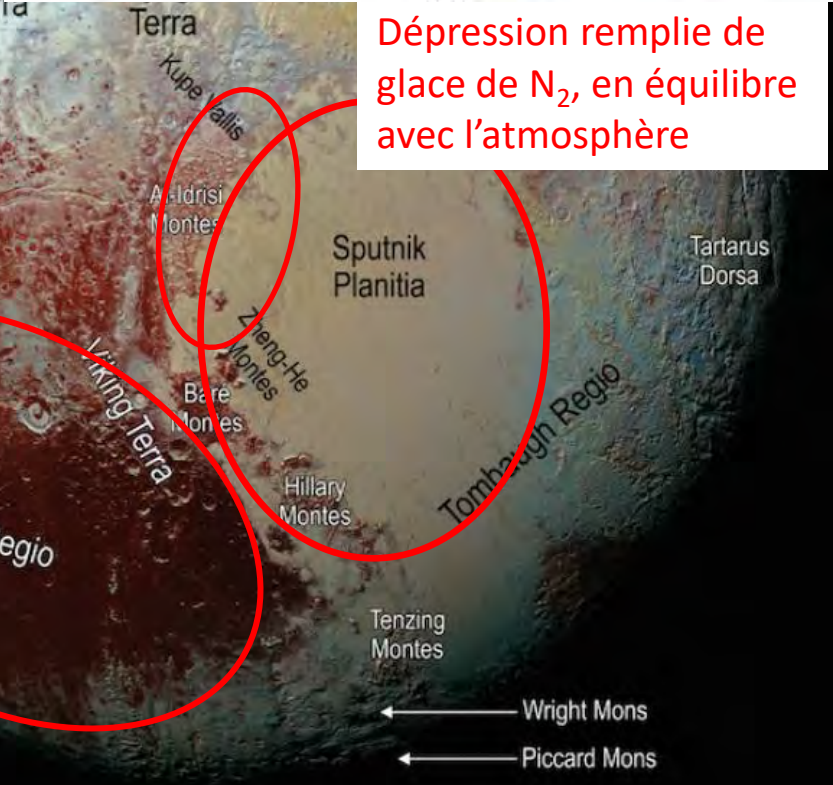
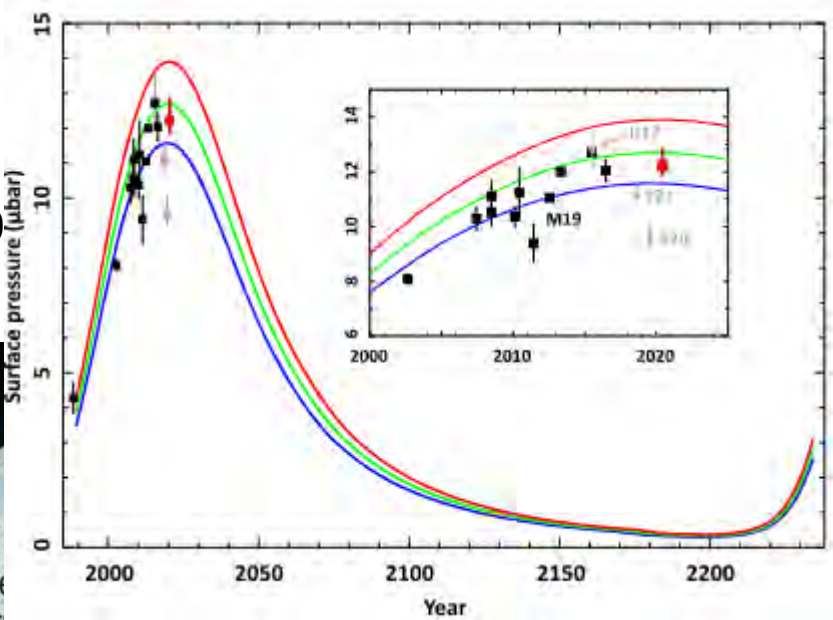




# Quelques objets notables



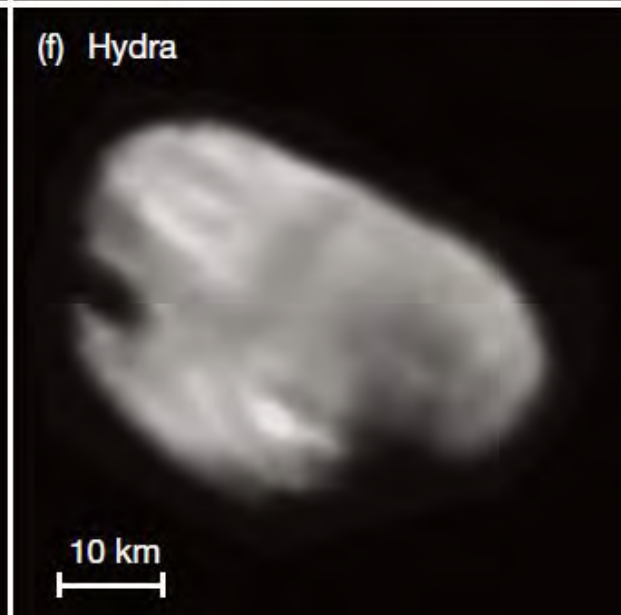
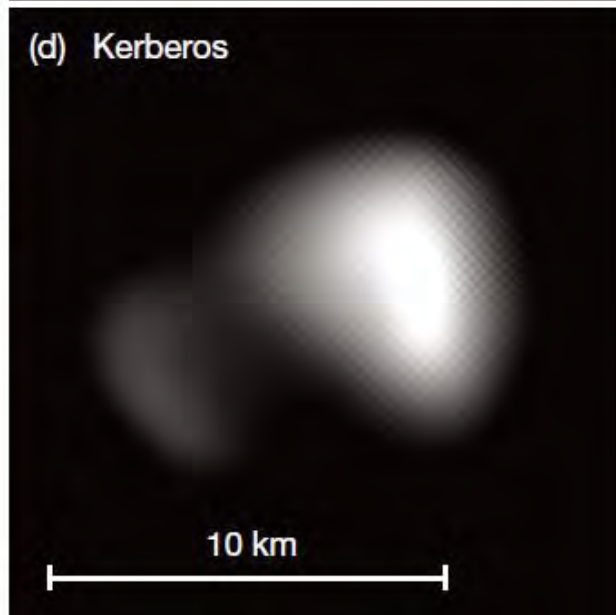
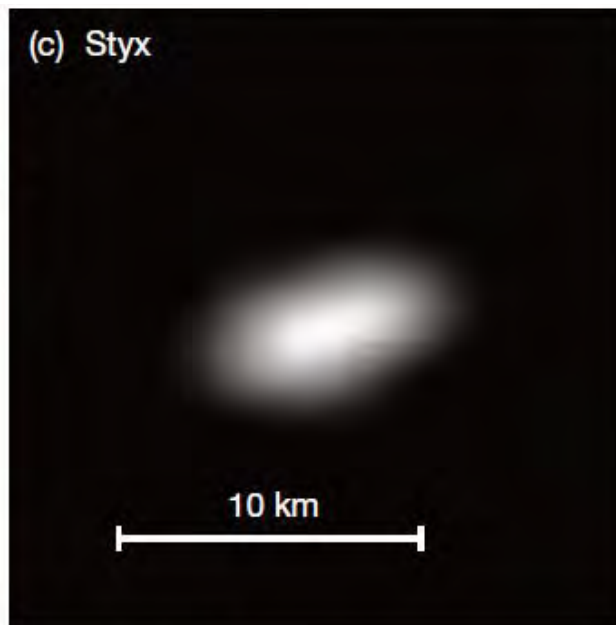
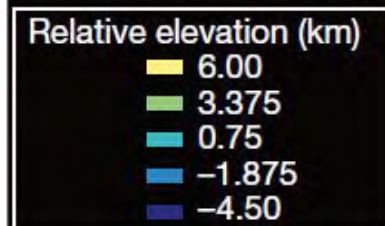
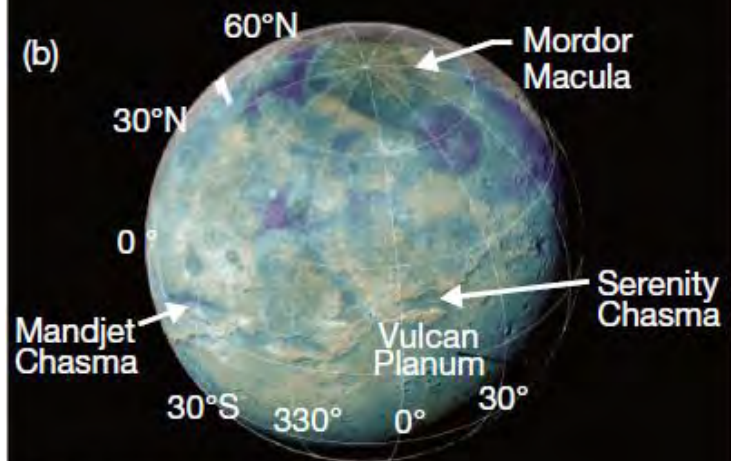
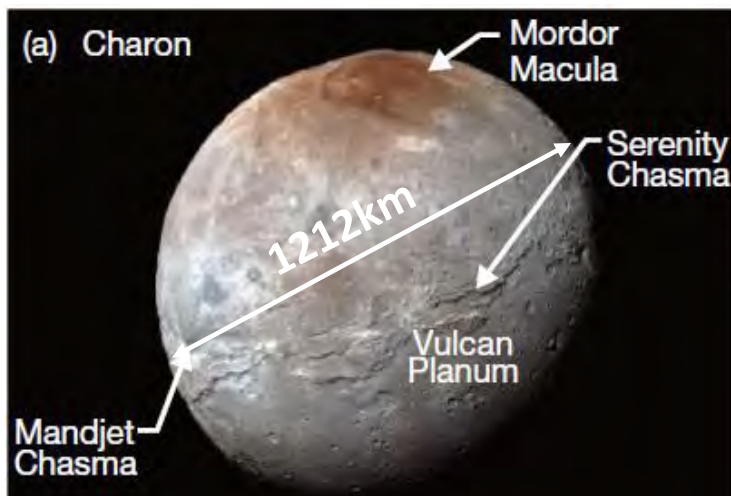
Région sombre riche en matière organique



Dépression remplie de glace de N<sub>2</sub>, en équilibre avec l'atmosphère



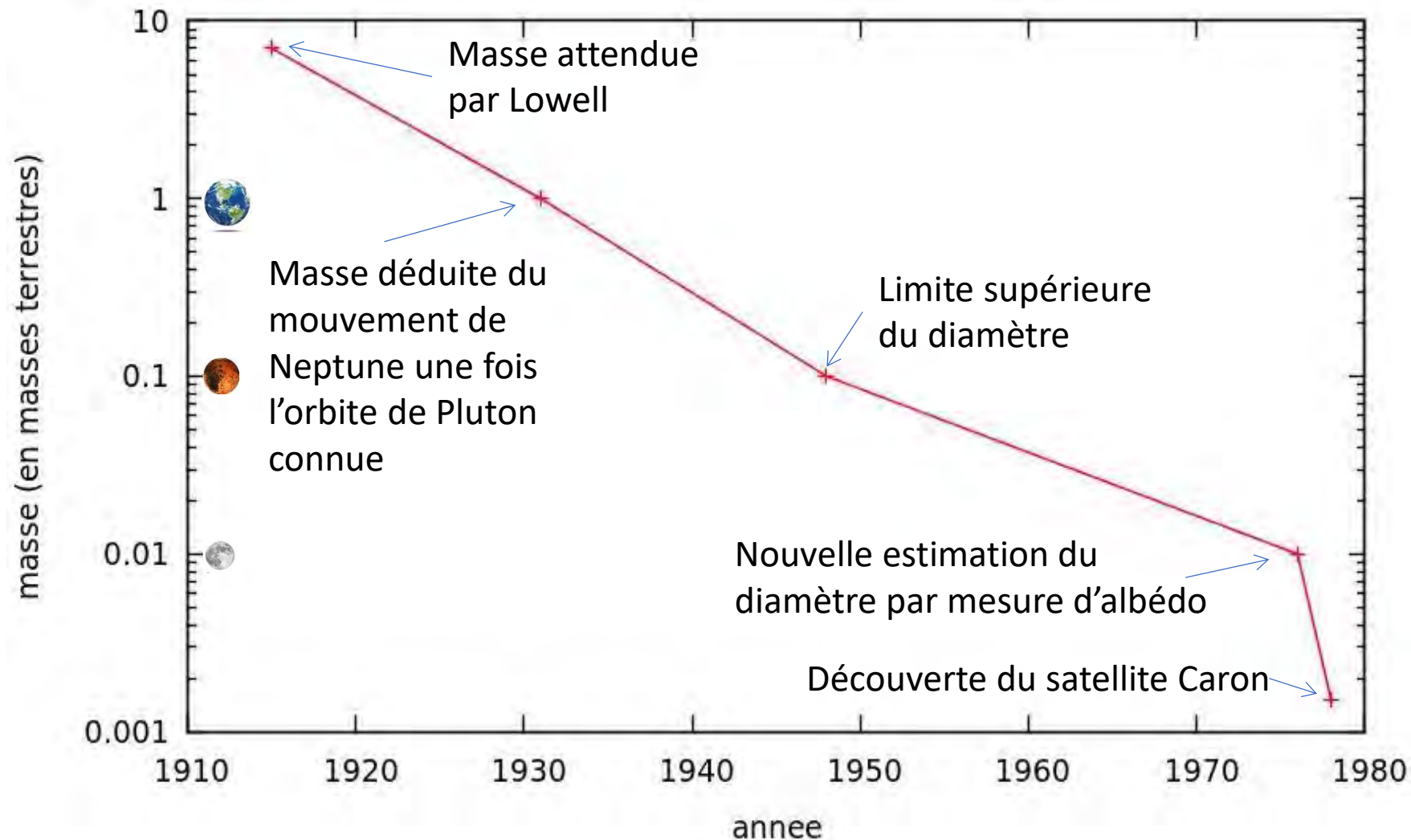
# Les lunes de Pluton





## Pourquoi Pluton n'est pas une planète?

**Faible masse:**



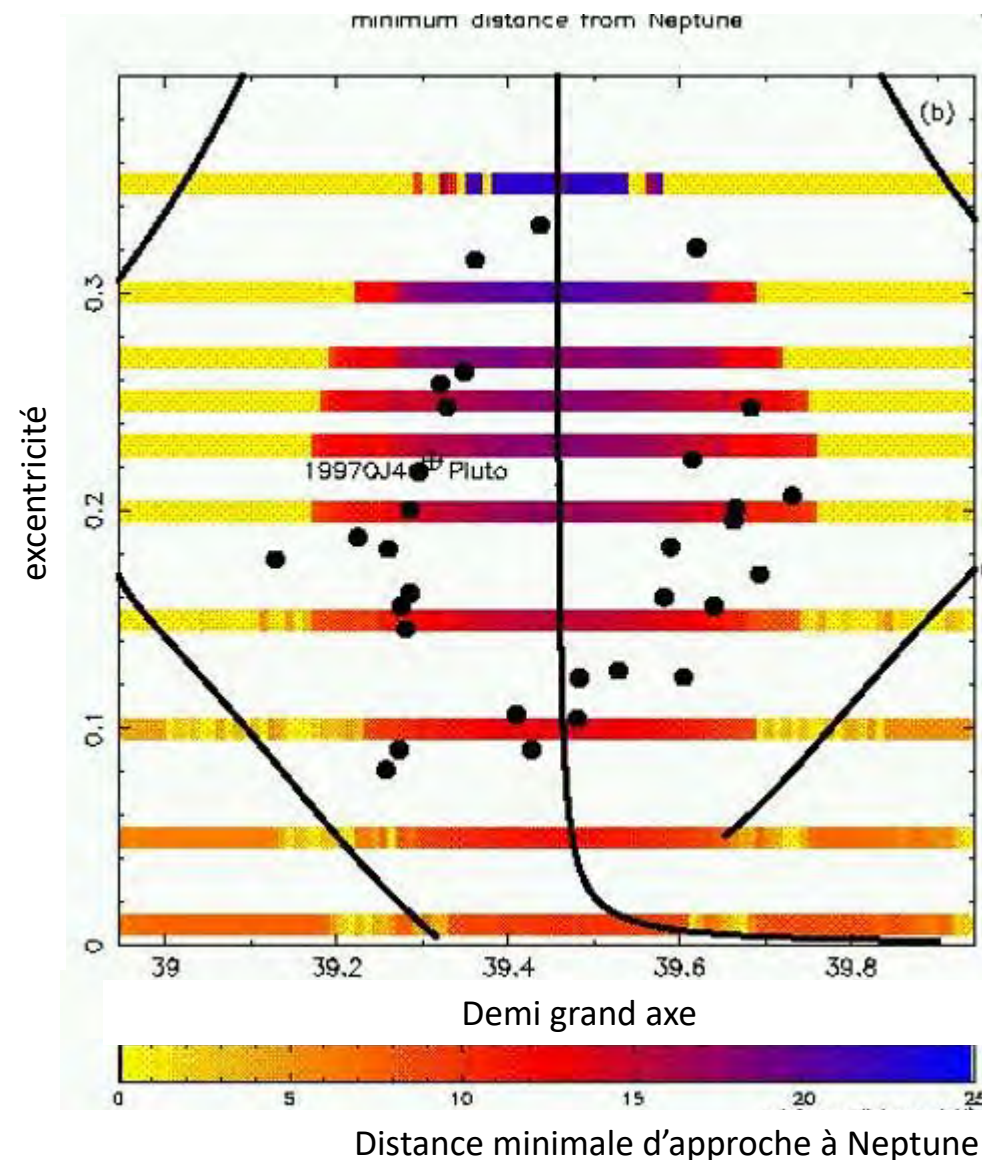
M. Standish, 1993: il n'y a pas d'anomalies dans les mouvements de Uranus et Neptune une fois que les bonnes masses et positions des planètes sont prises en compte



## Pourquoi Pluton n'est pas une planète?

Les planètes dominent la dynamique des corps dans leur voisinage, typiquement en les rendant instables ou les confinant dans des zones de stabilité, comme le Troyens de Jupiter.

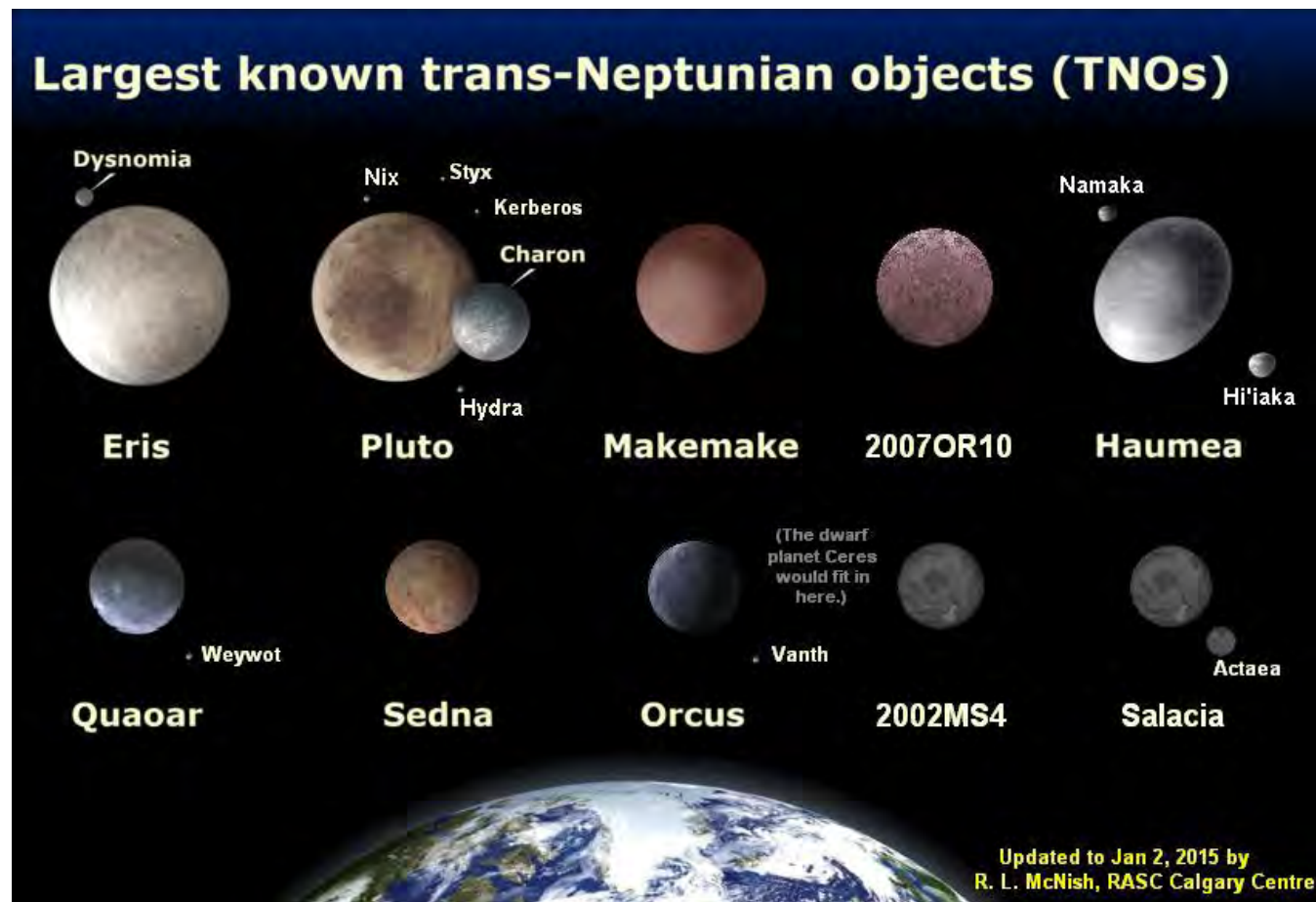
Pluton n'influence pas la dynamique de la ceinture de Kuiper à cause de sa trop faible masse. Il n'affecte même pas les objets qui partagent la même résonance que lui.





## Pourquoi Pluton n'est pas une planète?

Les planètes se détachent de la distribution des tailles des corps voisins, mais pas Pluton





## Arrokoth

Objet de la population classique froide observé par New Horizons ( $a=44,3$  ua,  $e=0.046$ ,  $i=2,4^\circ$ )

Binaire de contact

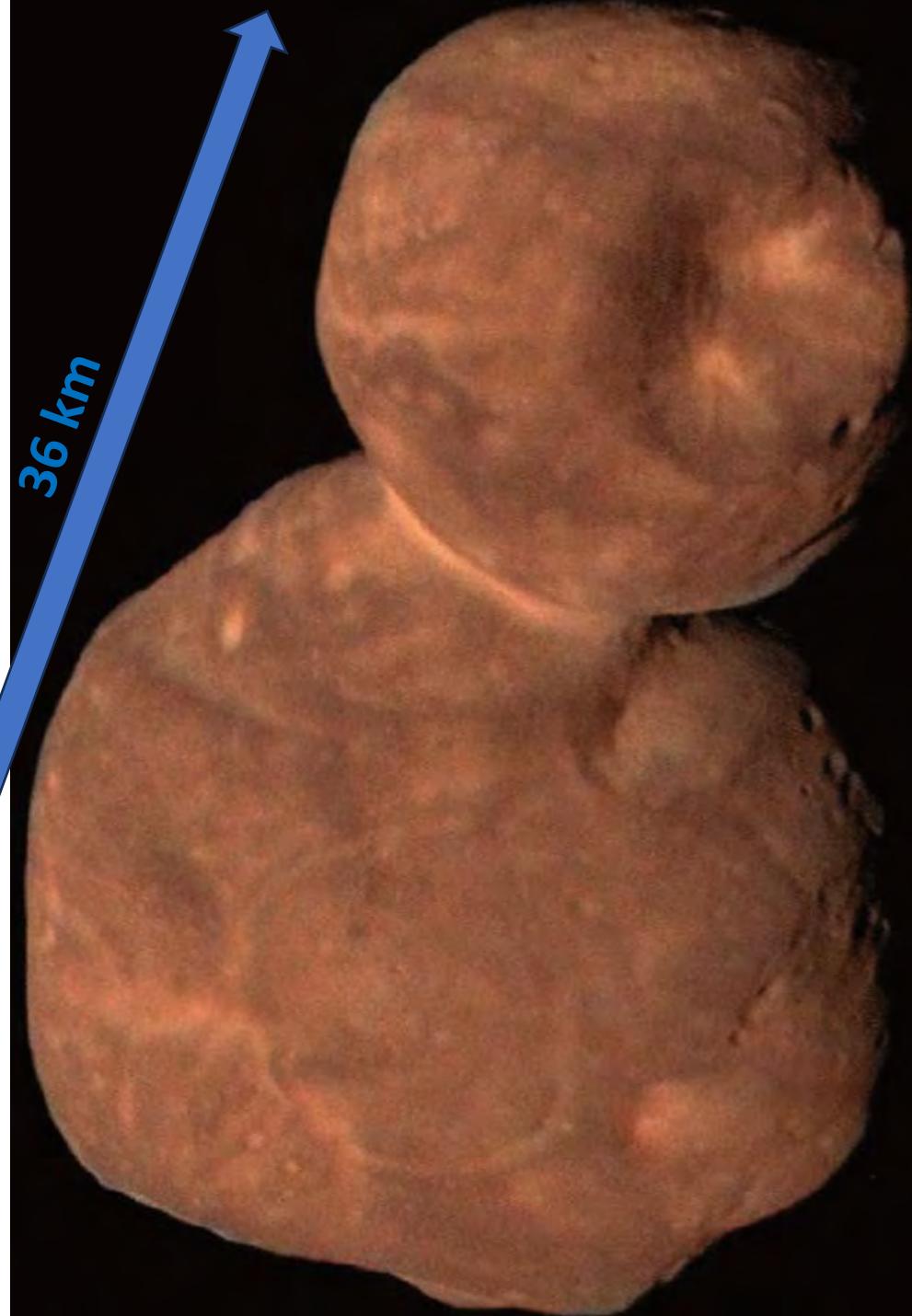
Structure aplatie:

$20,6 \times 19,9 \times 9,4$  km et  $15,4 \times 13,8 \times 9,8$  km



Densité:  $0,5\text{g/cm}^3$  !!!

Chimique organique très riche: ribose et le glucose et hydrocarbures aromatiques (Zhanga et al., 2024)







## Haumea

$a = 43 \text{ ua}$ ,  $e=0.2$ ,  $i=28^\circ$  (population chaude)

Forme en ballon de rugby:  $2100 \times 1700 \times 1100 \text{ km}$

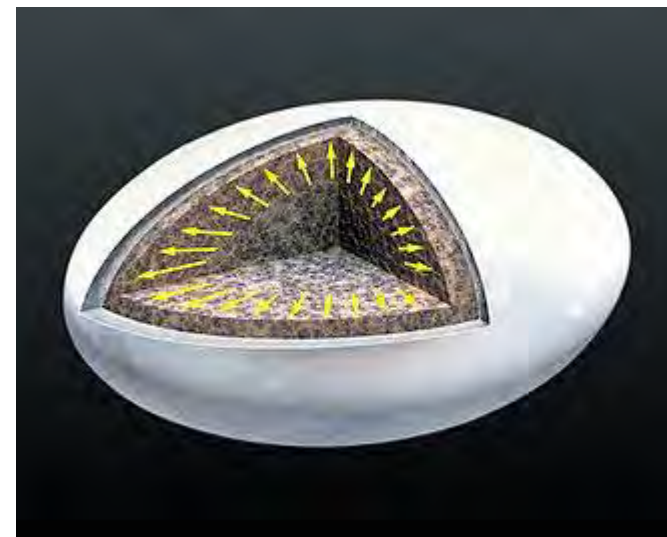
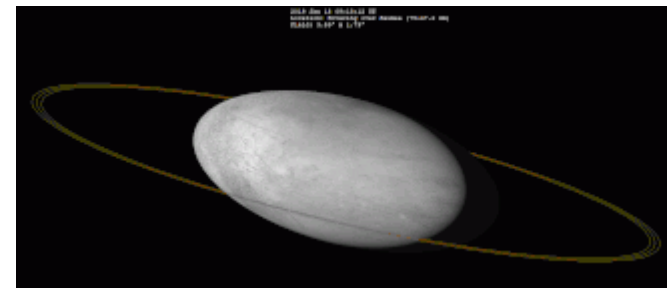
Surface couverte de glace presque pure

Rotation rapide en  $\sim 4\text{h}$

Haute densité:  $2,6 - 3,3 \text{ g/cm}^3$

Deux petits satellites, un anneau.

Probablement, ce qui reste d'un objet différencié en un manteau de glace et un noyau de roches, qui a perdu la plus grande partie de son manteau dans une grande collision





## Haumea

$a = 43 \text{ ua}$ ,  $e=0.2$ ,  $i=28^\circ$  (population chaude)

Forme en ballon de rugby:  $2100 \times 1700 \times 1100 \text{ km}$

Surface couverte de glace presque pure

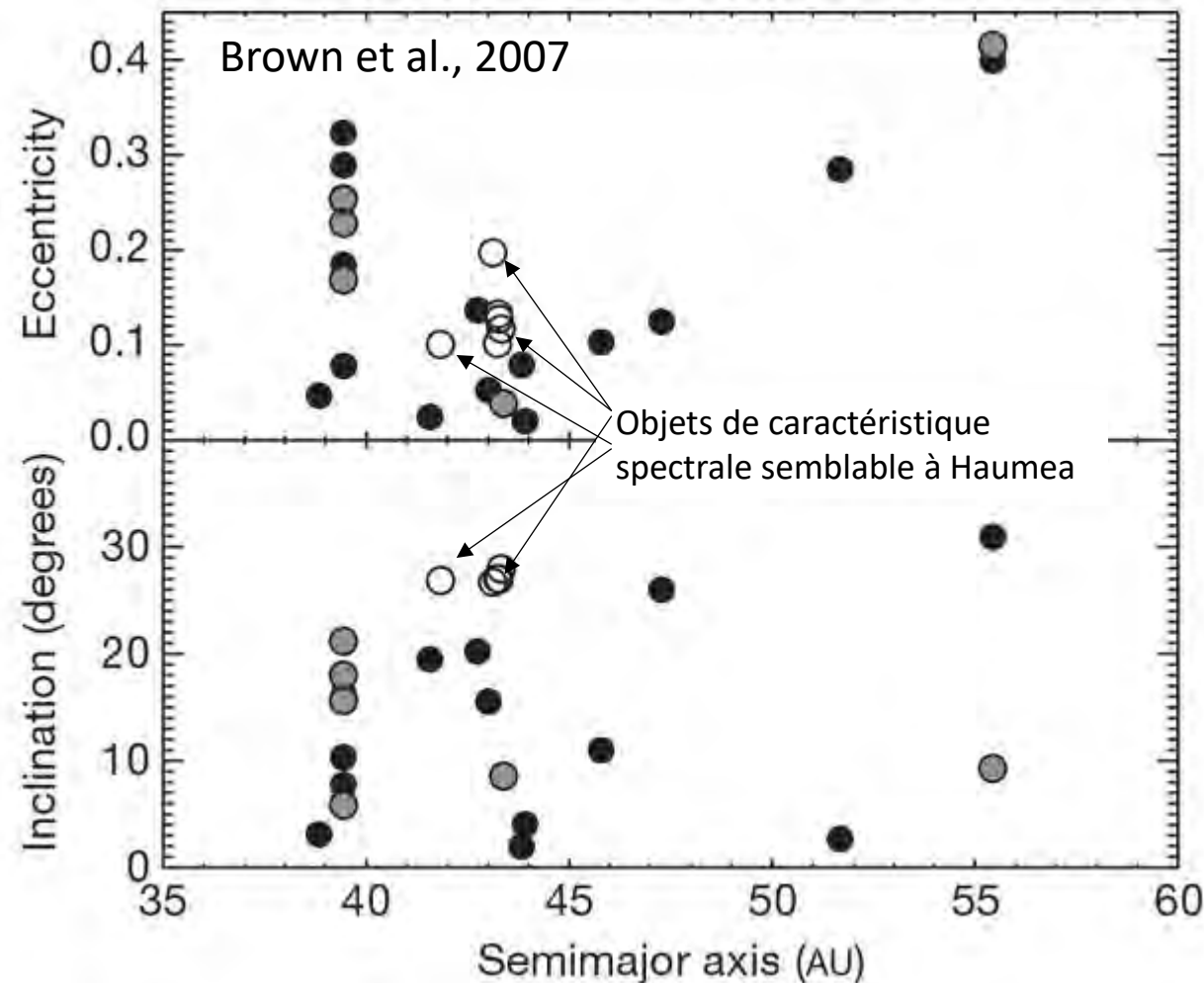
Rotation rapide en  $\sim 4\text{h}$

Haute densité:  $2,6 - 3,3 \text{ g/cm}^3$

Deux petits satellites, un anneau.

Probablement, ce qui reste d'un objet différencié en glace et un noyau de roches, qui a perdu la plus grande partie de son manteau dans une grande collision

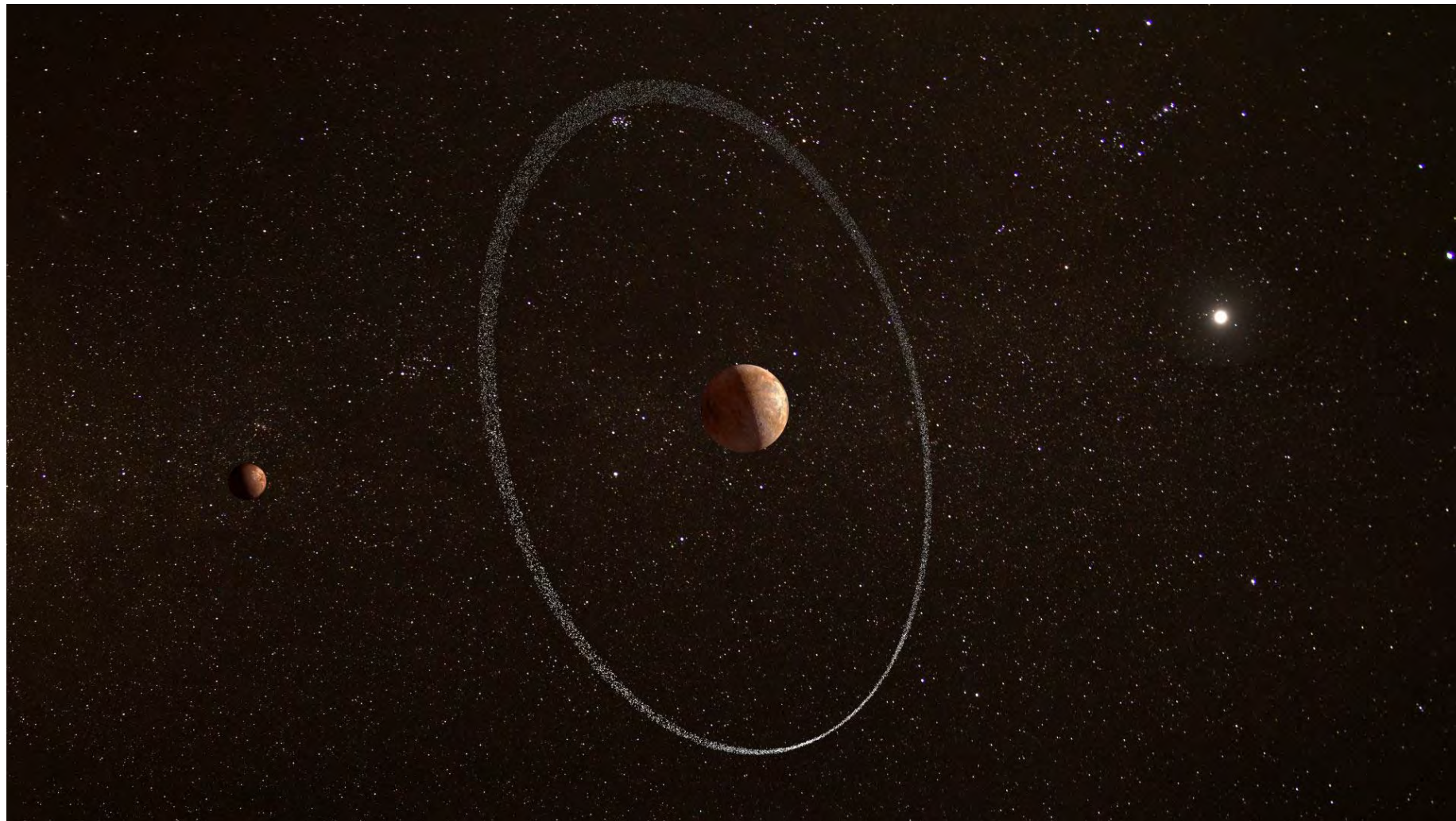
Cette collision a donné origine à une famille d'objets de nature similaire





## Quaoar

Diamètre  $\sim 1.100$  Km,  $a=43,2$  ua,  $e=0.03$ ,  $i=7^\circ$  (pop. chaude), possède aussi un anneau (Morgado et al., 2023) et un satellite (Brown et Suerdans, 2006)





## A retenir

- La population trans-neptunienne a une structure complexe dans l'espace orbital.
  - Population classique froide
  - Population classique chaude
  - Populations résonnantes
  - Disque dispersé
  - Disque fossilisé
- Les différences en distribution d'inclinaisons, couleurs, spectres et fraction d'objets binaires suggèrent fortement que les populations chaude et froide ont une origine différente, même si elles partagent la même région (a,e) aujourd'hui
- Le disque dispersé s'est formé par la dispersion des planétésimaux proches à l'orbite de Neptune sous l'effet des rencontres proches avec cette planète. C'est le ~1% restant de la population originelle
- L'origine du disque fossilisé ne s'explique pas dans le système solaire actuel.
- Ainsi que l'inclinaison de la population chaude
- L'abondance d'objets résonnants est étonnante.
- Tout en étant très intéressant, Pluton n'a pas les caractéristiques d'une planète. Grande différence physique entre les objets gros (planètes naines: Pluton, Quaoar, Hamuea, ...) et les petits (Arrokoth)



# Spectres JWST

