



Leçon N. 2 - 30 octobre 2024

Alessandro
MORBIDELLI

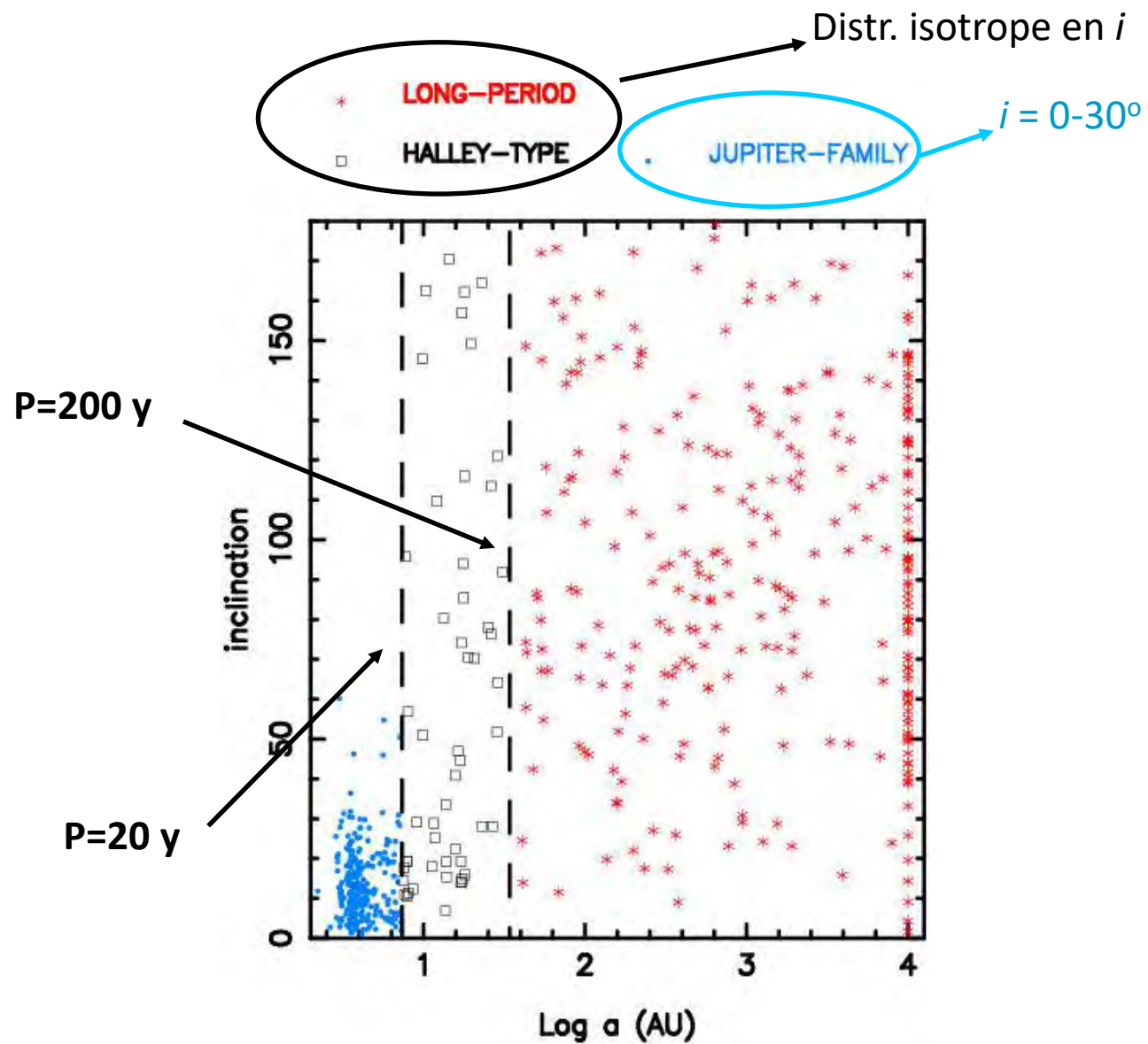
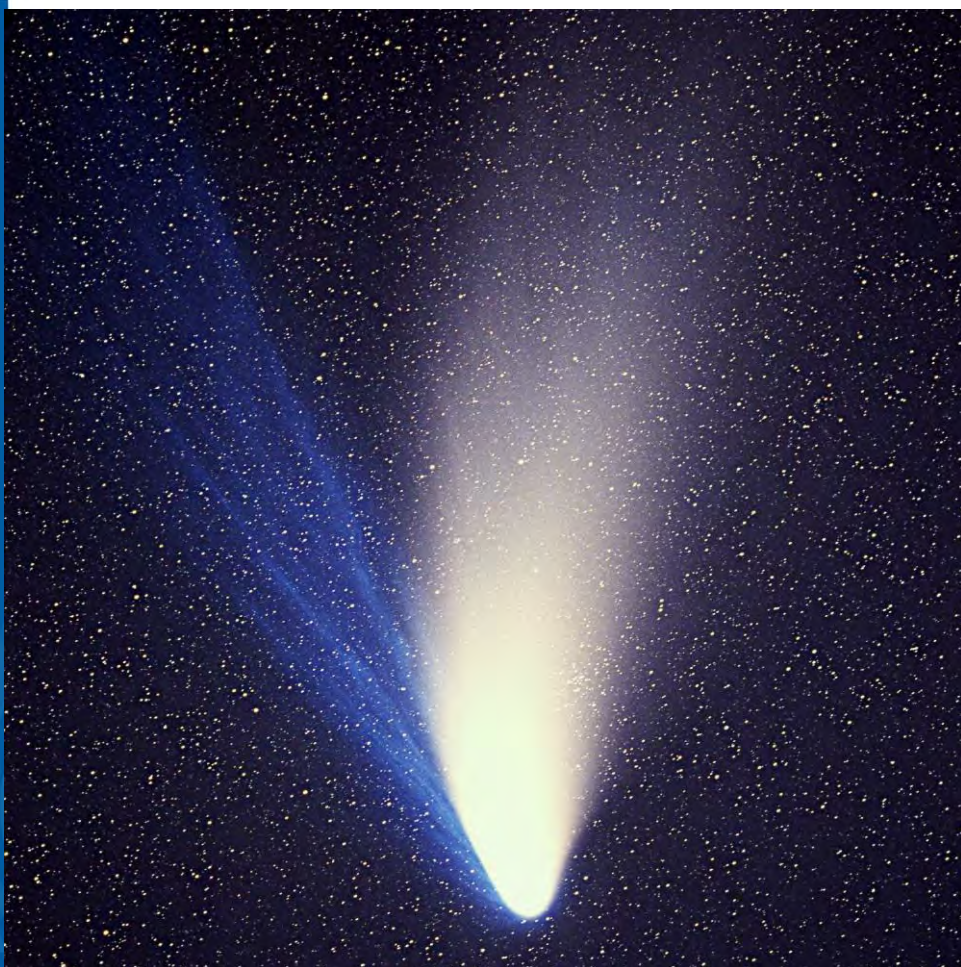
Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

***Origine et évolution du Système solaire externe:
L'origine des comètes et la fantomatique Planète IX***

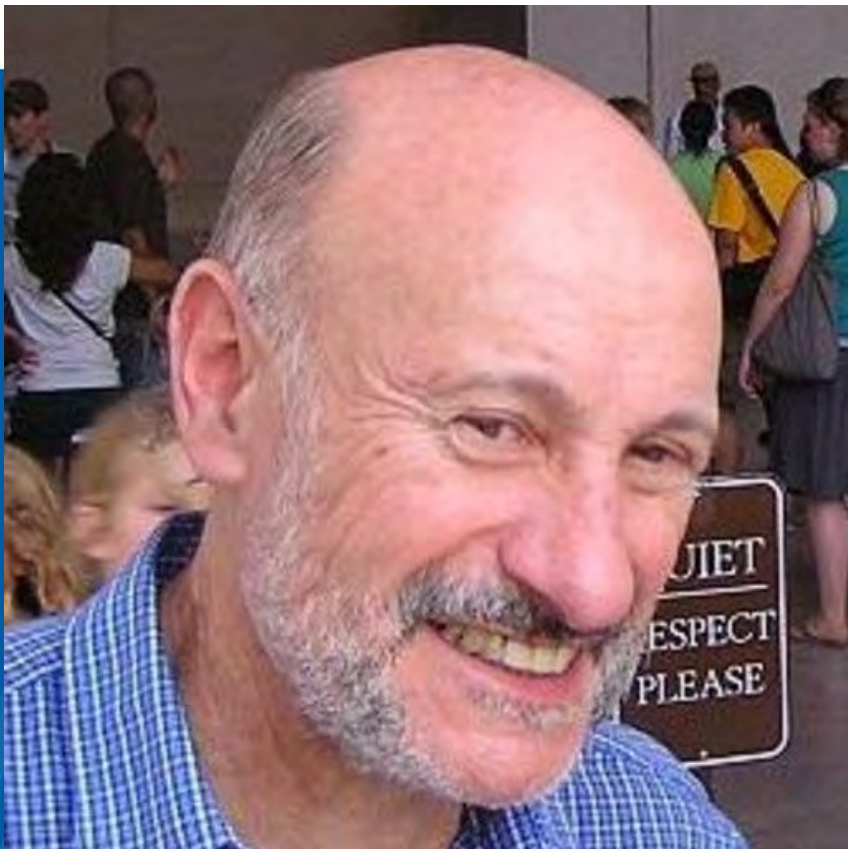


La classification des comètes





Les prédicteurs du disque trans-Neptuniens



Julio Fernandez (MNRAS, 1980)



Gerard Kuiper (1951)

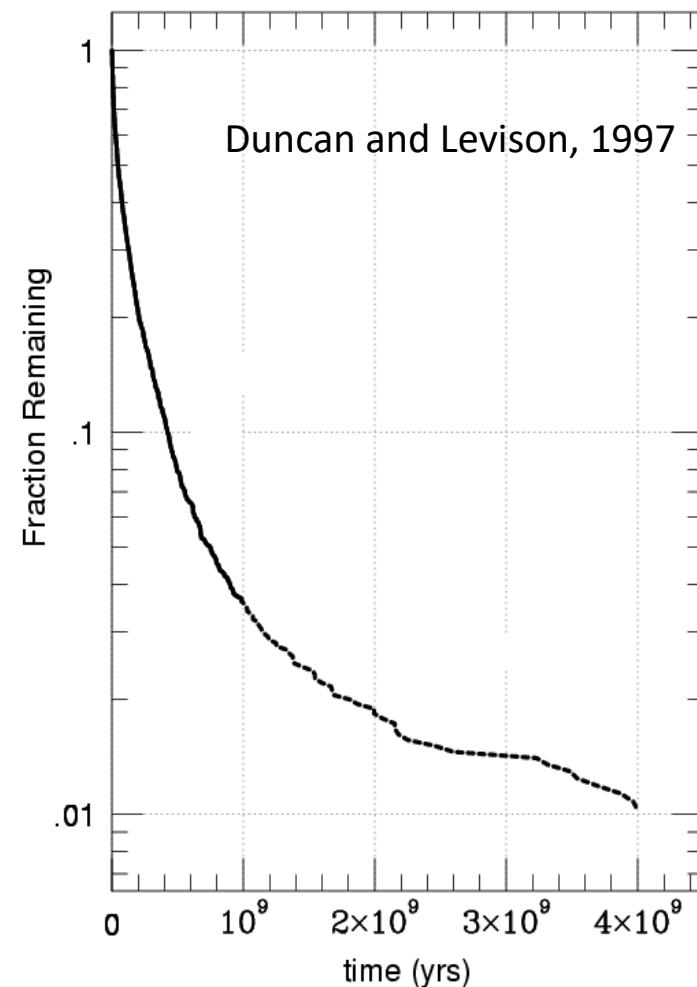
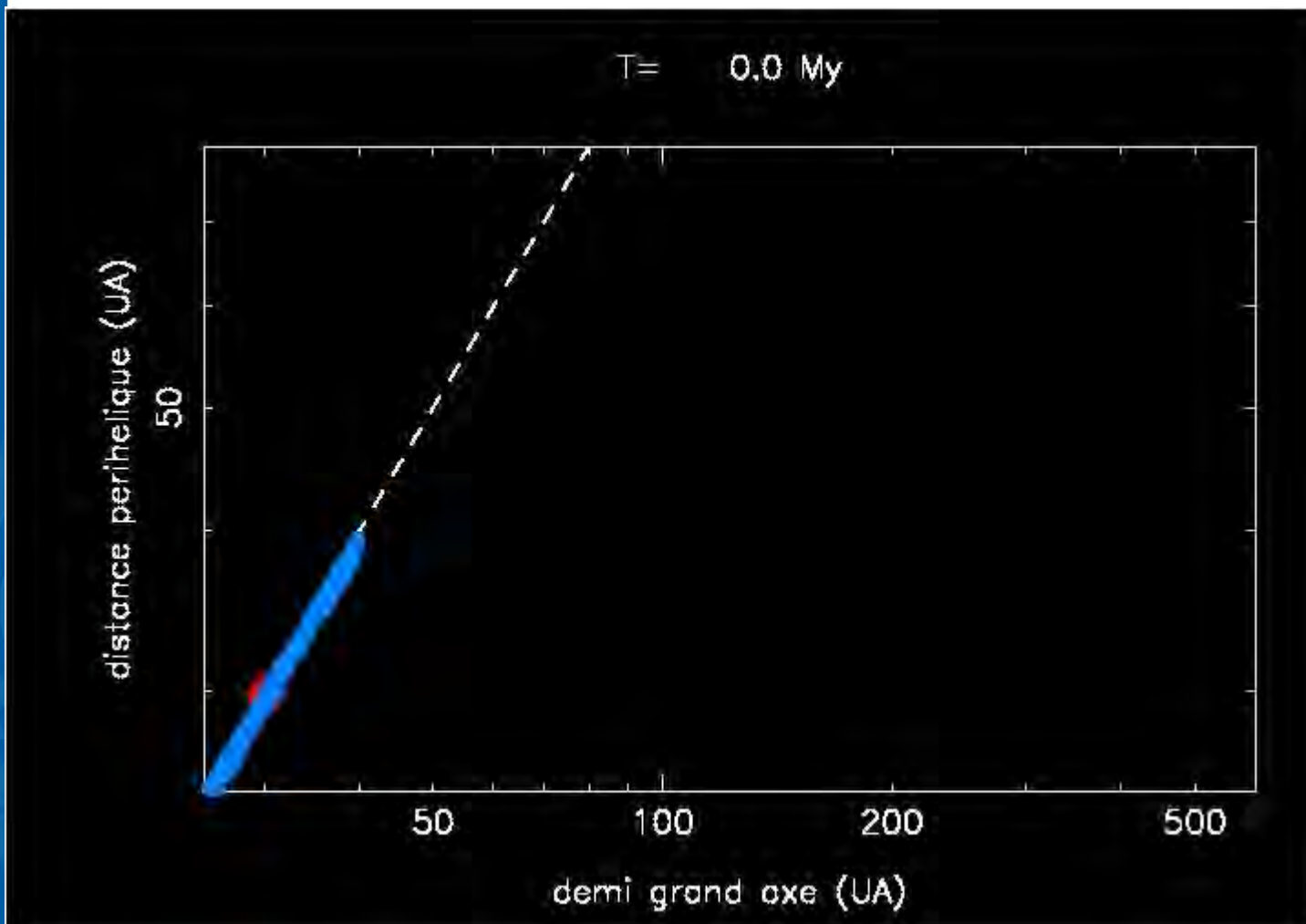


Kenneth Edgeworth (1938)



Le disque dispersé et l'origine des JFCs

- Les JFCs ayant des petites inclinaisons par rapport à l'écliptique, leur source devrait être un disque d'objets
- Le *disque dispersé* étant intrinsèquement instable (à l'inverse de la population classique) et le plus peuplé, il est le suspect idéal.

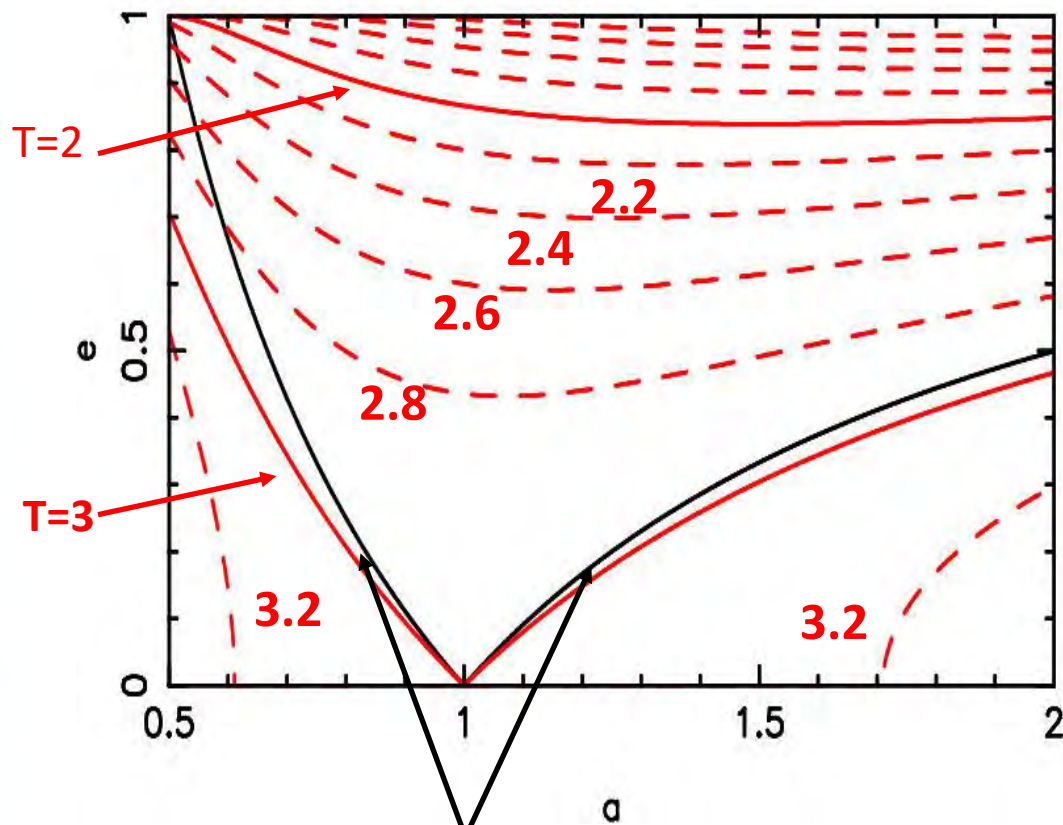




Le disque dispersé et l'origine des JFCs

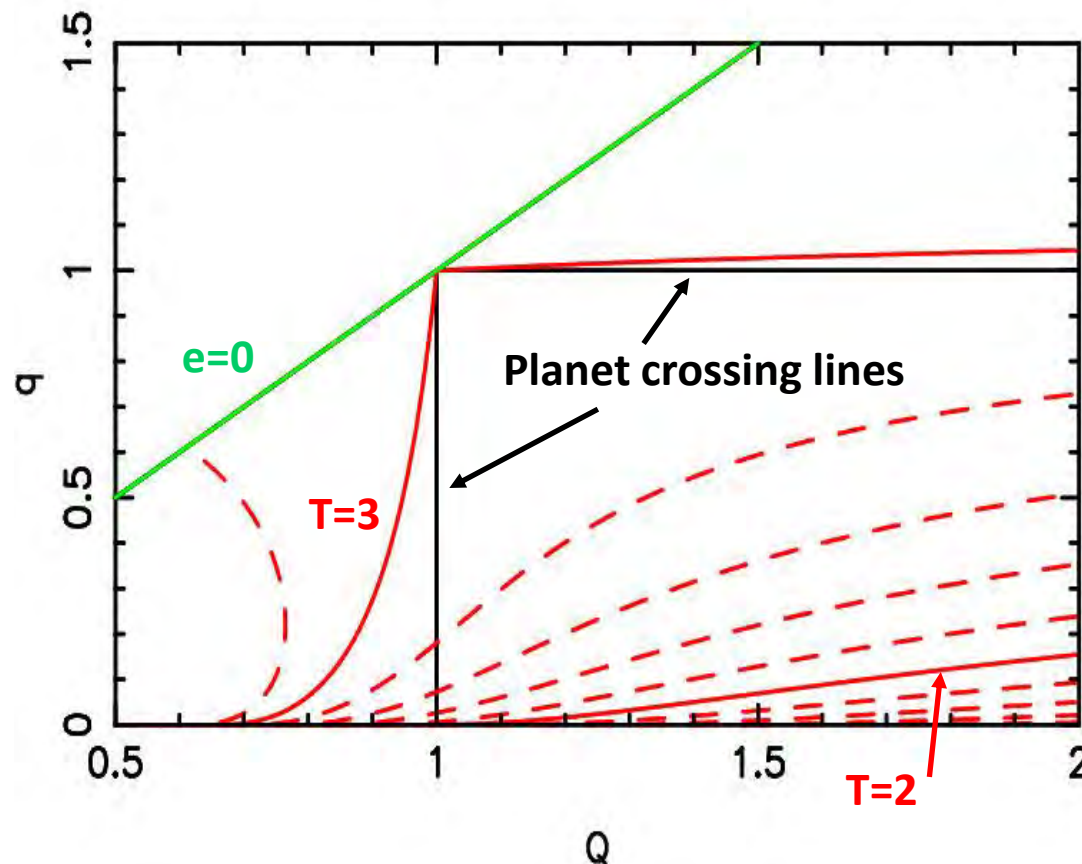
Nous avons vu aussi que la dynamique des objets sous les effets des rencontres avec une planète sur orbite presque circulaire conserve le paramètre de Tisserand, ce qui est presque équivalent à conserver q ou Q selon que l'objet ait $a > a_p$, $q \sim a_p$ ou $a < a_p$, $Q \sim a_p$

Tisserand parameter level curves (for $i=0$)



Planet crossing curves

Tisserand parameter level curves (for $i=0$)

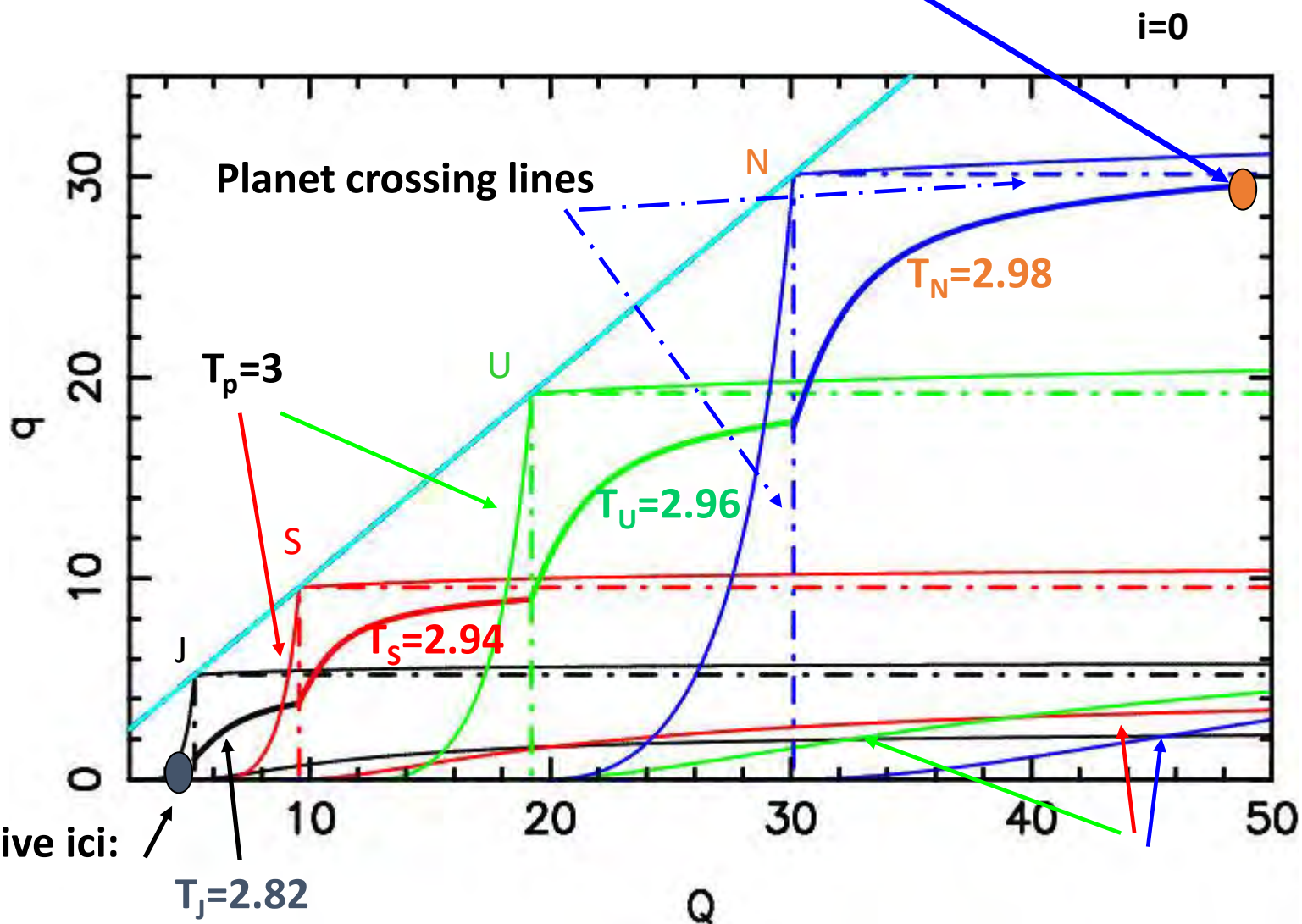




Le disque dispersé et l'origine des JFCs

Evolution du paramètre de Tisserand pendant le transfert du disque dispersé au Système solaire interne

La comète part d'ici: $T_N=2.98$



La comète arrive ici:

$T_J=2.82$

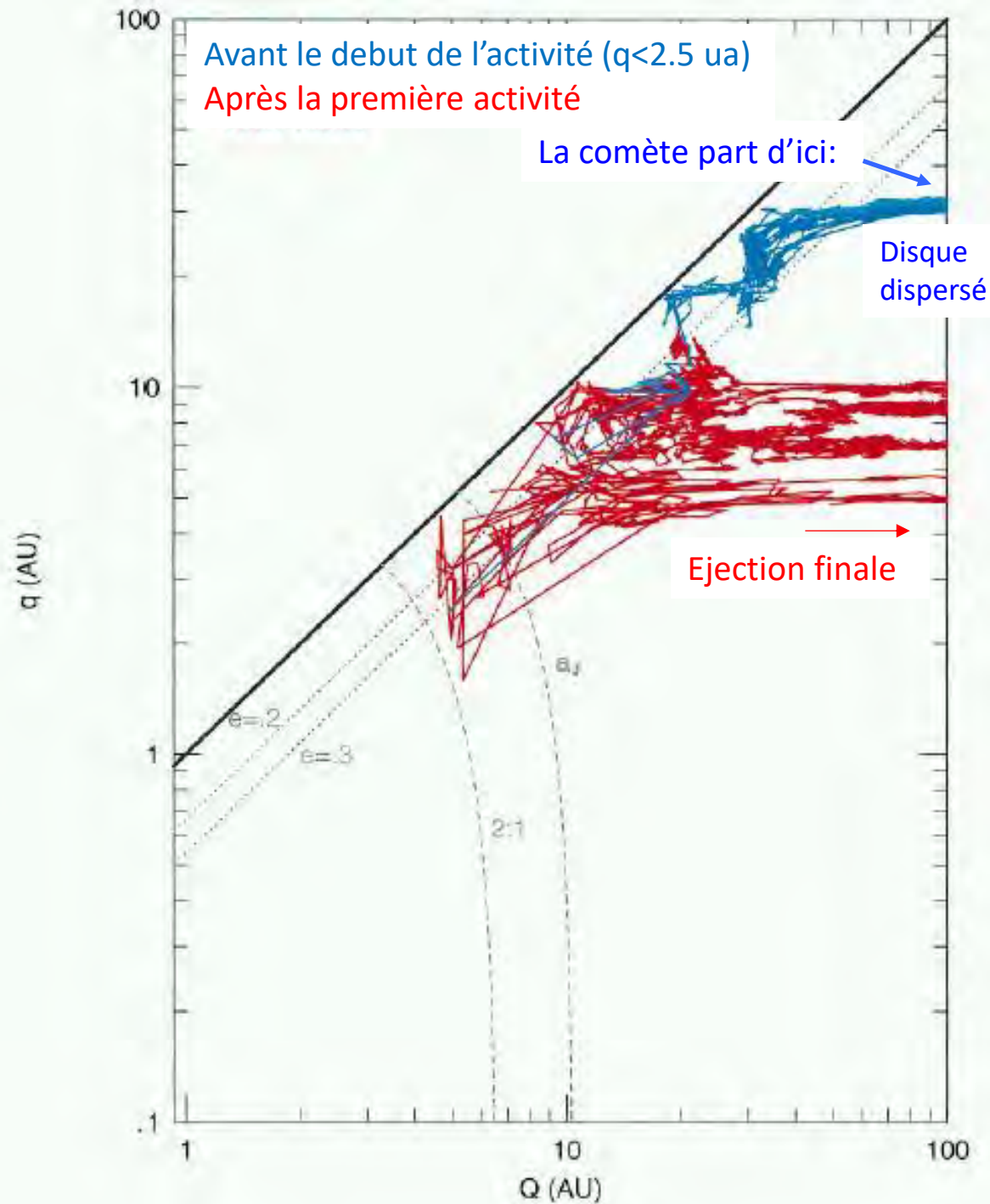
$T_J=2.82$

Q



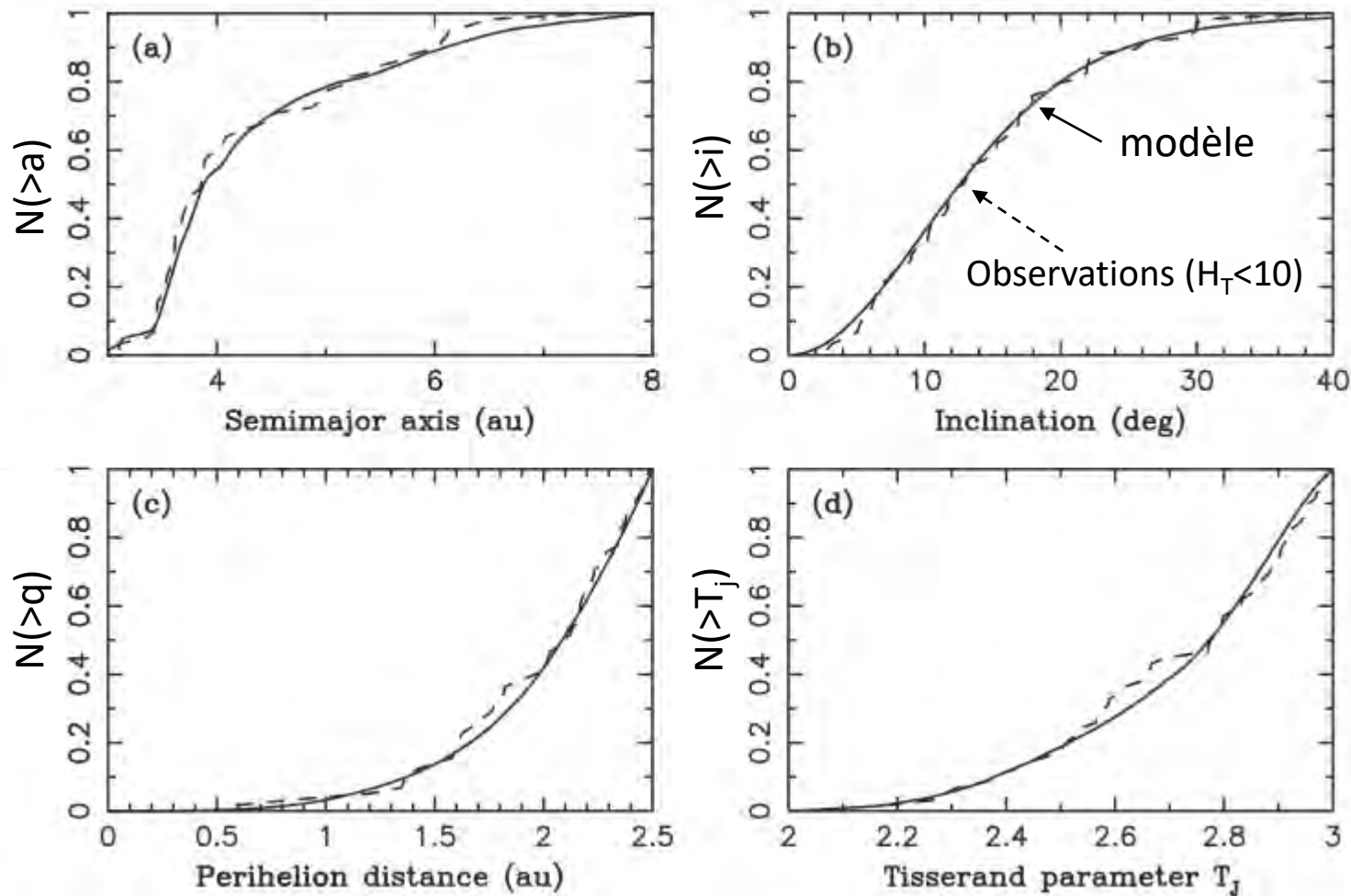
Le disque dispersé et l'origine des JFCs

C'est exactement ce qu'on voit dans les simulations numériques.





Distribution des JFCs



Attention: l'inclinaison d'une comète tend à augmenter au cours du temps à cause des perturbations par Jupiter.

Ce fit a été obtenu en postulant que les comètes restent actives seulement ~ 500 orbites



La population du disque dispersé

Pour maintenir la population observée des comètes de la famille de Jupiter (3-5 objets avec $D > 10$ km) en état stationnaire, le modèle requière qu'il y ait **$4 - 6 \times 10^7$ objets de $D > 10$ km dans le disque dispersé** (Nesvorny et al., 2017)

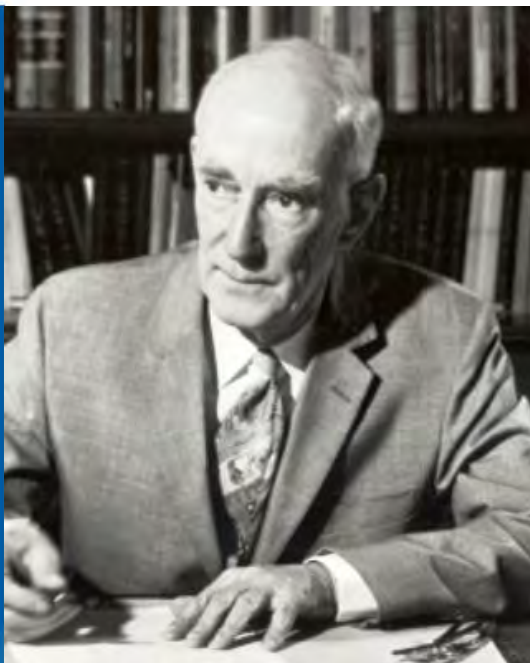
A comparer avec les valeurs observées pour:

- La ceinture des astéroïdes: 5×10^3 objets de $D > 10$ km
 - La population trans-Neptunienne chaude: 5×10^6 objets de $D > 10$ km
 - La population trans-Neptunienne froide: 2×10^6 objets de $D > 10$ km
- } Fraser et al., 2014;
Morbidelli et al., 2021

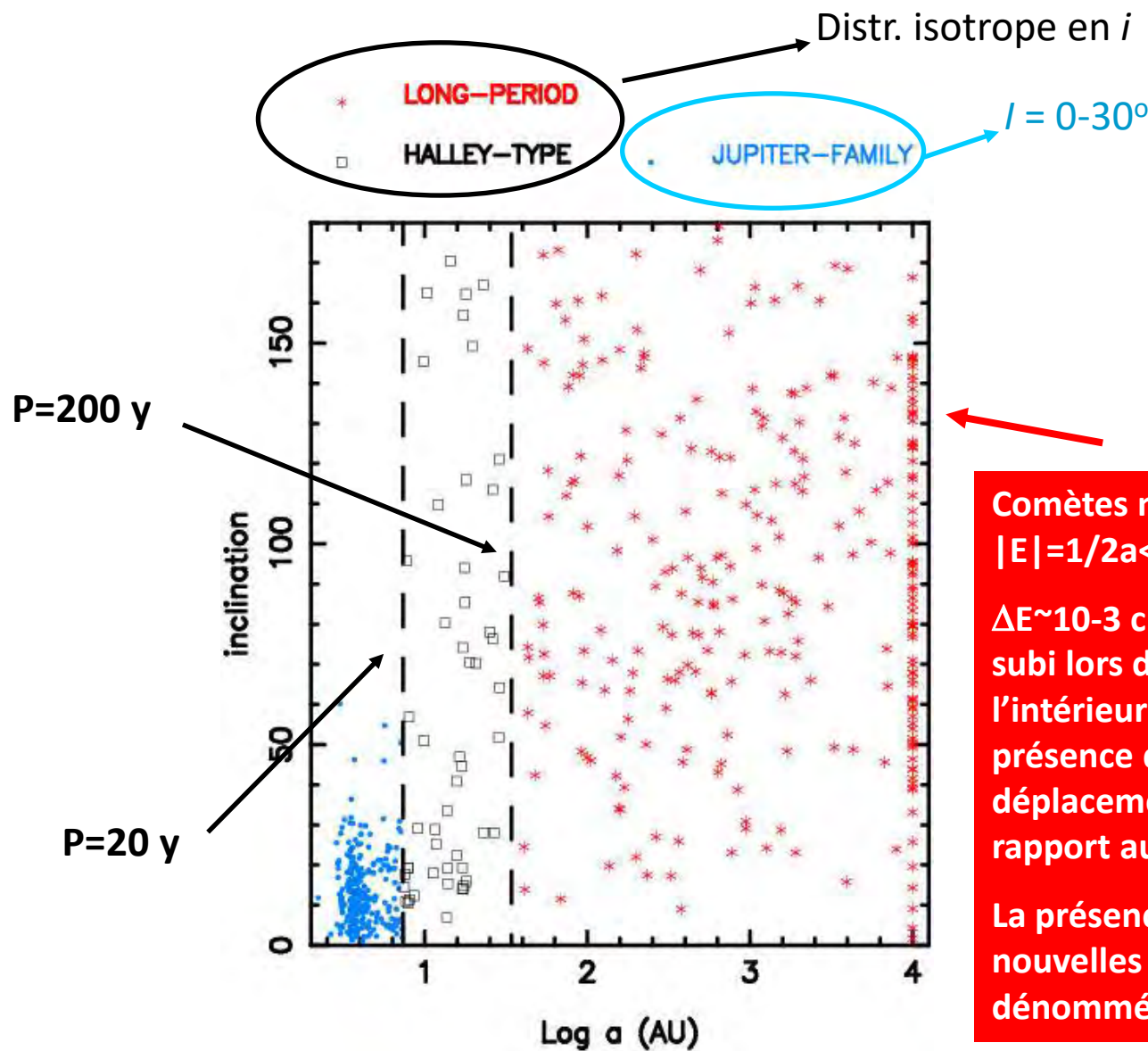
Le disque dispersé est donc de loin la population la plus peuplée



La classification des comètes



Jan Oort (1950)



Comètes nouvelles: leur énergie $|E|=1/2a<\Delta E$.

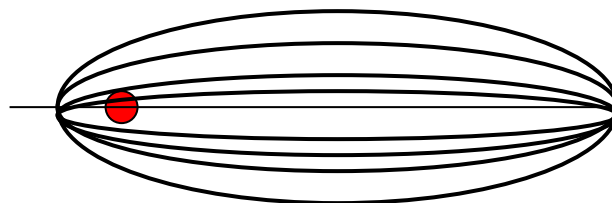
$\Delta E \sim 10^{-3}$ changement d'énergie subi lors de la pénétration à l'intérieur de ~ 10 AU par la présence de Jupiter/Saturne et le déplacement du Soleil par rapport au barycentre commun.

La présence de ces comètes nouvelles révèle un réservoir, dénommé le nuage de Oort.



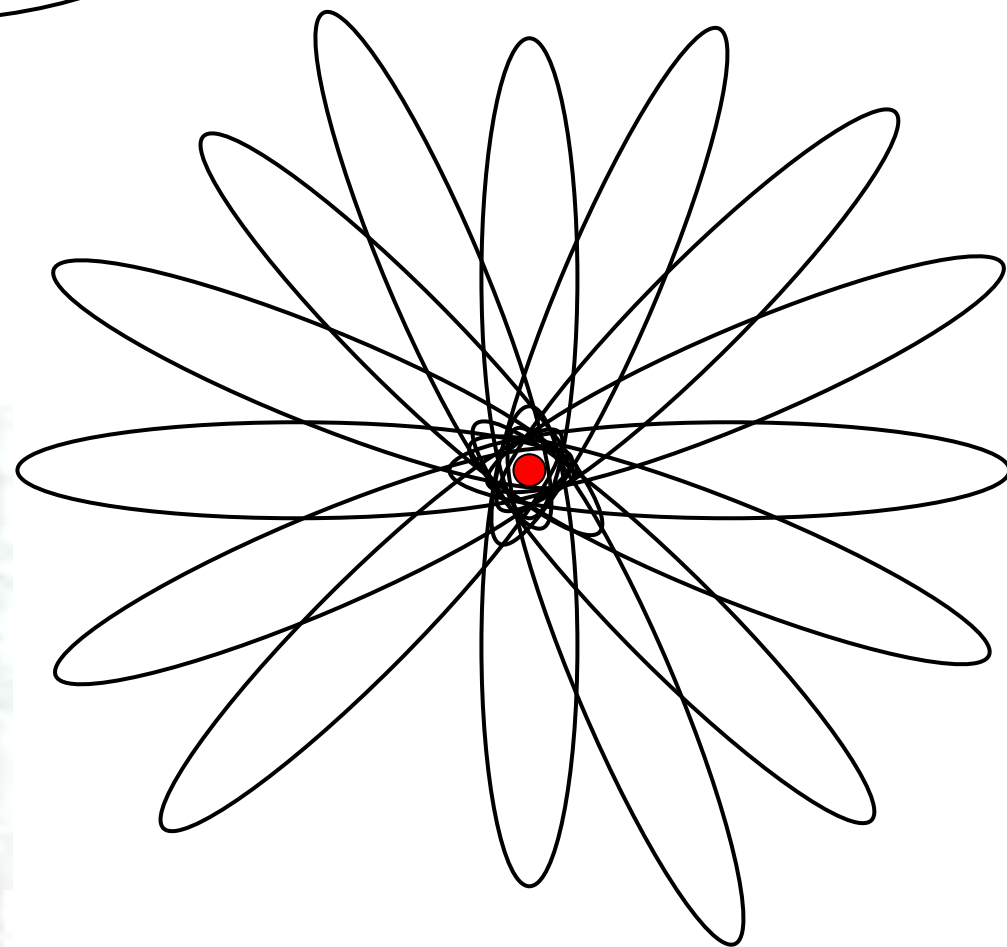
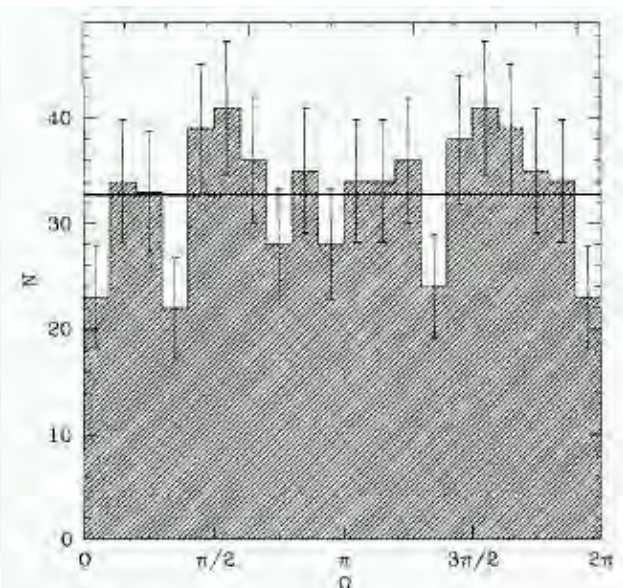
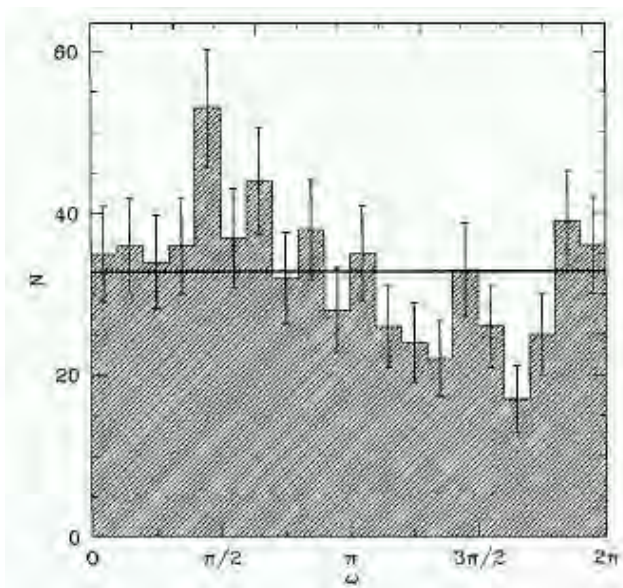
Structure du nuage de Oort

La distribution isotrope en inclinaisons ne démontre pas à elle seule une structure en nuage:



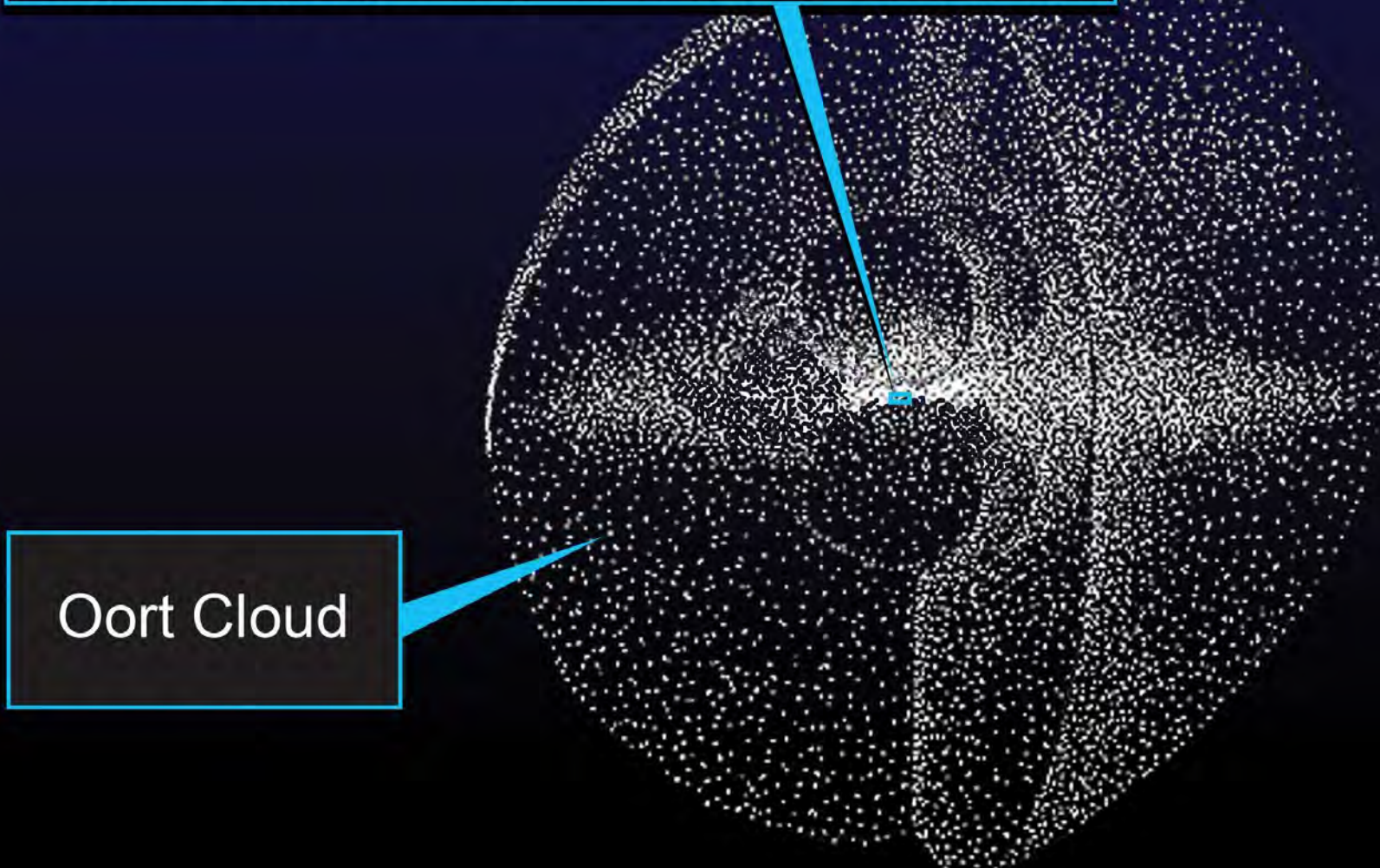
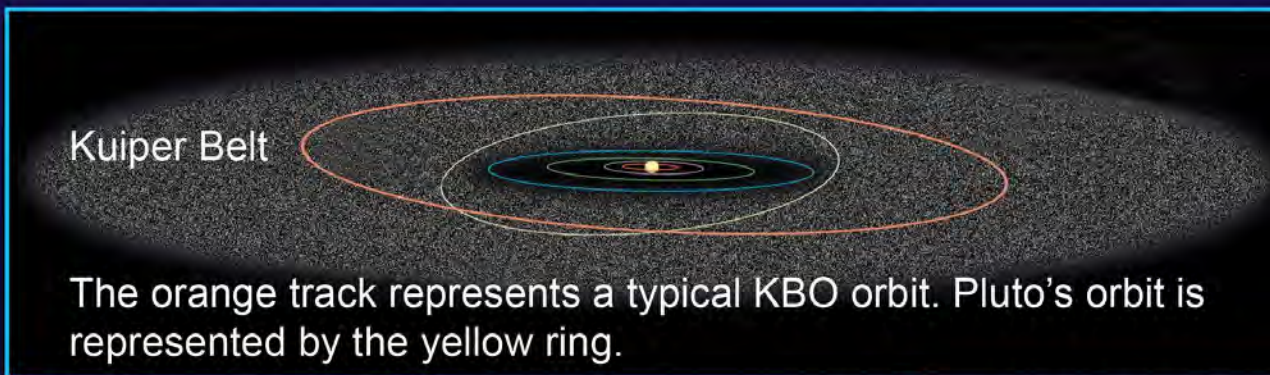
i isotrope, même ω , Ω

Ce sont les distributions isotropes de ω et Ω qui démontrent la structure sphérique du nuage





La frontière du Système solaire

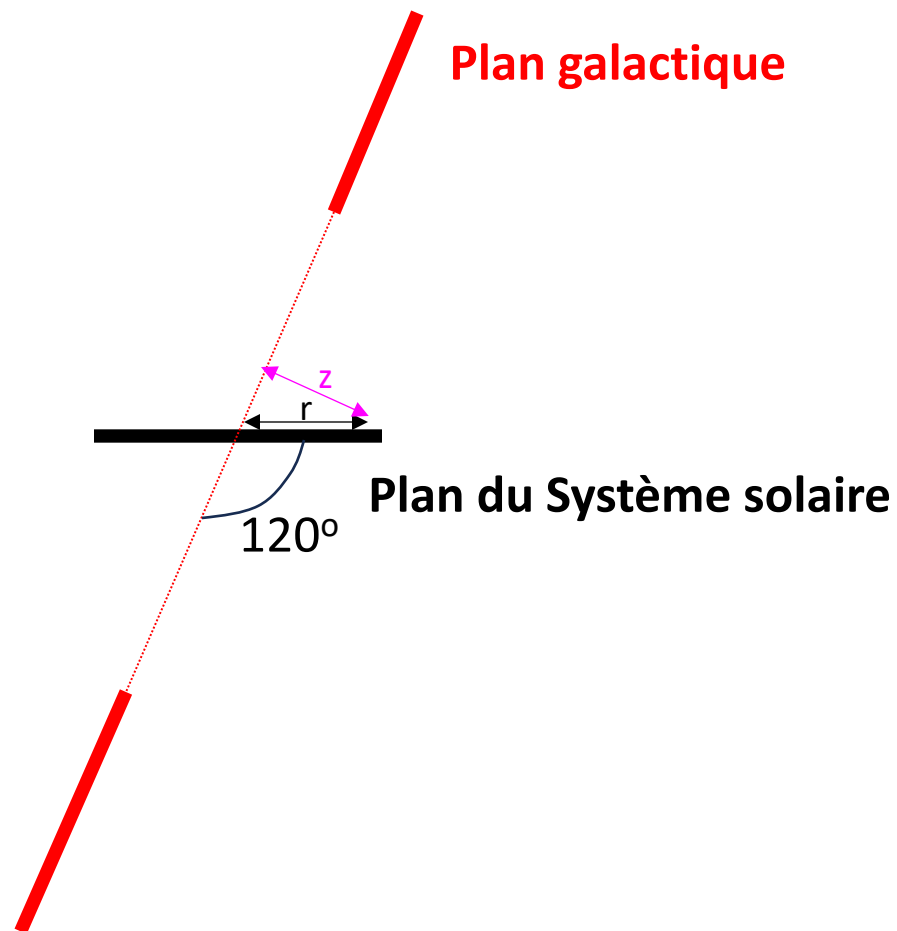


Oort Cloud



Transfert des comètes depuis le Nuage de Oort

Le Système solaire est immergé dans la distribution de masse de la galaxie, dont le plan de symétrie est incliné de 120 degrés par rapport au plan du Système solaire.



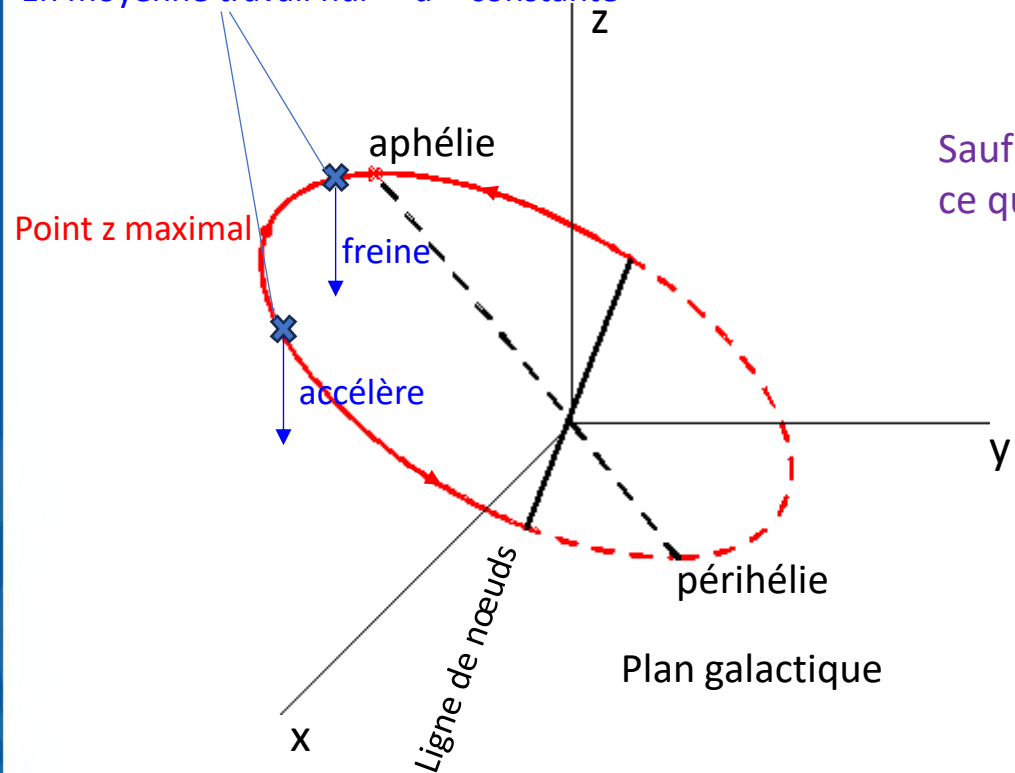
En supposant le Soleil sur le plan galactique, un objet à une distance r du Soleil aura donc une distance z par rapport au plan galactique et donc subira une force $F_z = 4\pi G\rho_0 z$ ou ρ_0 est la densité locale de la galaxie.

Si z_0 est la distance du Soleil du plan galactique et $dz = z - z_0$, la *difference* entre les forces subies par l'objet et le Soleil (marée galactique) est $dF_z = 4\pi G\rho_0 dz$



Mouvements couplés e, i, ω

Points ayant la même hauteur z
 Même force F_z , même $|v_z|$
 En moyenne travail nul $\rightarrow a = \text{constante}$

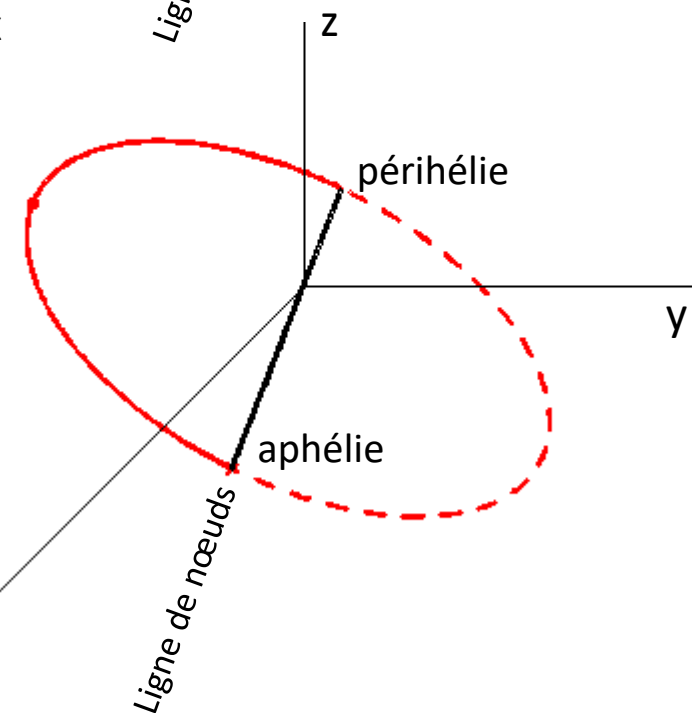
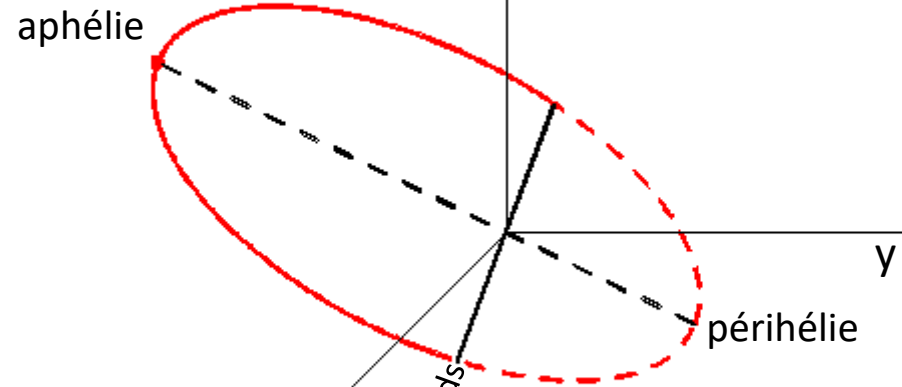


Même forces, mais une différente géométrie
 car à des distances différentes de l'aphélie
 \rightarrow changement net de la composante du
 moment cinétique orthogonale à l'orbite

Sauf s'il y a symétrie parfaite
 ce qui est le cas si:

$$\omega = \pi/2, 3/2 \pi$$

$$\omega = 0, \pi$$



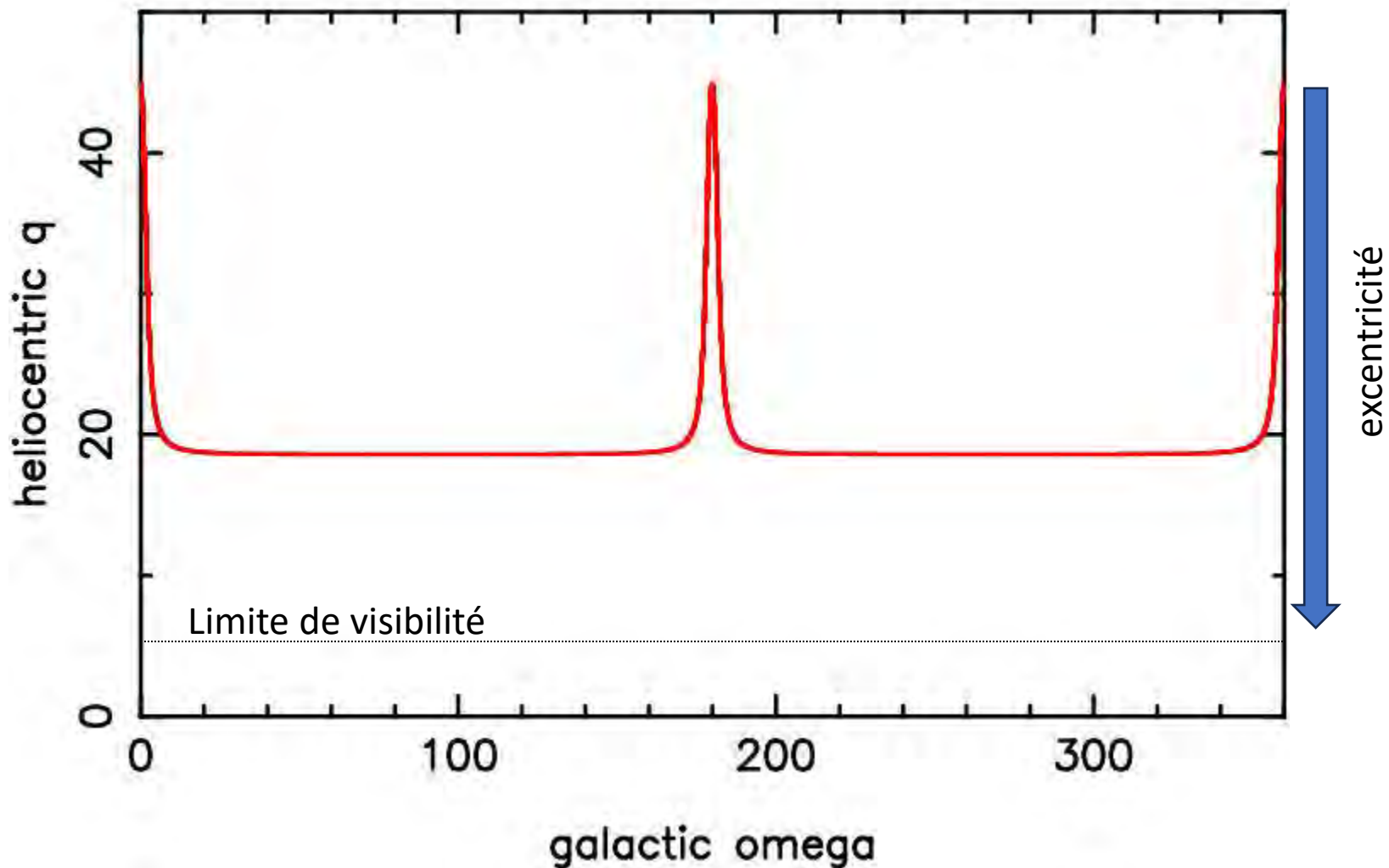
Moment cinétique $G = \sqrt{a(1 - e^2)}$
 e change avec la precession de ω

La composante z du moment cinétique
 $H = \sqrt{a(1 - e^2)} \cos i$ est constante car la
 force est verticale $\rightarrow e, i$ anti-corrélés



Transfert des comètes depuis le Nuage de Oort

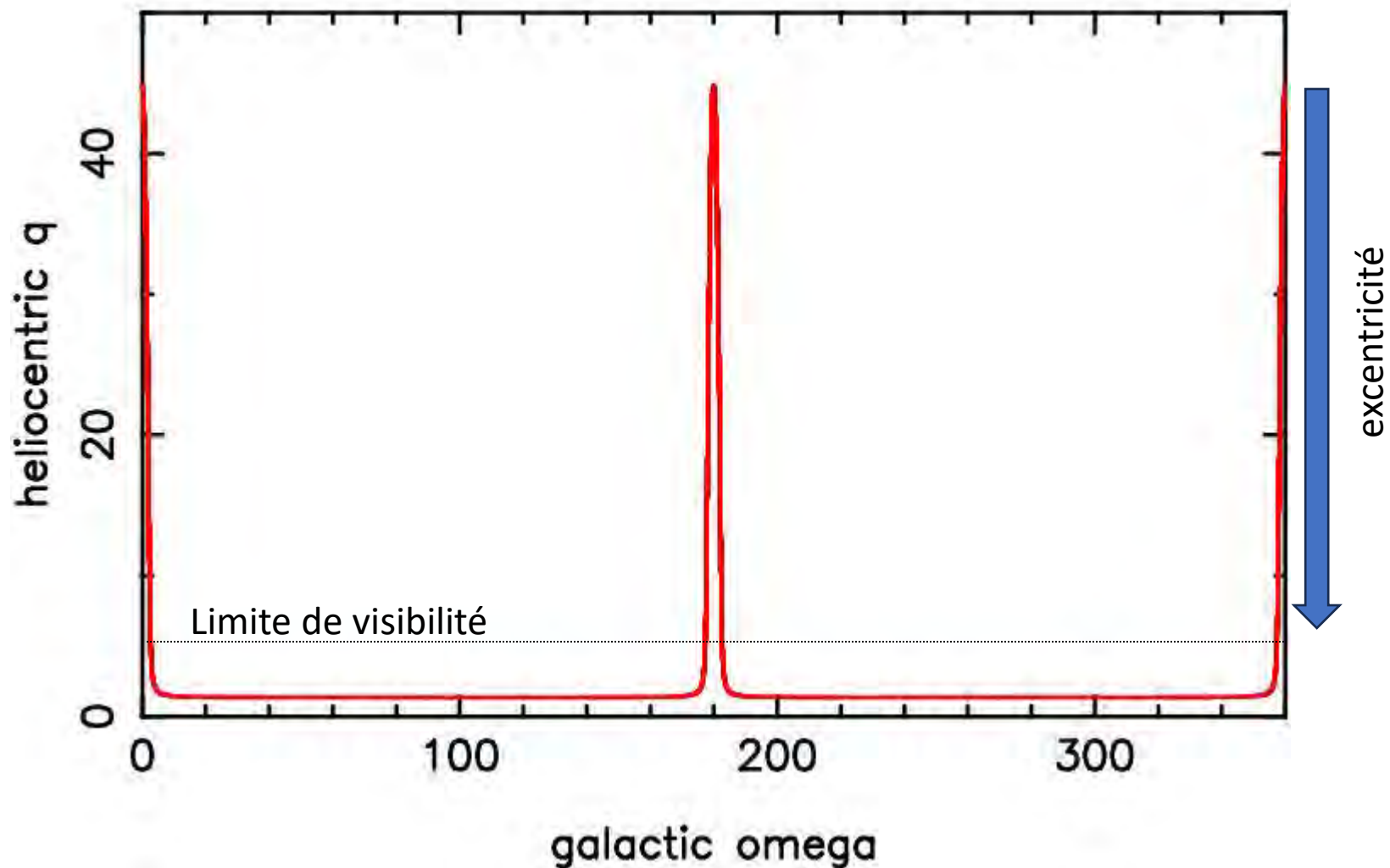
galactic inclination = 50





Transfert des comètes depuis le Nuage de Oort

galactic inclination = 80

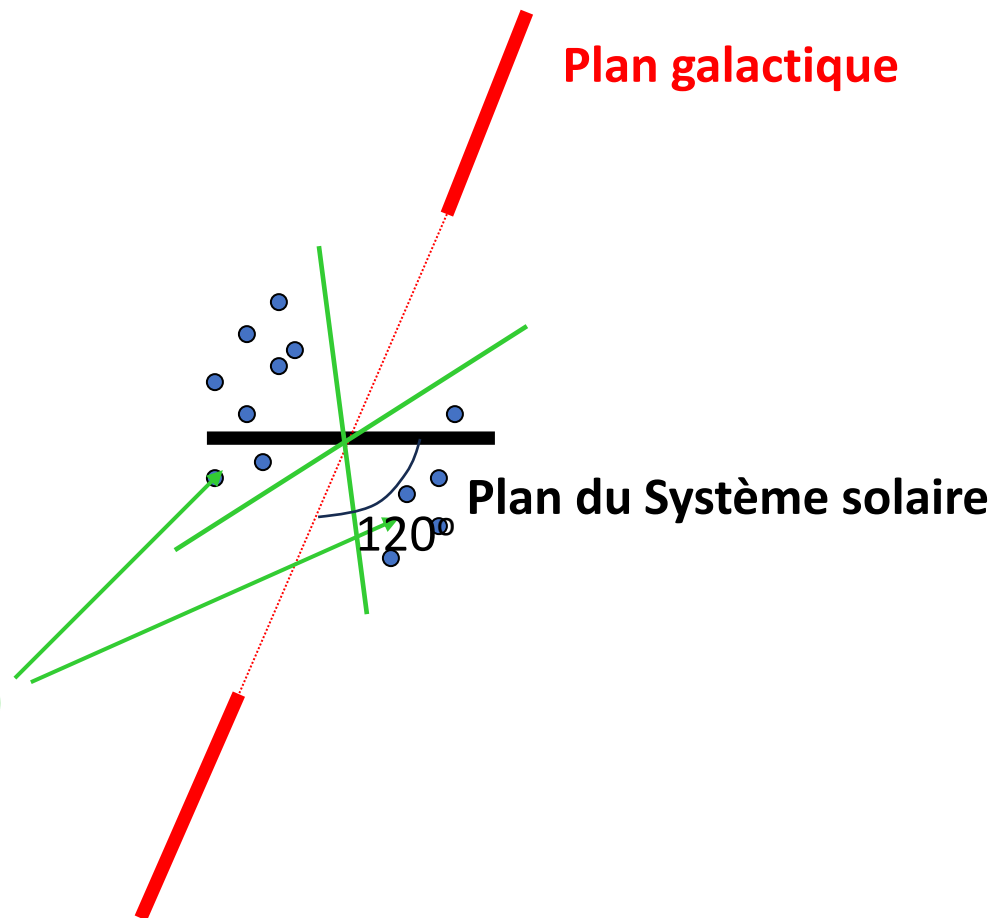




Transfert des comètes depuis le Nuage de Oort

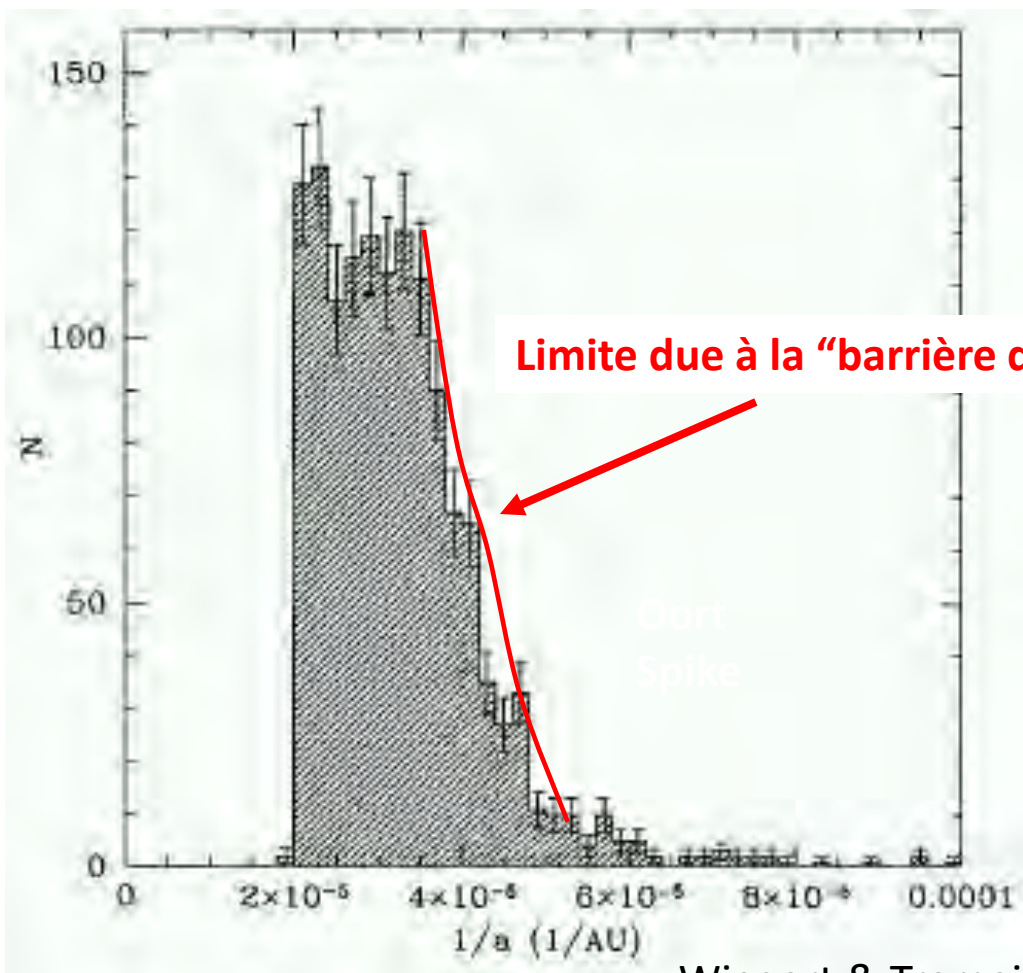
Région d'où peuvent provenir les comètes (haute inclinaison galactique)

Cette région doit être réalimentée par les autres zones du nuage de Oort par le passage d'étoiles.





Distribution d'énergie des comètes d'Oort à leur première apparition



Les nouvelles comètes doivent décroître leur q de >10 UA à < 3 UA en moins d'une période orbitale. Sinon, elles subissent l'influence de Jupiter et Saturne, ce qui change leur énergie de $\sim 10^{-3}$ avant qu'on puisse les voir. Pour ce faire, les comètes doivent avoir une orbite supérieure à $\sim 25\,000$ UA

$\sim 25\,000$ UA n'est pas le bord interne du nuage d'Oort: c'est le bord interne de la partie active, d'où les comètes peuvent provenir

Le flux observé des nouvelles comètes implique l'existence de 10^9 objets de $D \gtrsim 10$ km dans cette partie active (Brasser et Morbidelli, 2013) - à comparer avec $\sim 5 \times 10^7$ dans le disque dispersé

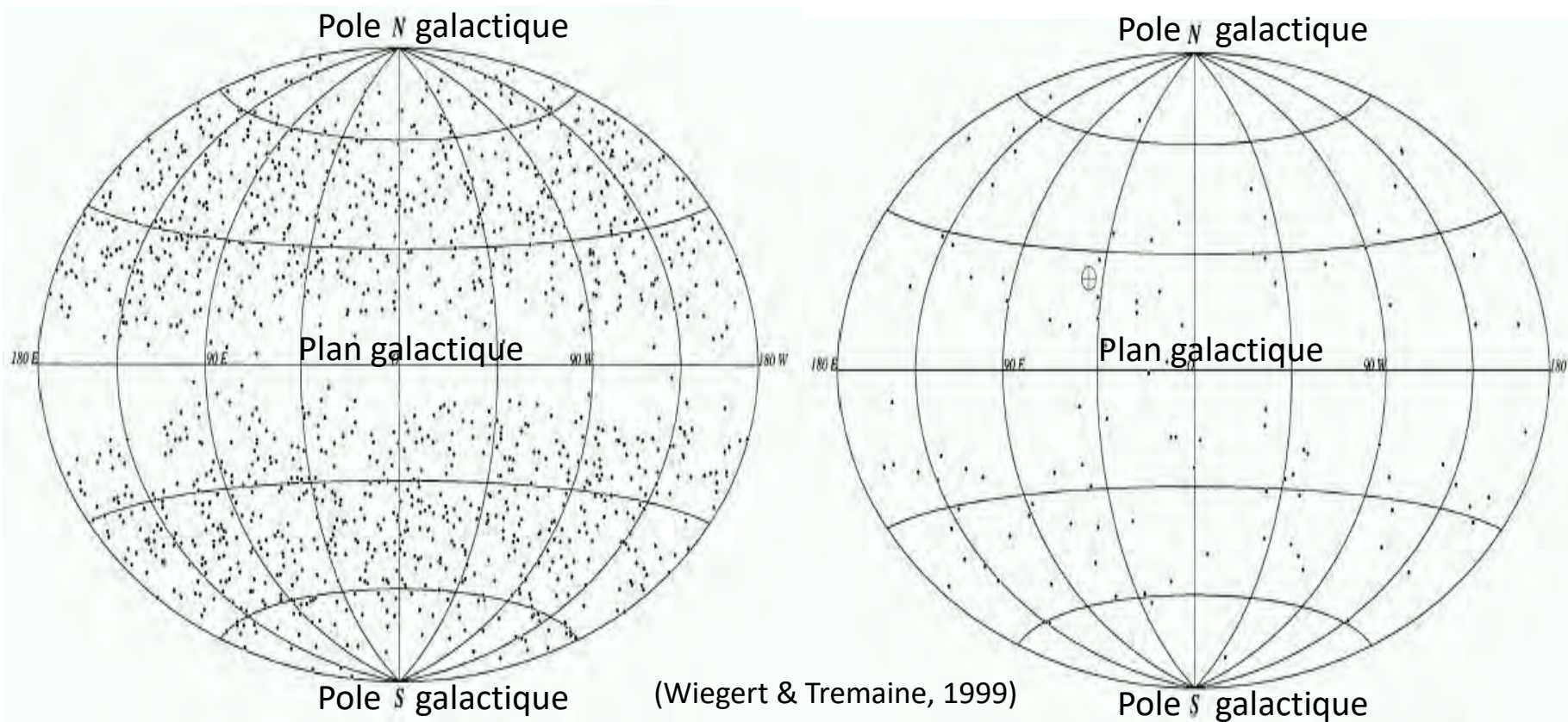
Wiegert & Tremaine, 1999



Distribution des périhélies des comètes d'Oort à leur première apparition

Simulé

Observé

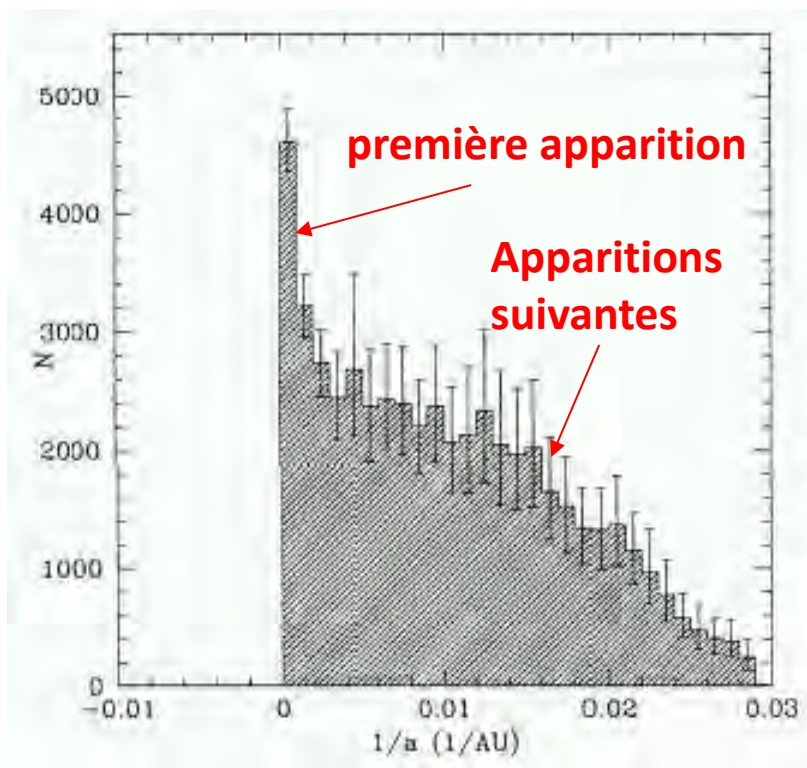


Le déficit de comètes près du plan galactique est moins prononcé dans les observations, ce qui suggère un rôle direct des passages d'étoiles dans l'injection des comètes d'Oort

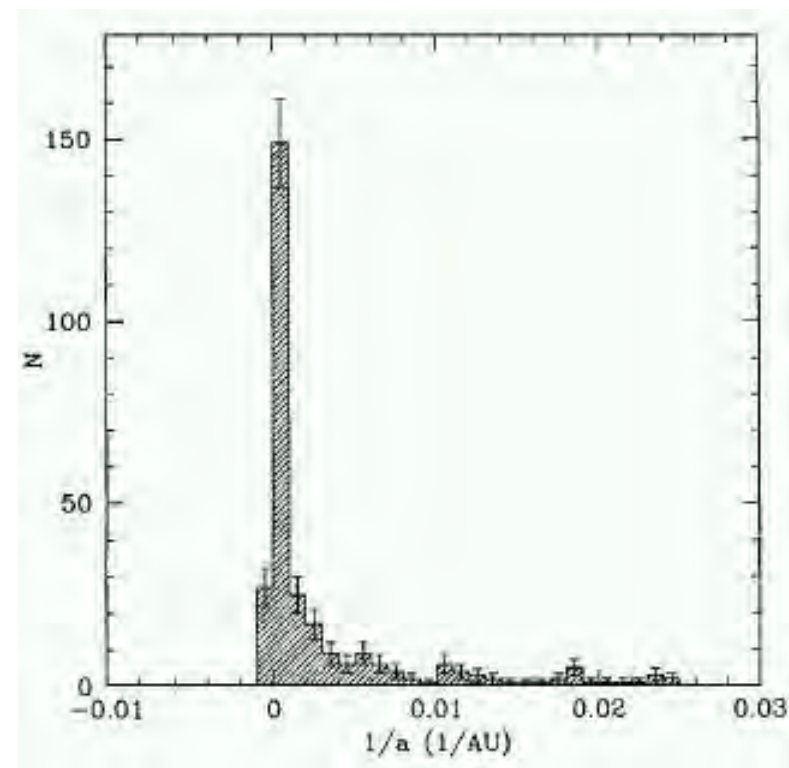


Distribution d'énergie des comètes d'Oort (à tout passage au perihélie)

Simulé



Observé

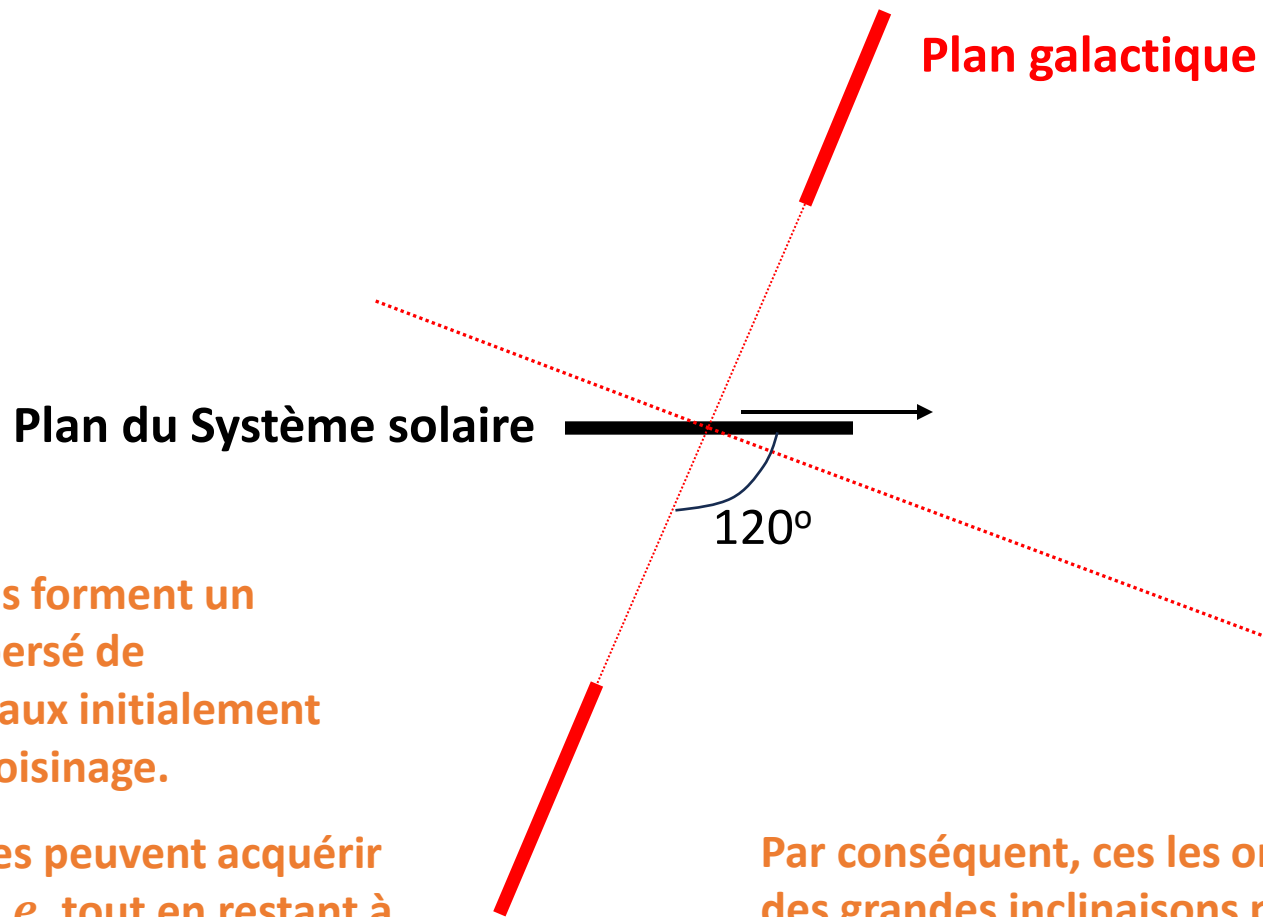


Wiegert & Tremaine, 1999

Pour expliquer ce désaccord il faut postuler que la plupart des comètes survivent seulement au premier passage (tout au plus quelques premiers passages), probablement à cause des stress thermiques



La formation du nuage de Oort



Les planètes forment un disque dispersé de planétésimaux initialement dans leur voisinage.

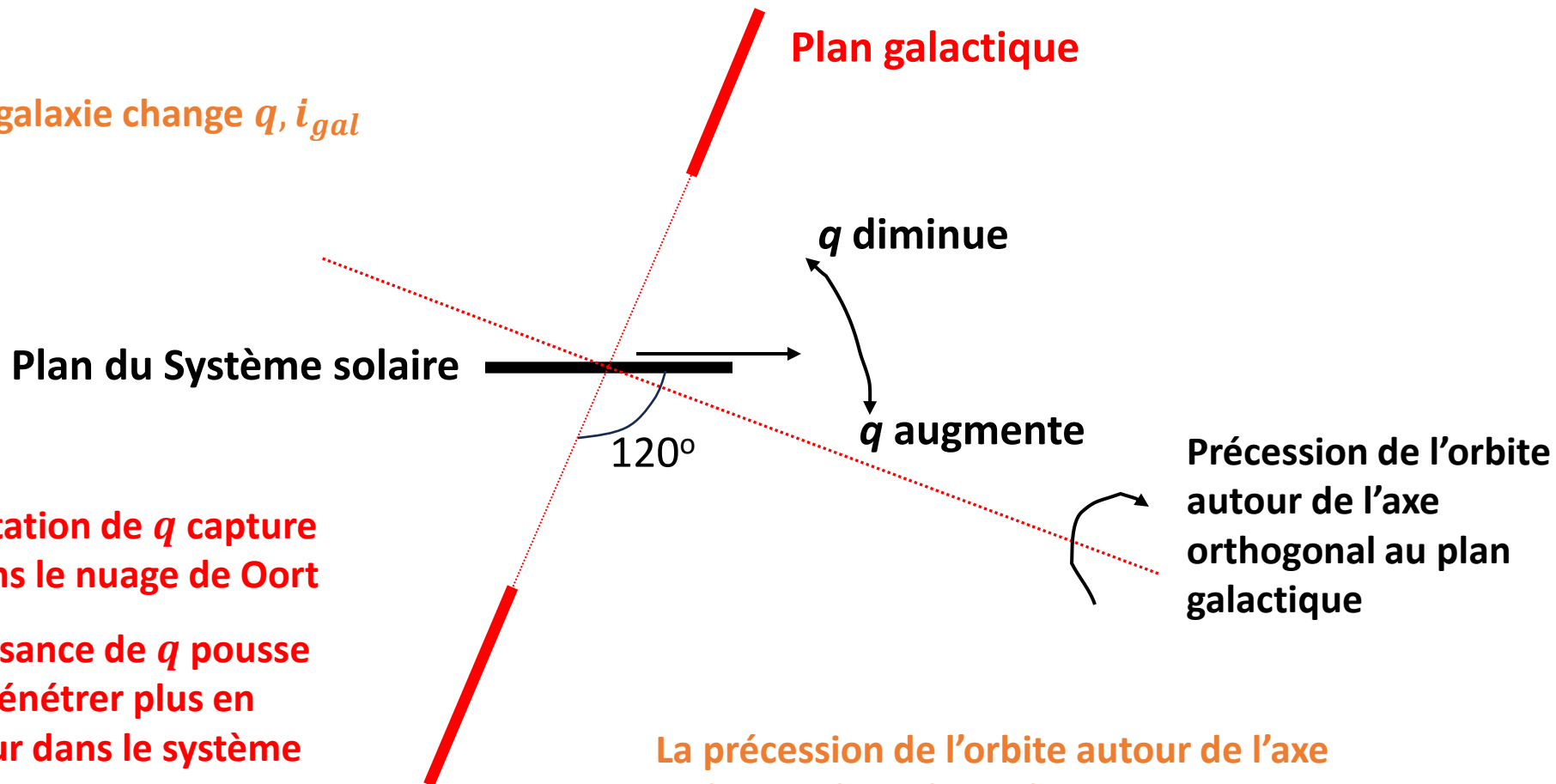
Leurs orbites peuvent acquérir grands a et e , tout en restant à inclinaison modérée par rapport au plan du Système solaire ($i \lesssim 30^\circ$)

Par conséquent, ces les orbites de ces planétésimaux ont des grandes inclinaisons par rapport au plan galactique



La formation du nuage de Oort

La marée galaxie change q, i_{gal}



L'augmentation de q capture l'objet dans le nuage de Oort

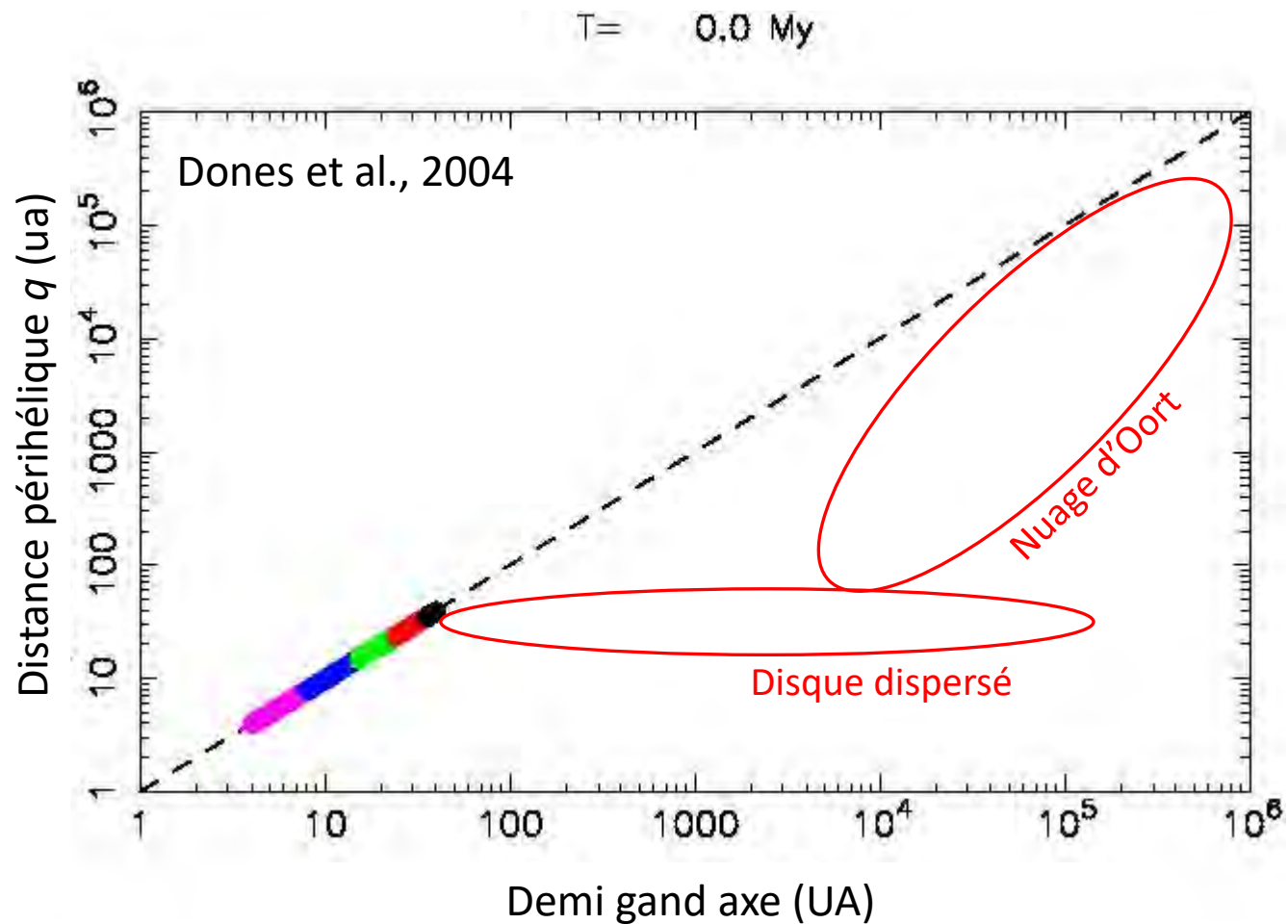
La décroissance de q pousse l'objet à pénétrer plus en profondeur dans le système solaire

La précession de l'orbite autour de l'axe orthogonal au plan galactique peut transformer une orbite prograde en une rétrograde par rapport au plan du Système solaire



La formation du nuage de Oort

- $a < 8$ AU
- $8 < a < 15$ AU
- $15 < a < 24$ AU
- $24 < a < 35$ AU
- $35 < a < 40$ AU

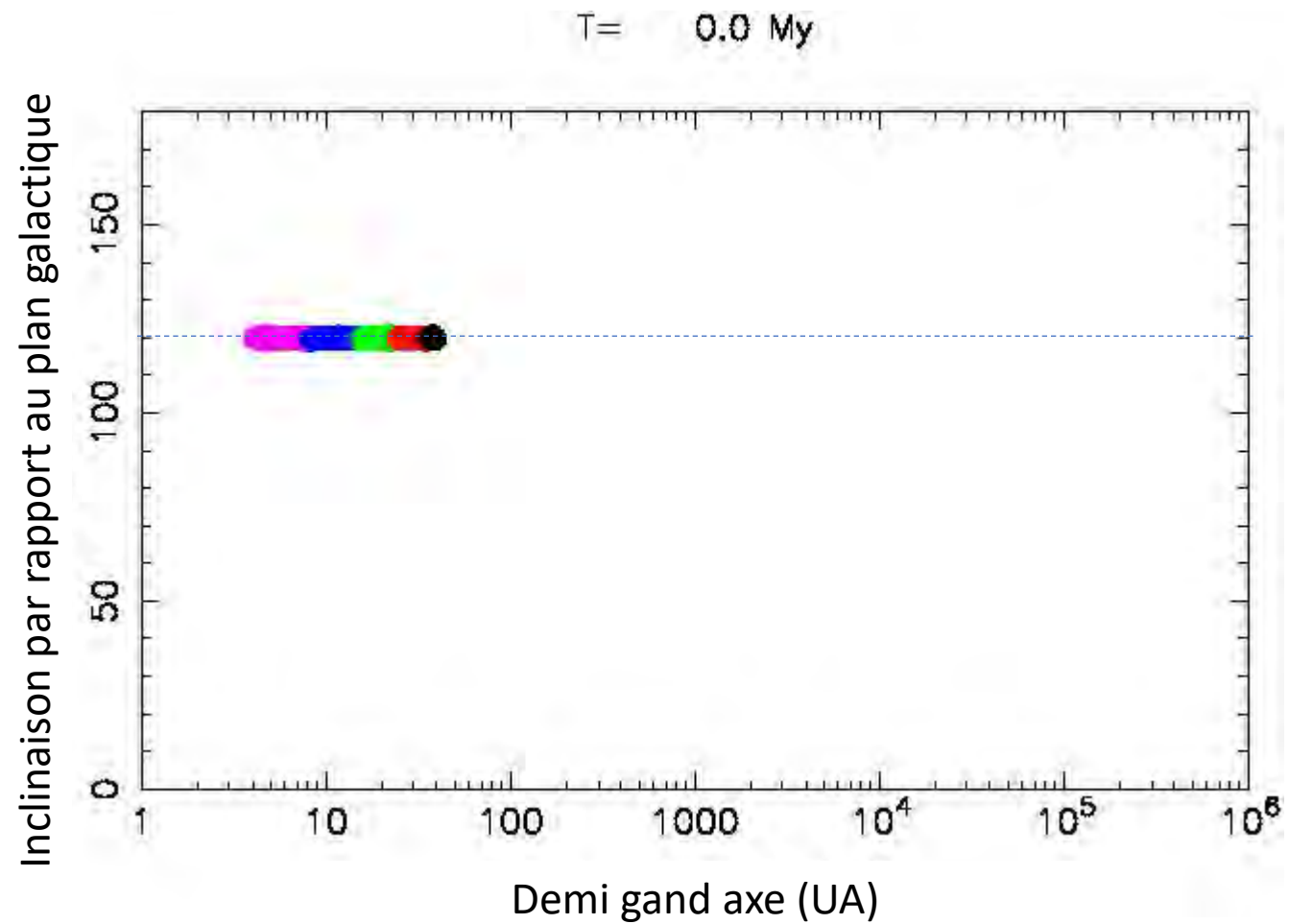


Le nuage d'Oort est donc l'extension du disque dispersé aux distances où la marée galactique devient importante



La formation du nuage de Oort

- $a < 8$ AU
- $8 < a < 15$ AU
- $15 < a < 24$ AU
- $24 < a < 35$ AU
- $35 < a < 40$ AU



Dones et al., 2004



Une neuvième planète dans le Système solaire?



La première alerte

Alignement des valeurs de ω autour de ~ 0 , pour les orbites des objets avec $a > 150$ au.

Que est ce que pourrait en être la cause?

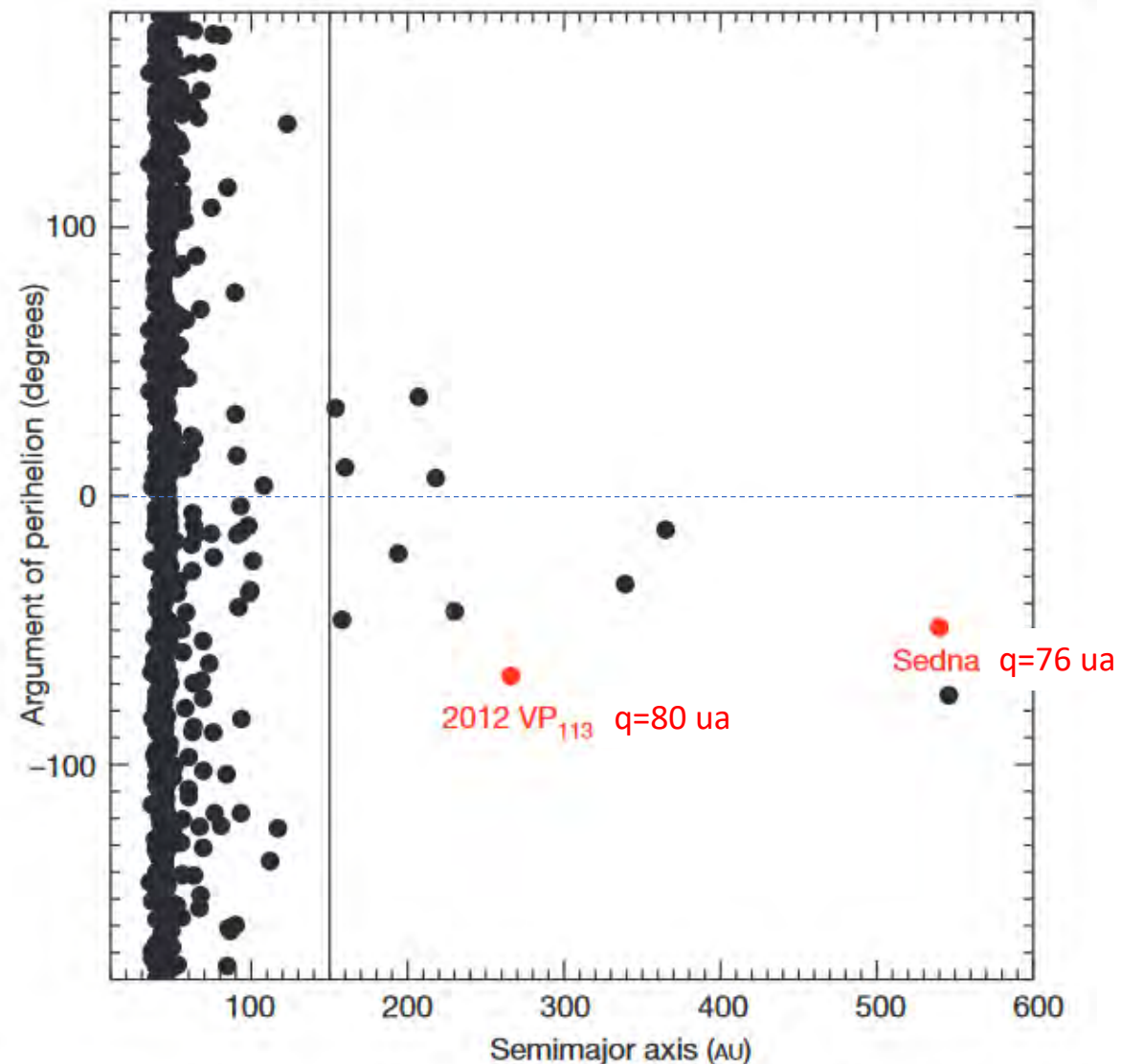
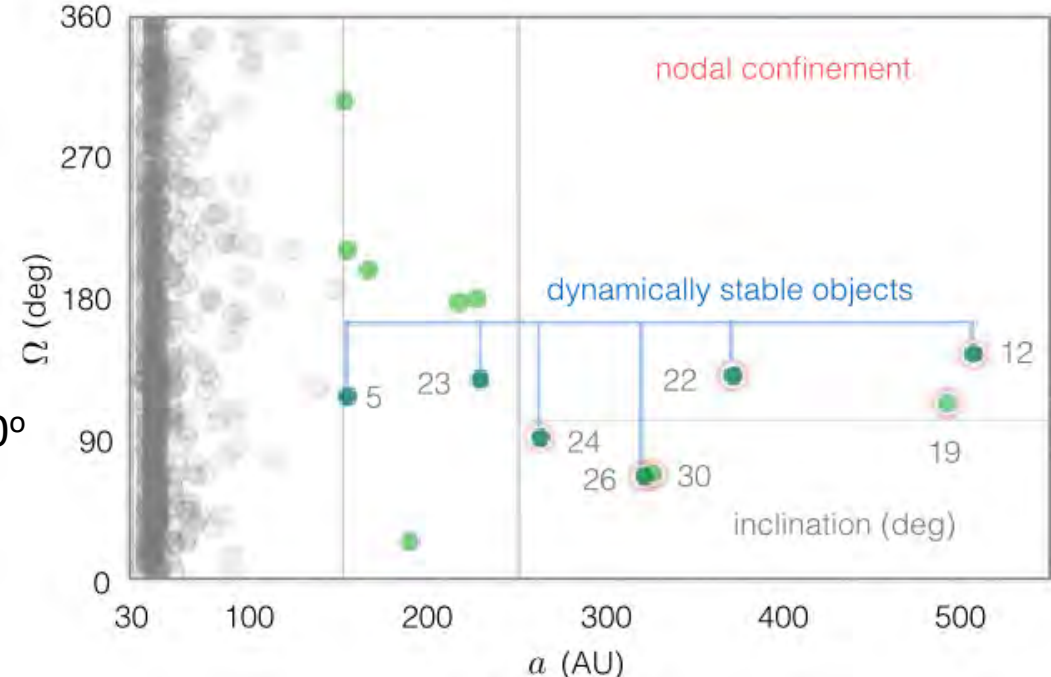
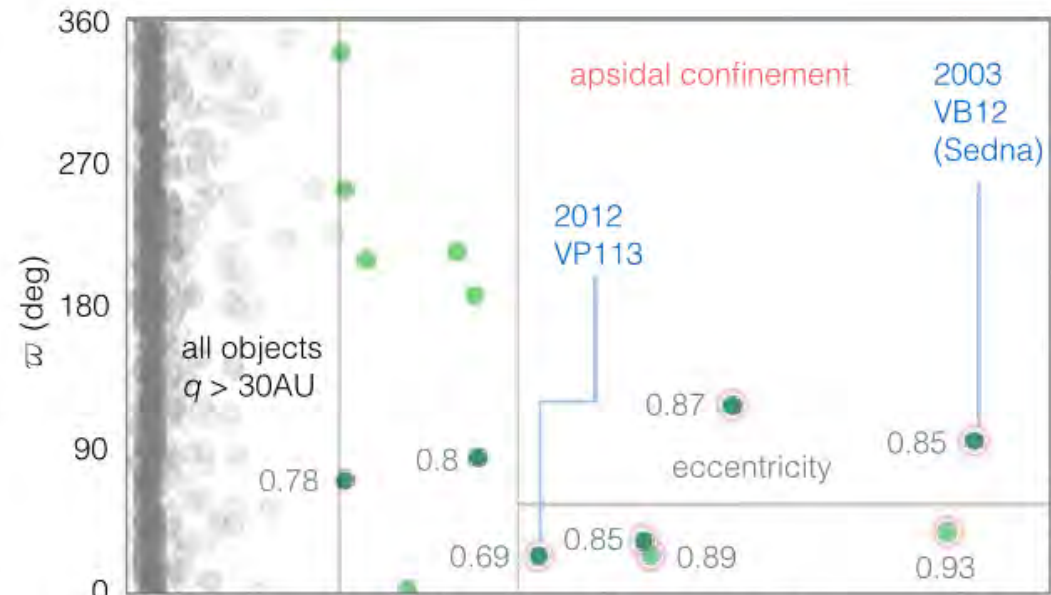
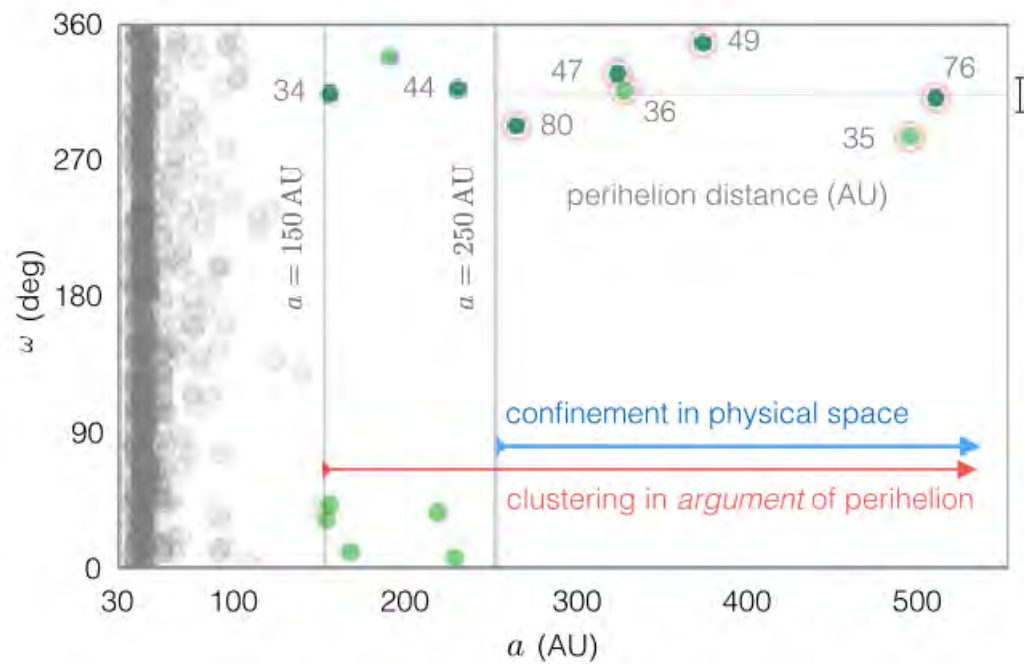


Figure 3 | The argument of perihelion for distant objects clusters about 0° . All minor planets with perihelion greater than 30 AU as a function of semi-major axis are shown. All bodies with semi-major axis greater than the line at 150 AU show a pronounced concentration near $\omega \approx 0^\circ$. Errors on these orbital elements are much smaller than the plotted symbols. This figure appears in histogram form in Extended Data Fig. 1.

Sheppard et Trujillo, Nature, 2014



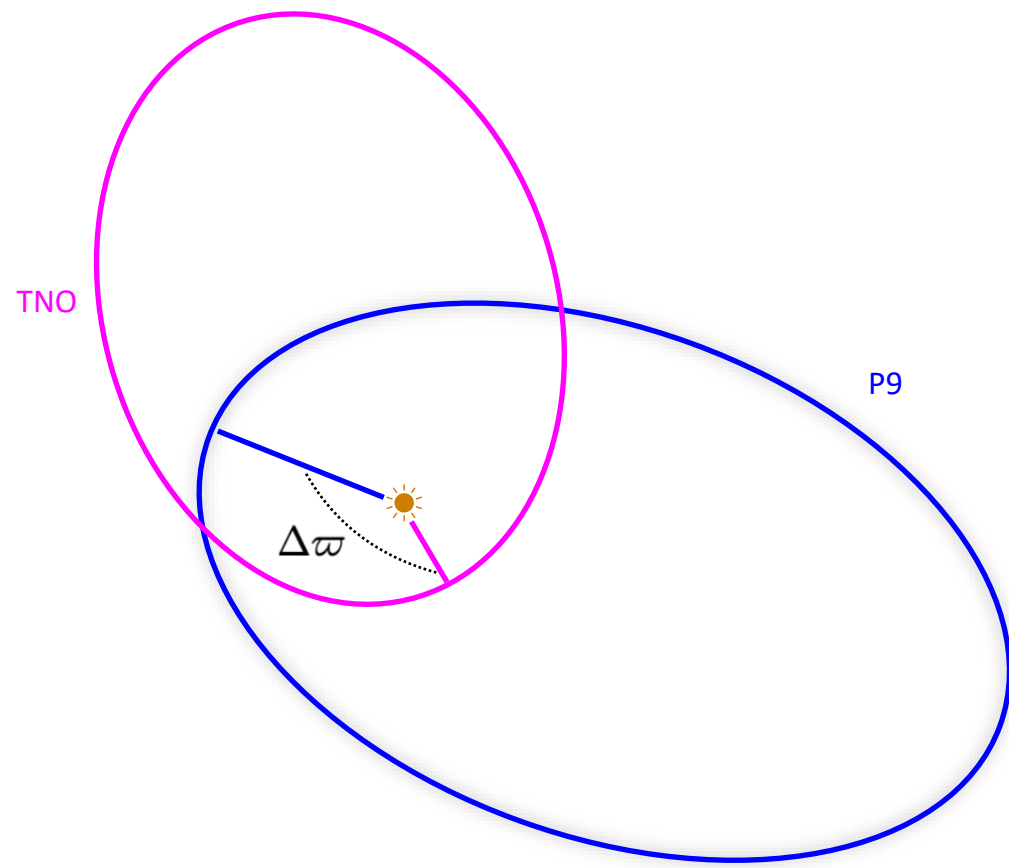
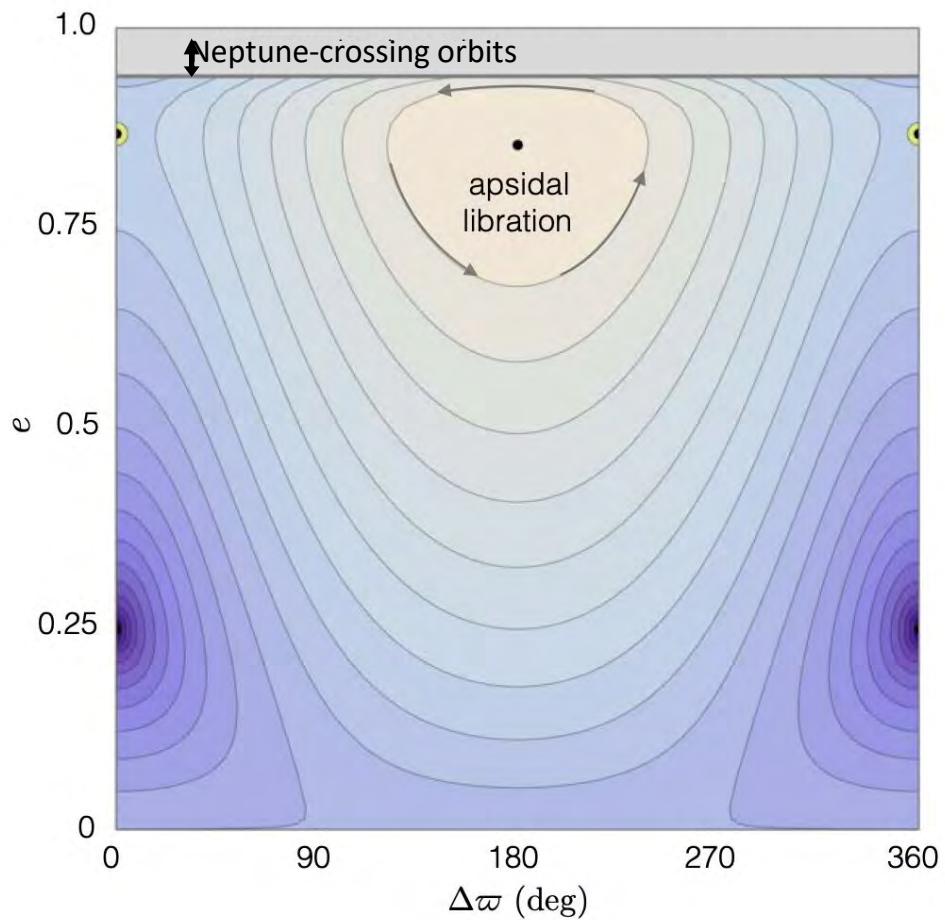
Plus d'indices



Batygin et Brown, 2016: l'alignement de ω est apparent. Il est dû à l'alignement de ϖ et de Ω autour de $\sim 70^\circ$ et $\sim 100^\circ$ (rappel: $\omega = \varpi - \Omega$).
 Seulement les objets avec $a > 250$ au semblent alignés (6 en tout)

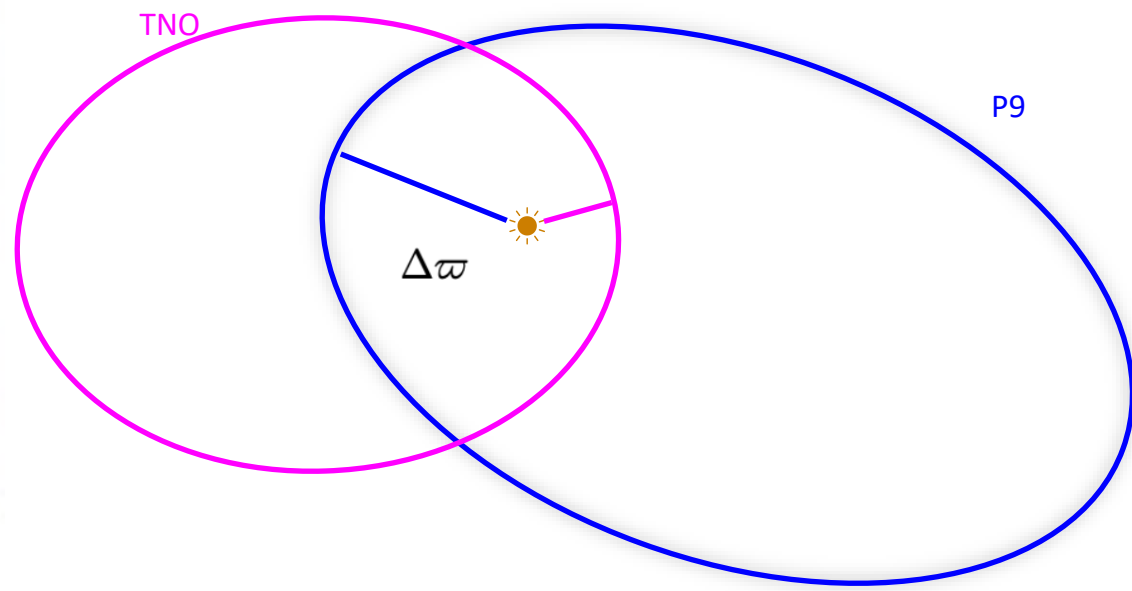
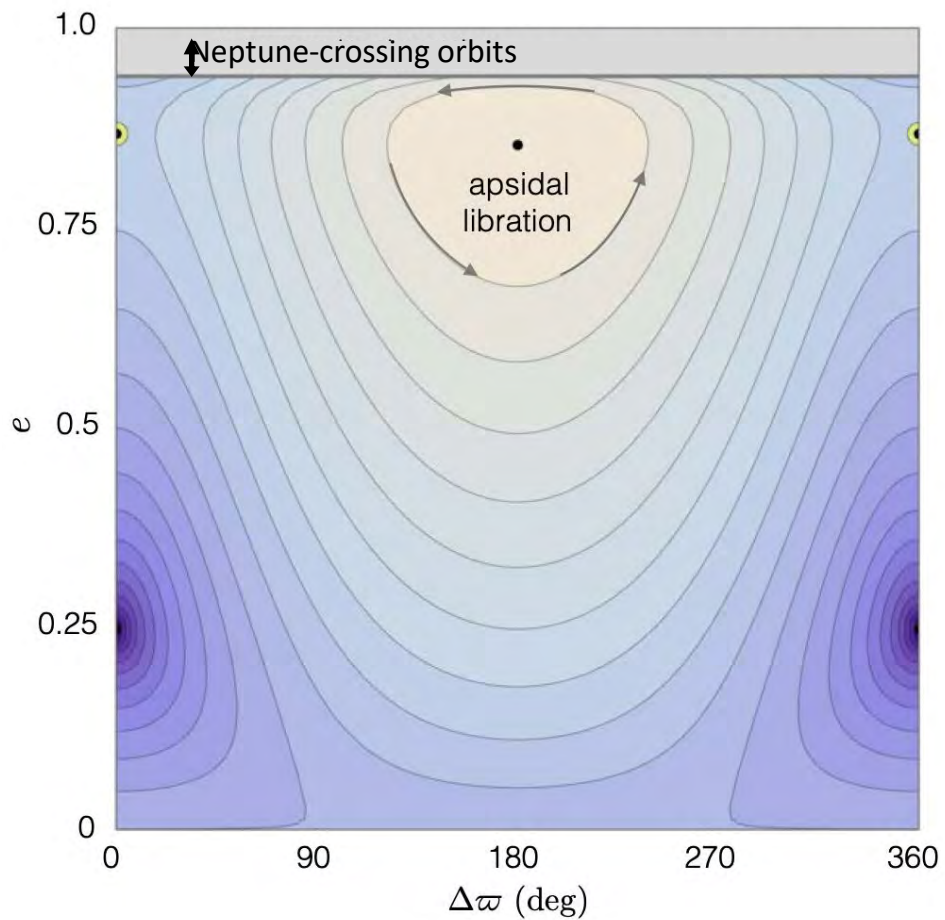


Ces alignements de ϖ et Ω peuvent être expliqués par une planète lointaine, sur orbite excentrique et inclinée



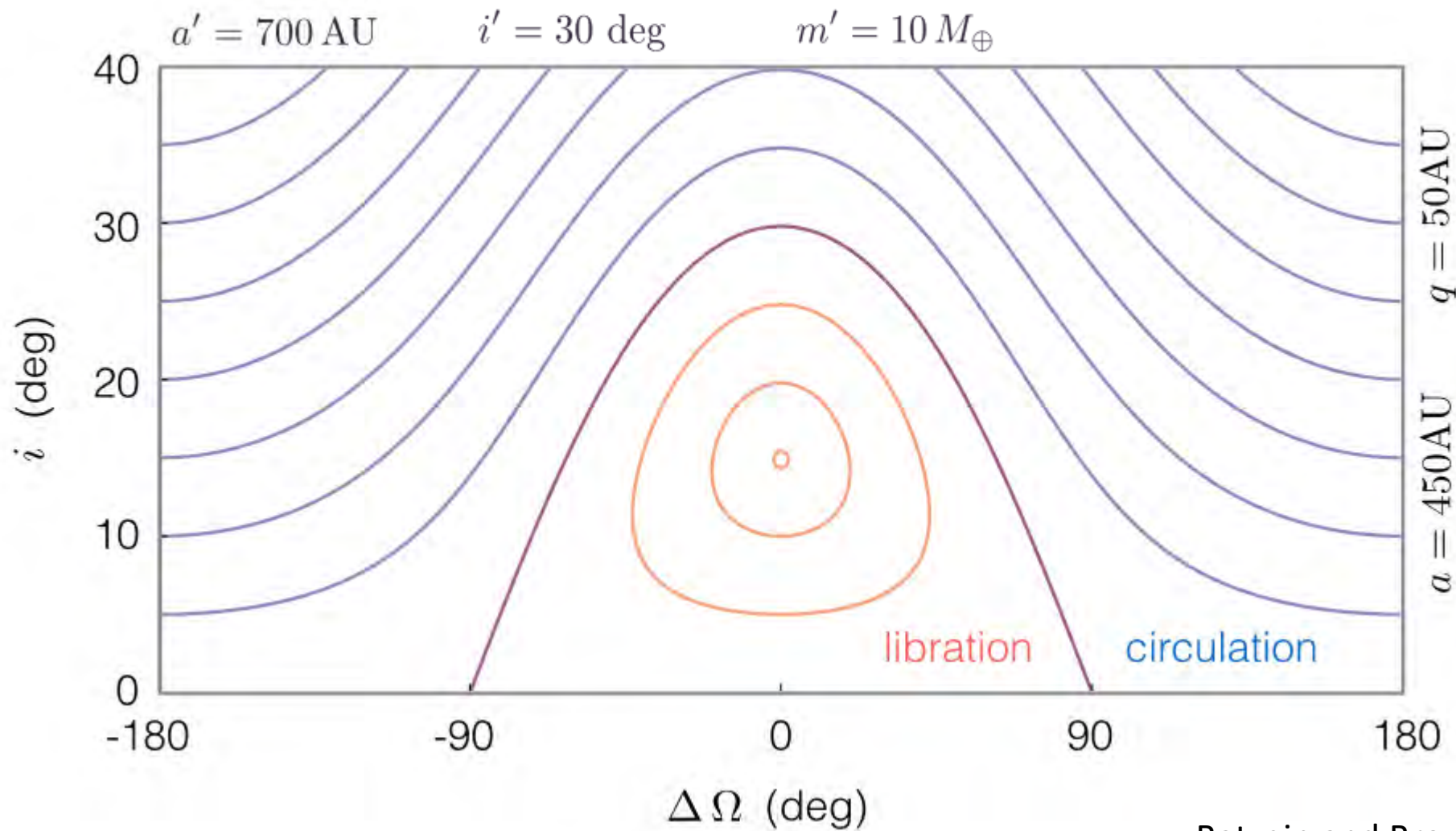


Ces alignements de ϖ et Ω peuvent être expliqués par une planète lointaine, sur orbite excentrique et inclinée





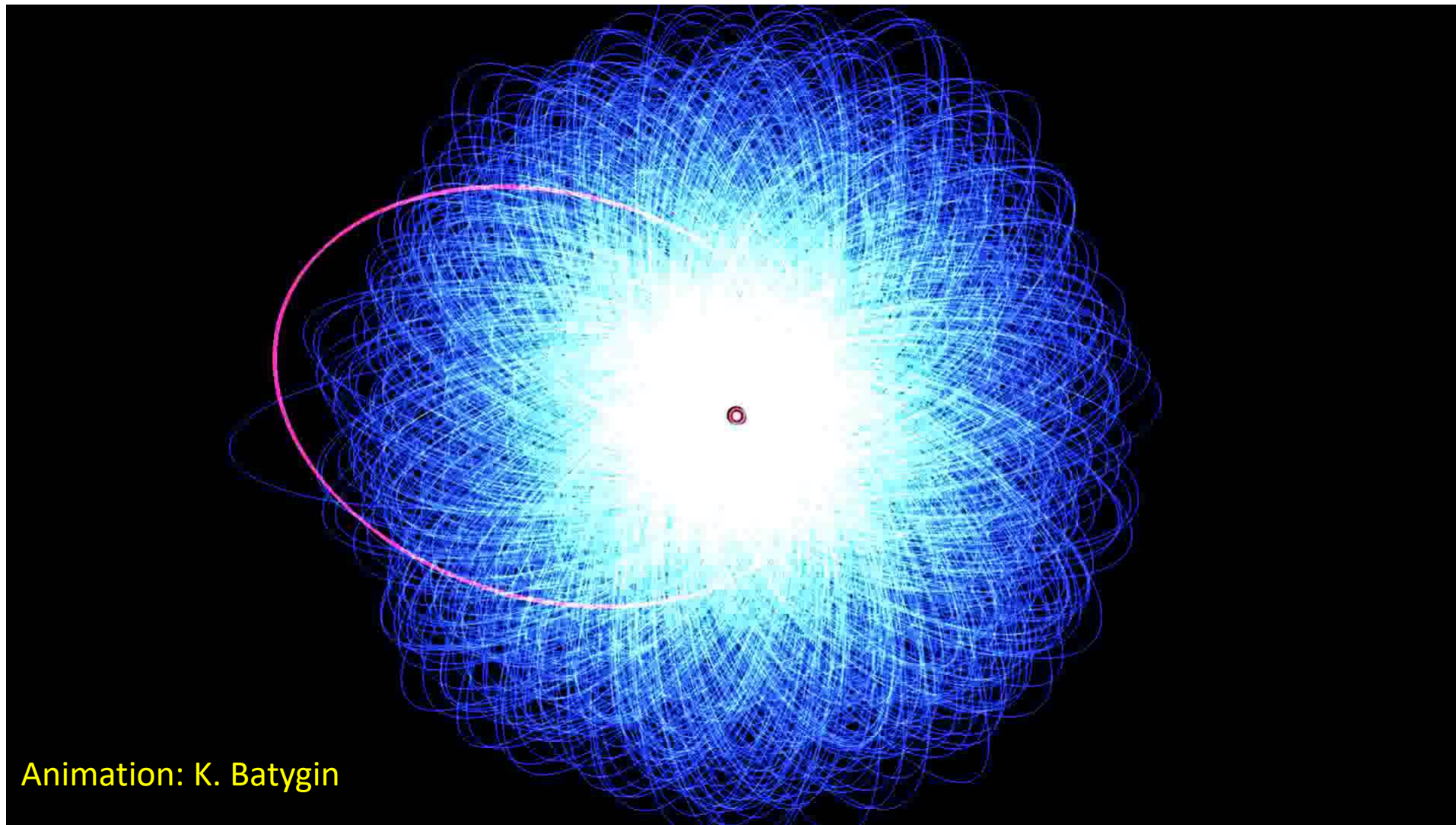
Ces alignements de ϖ et Ω peuvent être expliqués par une planète lointaine, sur orbite excentrique et inclinée



Batygin and Brown, 2016



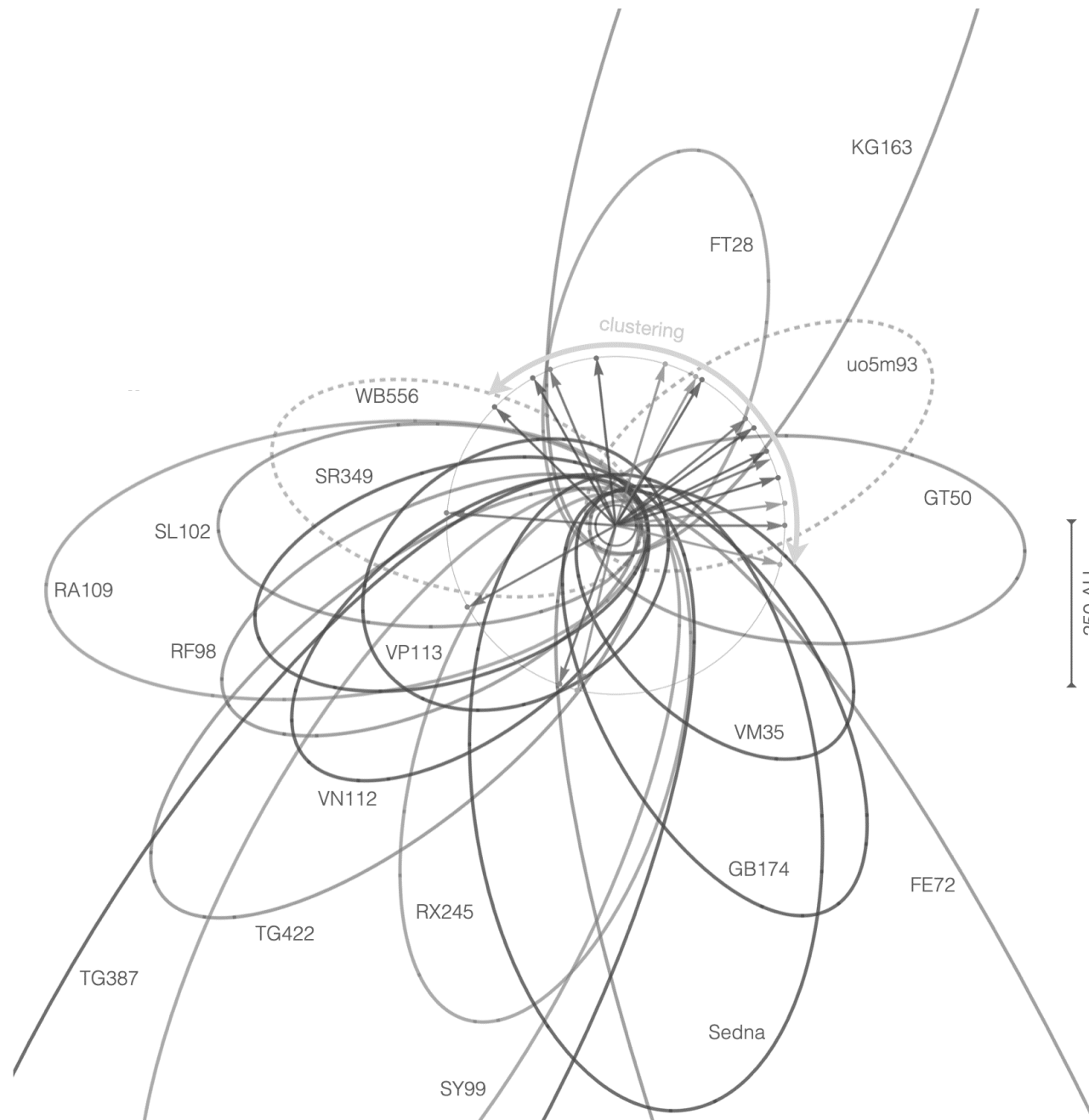
La présence d'une telle planète sélectionne les objets du disque dispersé en préservant ceux avec $\varpi - \varpi_p \sim \pi$ et $\Omega - \Omega_p \sim 0$



Animation: K. Batygin



Est l'alignement orbital réel?

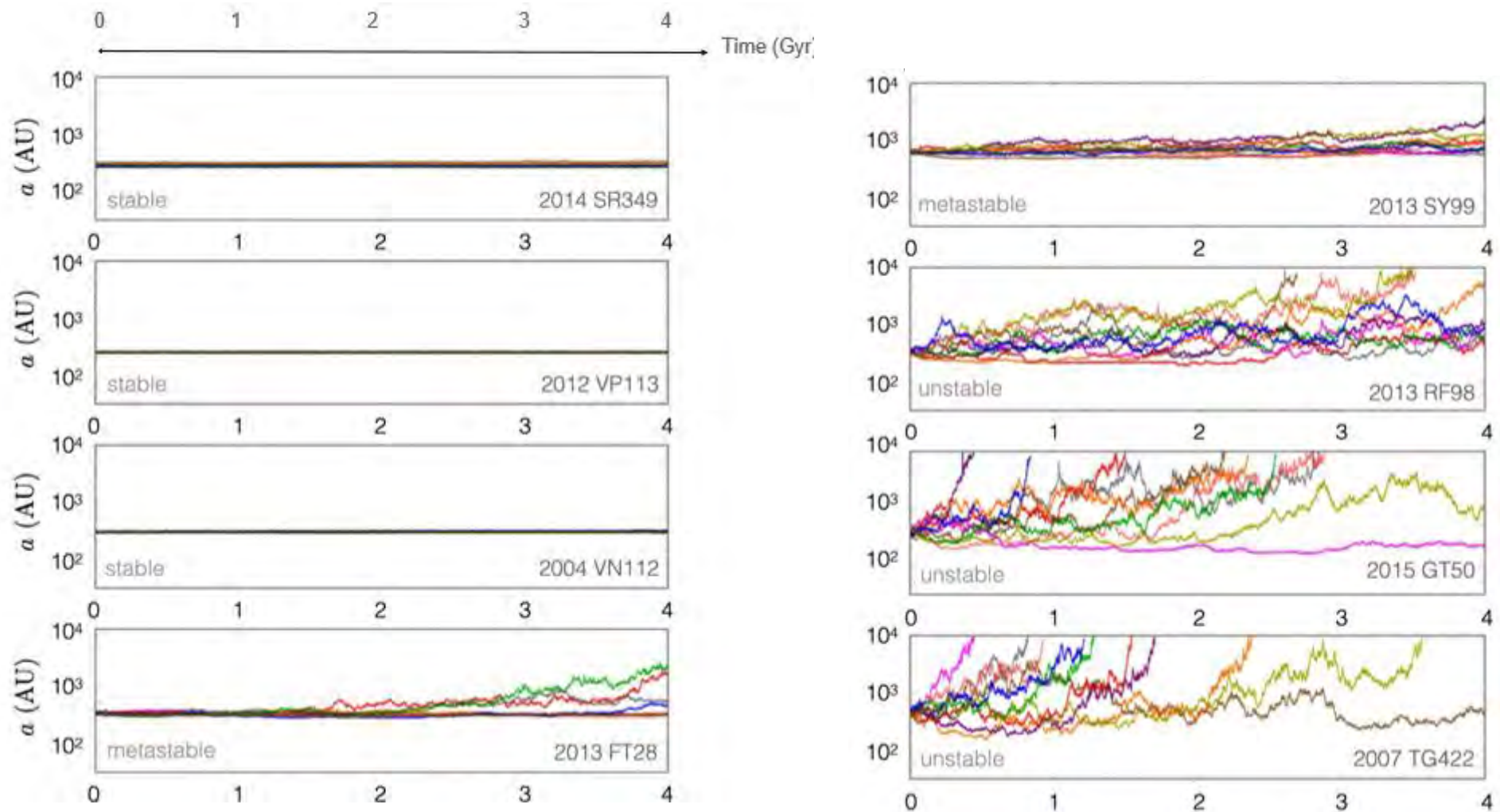


Avec la découverte de plus d'objets, l'alignement orbital semble disparaître



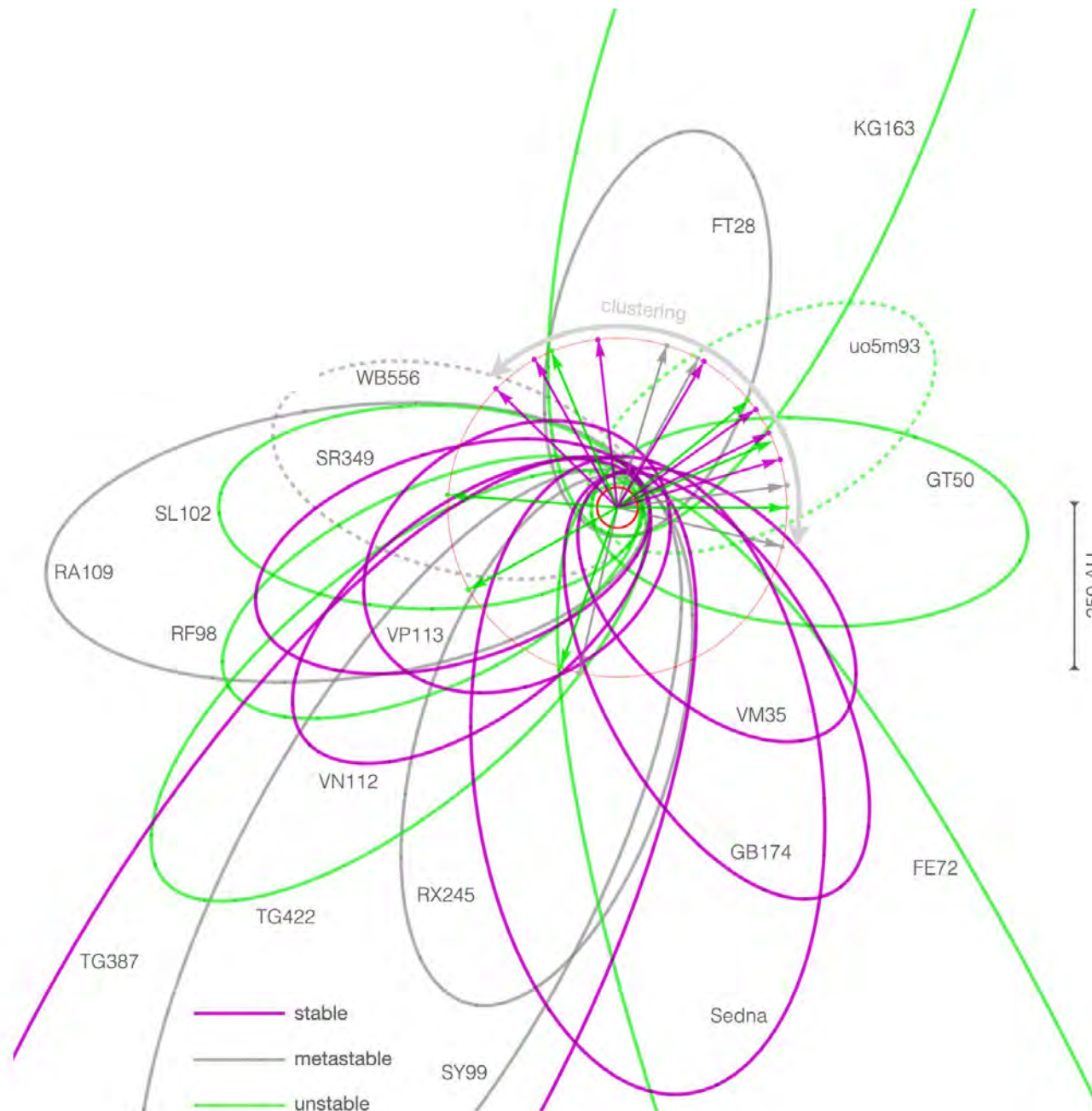
Est l'alignement orbital réel?

Il faut cependant distinguer les objets stables de ceux instables, qui n'ont aucune raison d'être alignés





Est l'alignement orbital réel?



Les objets stables sont bien alignés. Les objets métastables aussi, sauf un orienté à 180° (aussi une configuration stable avec la planète IX)

La distribution de i, Ω est aussi excentrée, comme attendu s'il y a une planète sur orbite inclinée

Batygin & Brown, ApJL, 2021



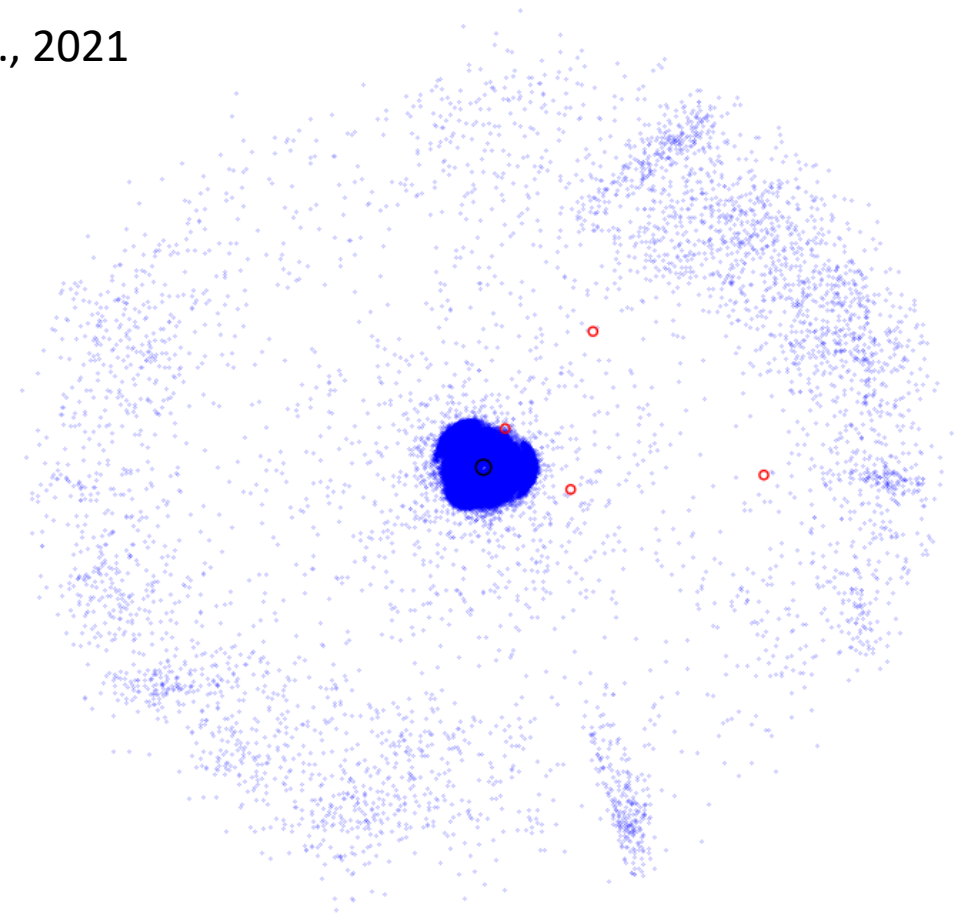
Est l'alignement orbital réel?

Effet des biais observationnels?

Ces objets sont visibles seulement près du périhélie. Si les observateurs cherchent toujours dans la même direction du ciel, ils sélectionnent les objets dont la longitude du périhélie tombe dans la zone du ciel ciblée.

C'est vrai dans certains cas: Shankman et al., 2017; Napier et al., 2021

Brown et Batygin (2019) supposent que chaque détection d'un TNO identifie un champ dans le ciel observé. Ils calculent alors la probabilité que une population uniforme en ϖ, Ω observée sur tous ces champs de ciel ait un alignement apparent de ϖ, Ω comparable à celui qui caractérise les objets distants. Ils trouvent une probabilité de 0,2%. C'est une méthode non rigoureuse car on n'a pas d'infos sur les zones du ciel observées dans lesquelles on n'a rien trouvé.



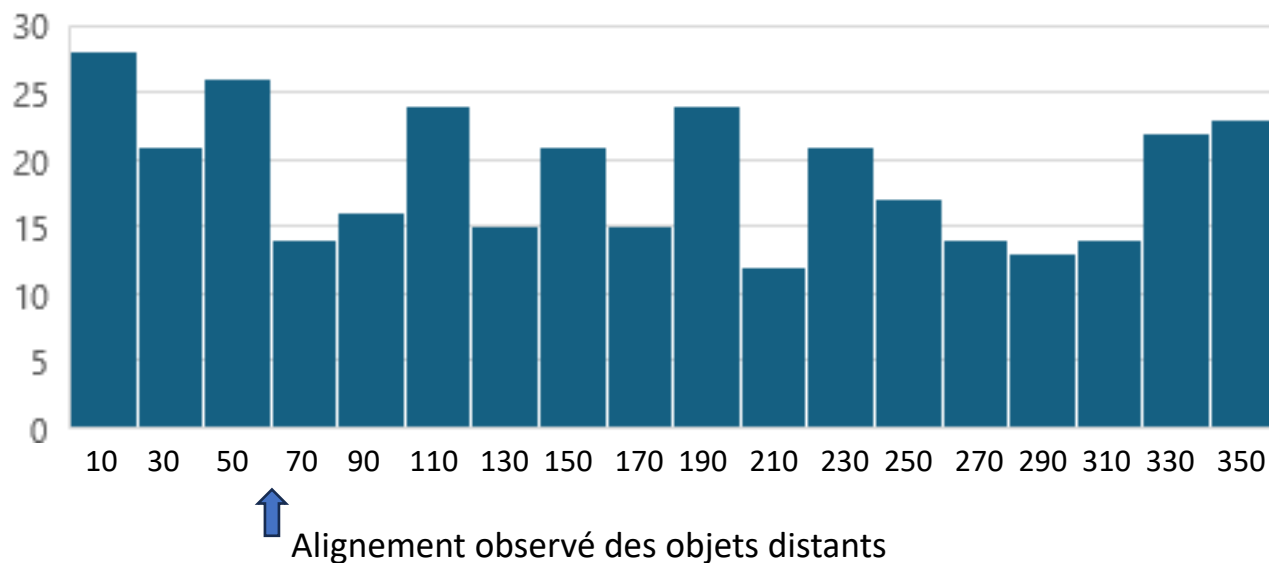
Minor planets within 50.0 AU of the Sun on 2024-07-10



Est l'alignement orbital réel?

Il reste néanmoins vrai que pour les objets du disque dispersé il n'y a pas d'alignement apparent des valeurs de ϖ , ce qui suggère qu'il n'y a pas des forts biais de sélection

Histogramme des ϖ des objets du disque dispersé avec $Q > 100$ ua





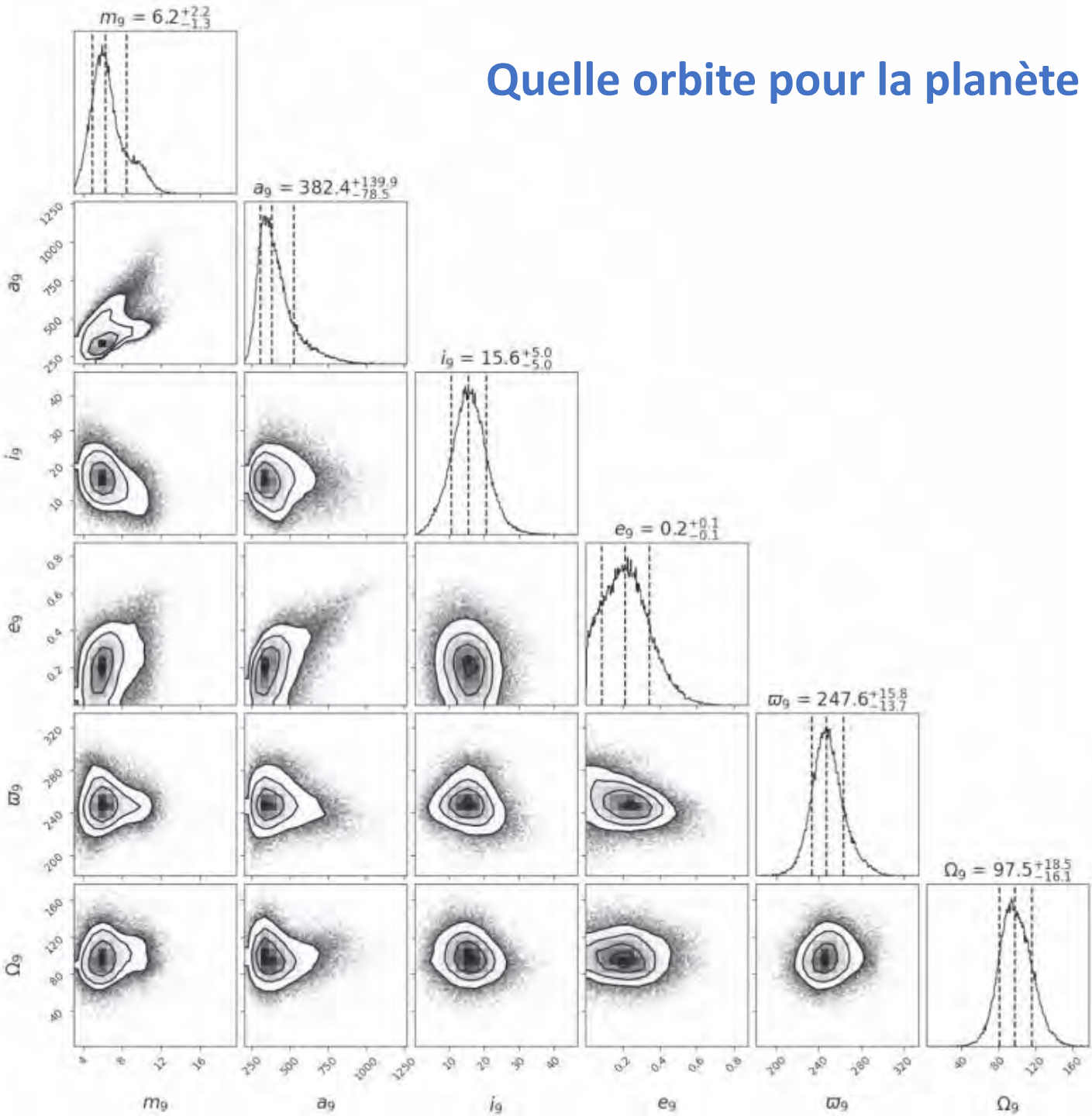
L'observatoire Vera Rubin

Avec l'observation de presque tout le ciel tous les quatre jours à la limite de la magnitude 24, cet observatoire pourrait détecter la planète IX. Mais il découvrira des nouveaux objets distants et redécouvrira les objets connus, avec des biais observationnels parfaitement modélisables. L'existence d'un alignement orbital ou pas pourra être confirmé/infirmé sans ambiguïté.





Quelle orbite pour la planète IX?



Dans un énorme effort numérique, Brown et Batygin, 2021 essayent de déterminer quelle planète pourrait mieux expliquer les observations

$$\begin{aligned} M &= 6.2 M_E, \\ a &= 382 \text{ au}, \\ e &= 0.2, \\ i &= 15.6, \\ Q &= 458 \text{ au} \dots \end{aligned}$$



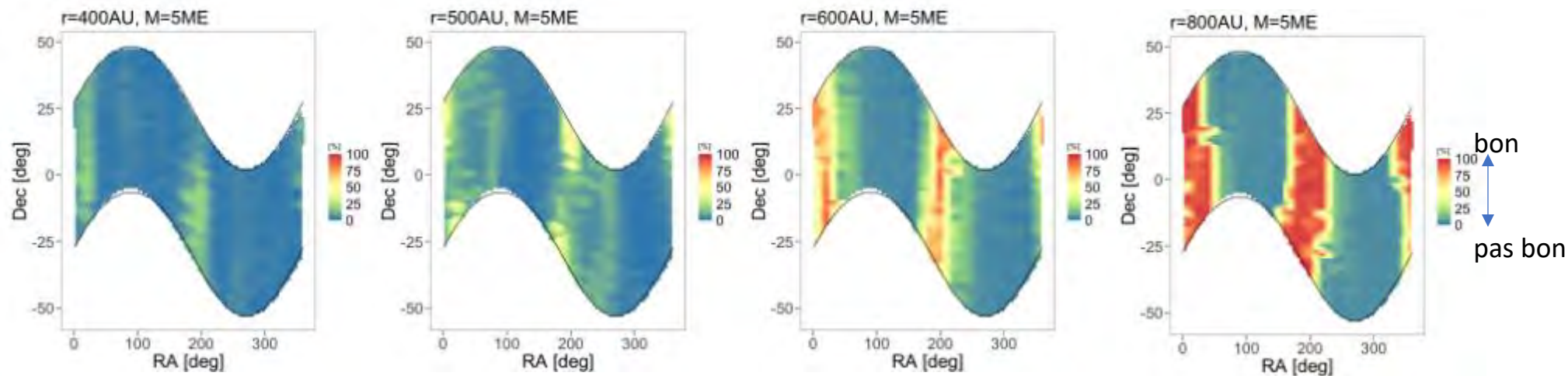
Effets de la planète IX sur les planètes connues

Précisions des mesures sur la position des planètes, grâce aux sondes spatiales.

Les positions mesurées sont en accord avec les prévisions d'un modèle du Système solaire sans planète IX, par exemple dans les éphémérides DES du JPL et INPOP de l'Obs. de Paris

Jupiter	1,5 km	Pioneer, Cassini, Voyager, Ulysses
Saturne	0,1 km	Cassini
Uranus	1000 km	Voyager
Neptune	2000 km	Voyager
Pluton	1500 km	HST

Fienga et al. (2020) regardent quelle planète IX pourrait exister sans dégrader la performance des éphémérides





Effets de la planète IX sur les planètes connues

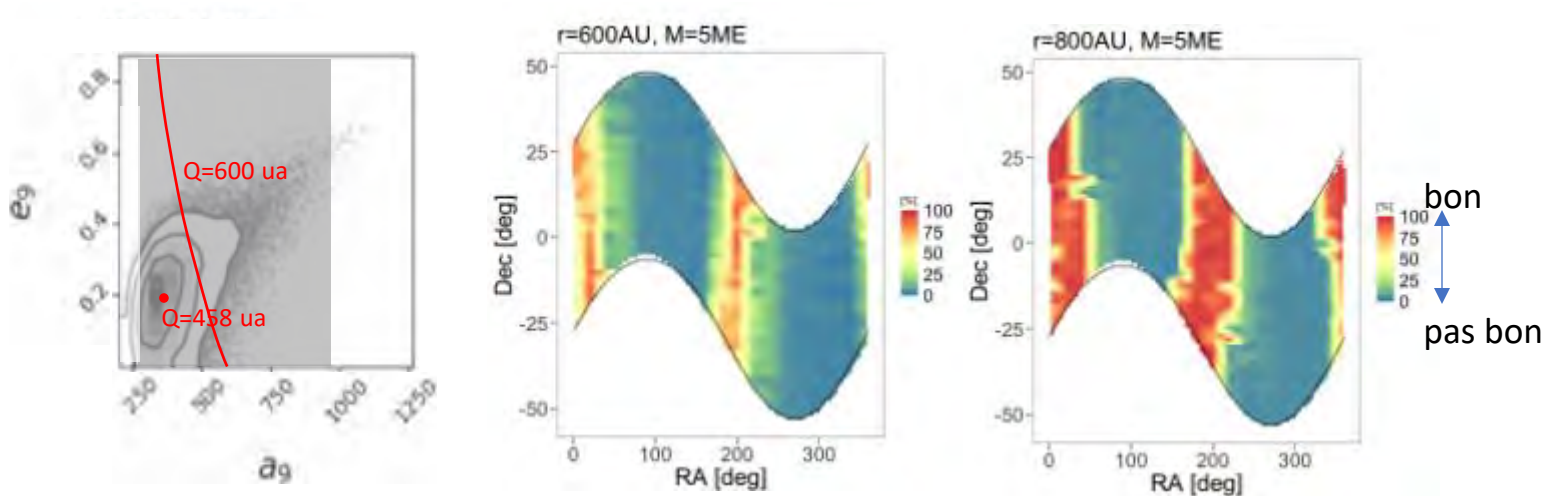
Précisions des mesures sur la position des planètes, grâce aux sondes spatiales.

Les positions mesurées sont en accord avec les prévisions d'un modèle du Système solaire sans planète IX, par exemple dans les éphémérides DES du JPL et INPOP de l'Obs. de Paris

Jupiter	1,5 km	Pioneer, Cassini, Voyager, Ulysses
Saturne	0,1 km	Cassini
Uranus	1000 km	Voyager
Neptune	2000 km	Voyager
Pluton	1500 km	HST

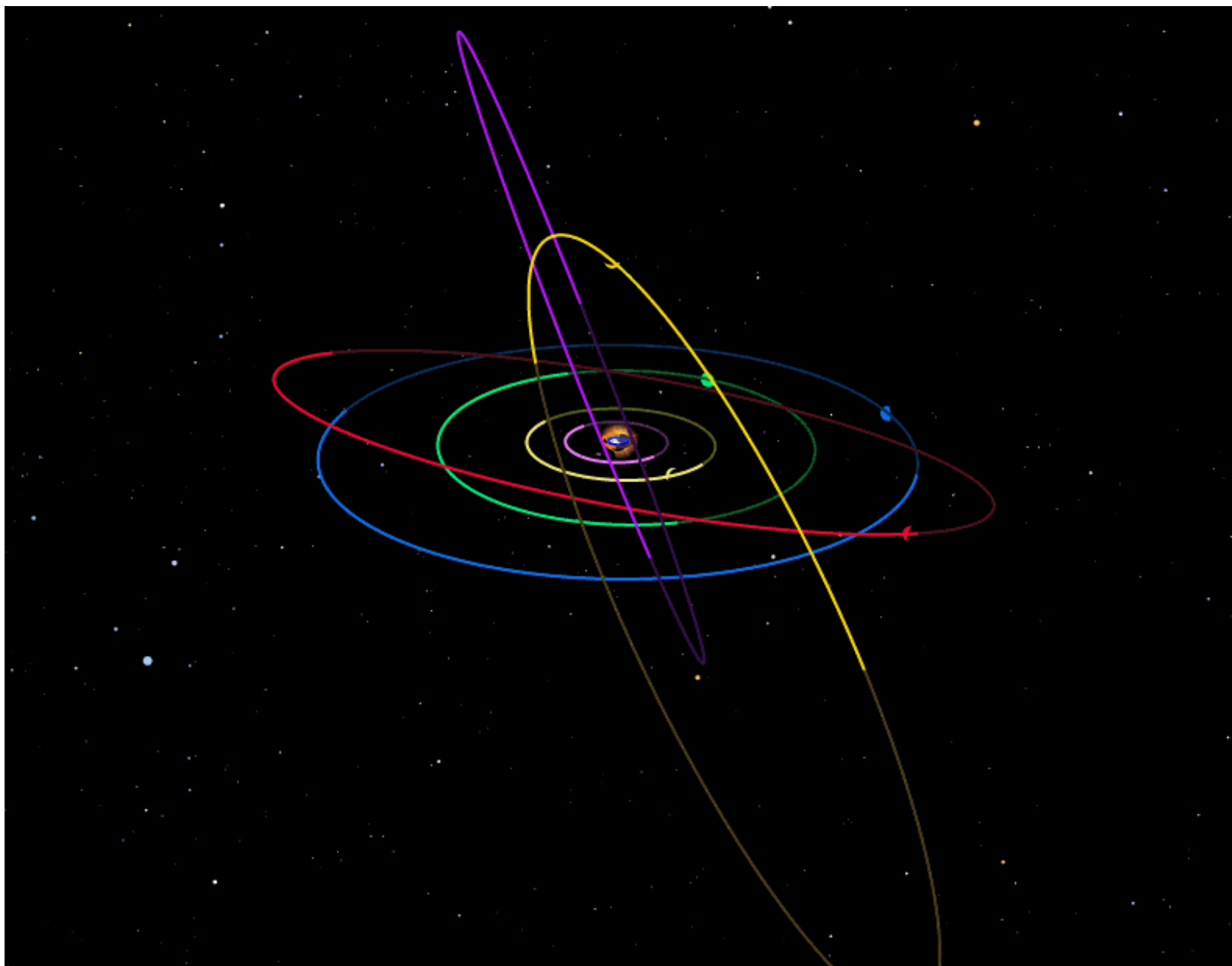
Fienga et al. (2020) regardent quelle planète IX pourrait exister sans dégrader la performance des éphémérides

Partiellement compatible avec Brown et Batygin (Q = 458 ua)



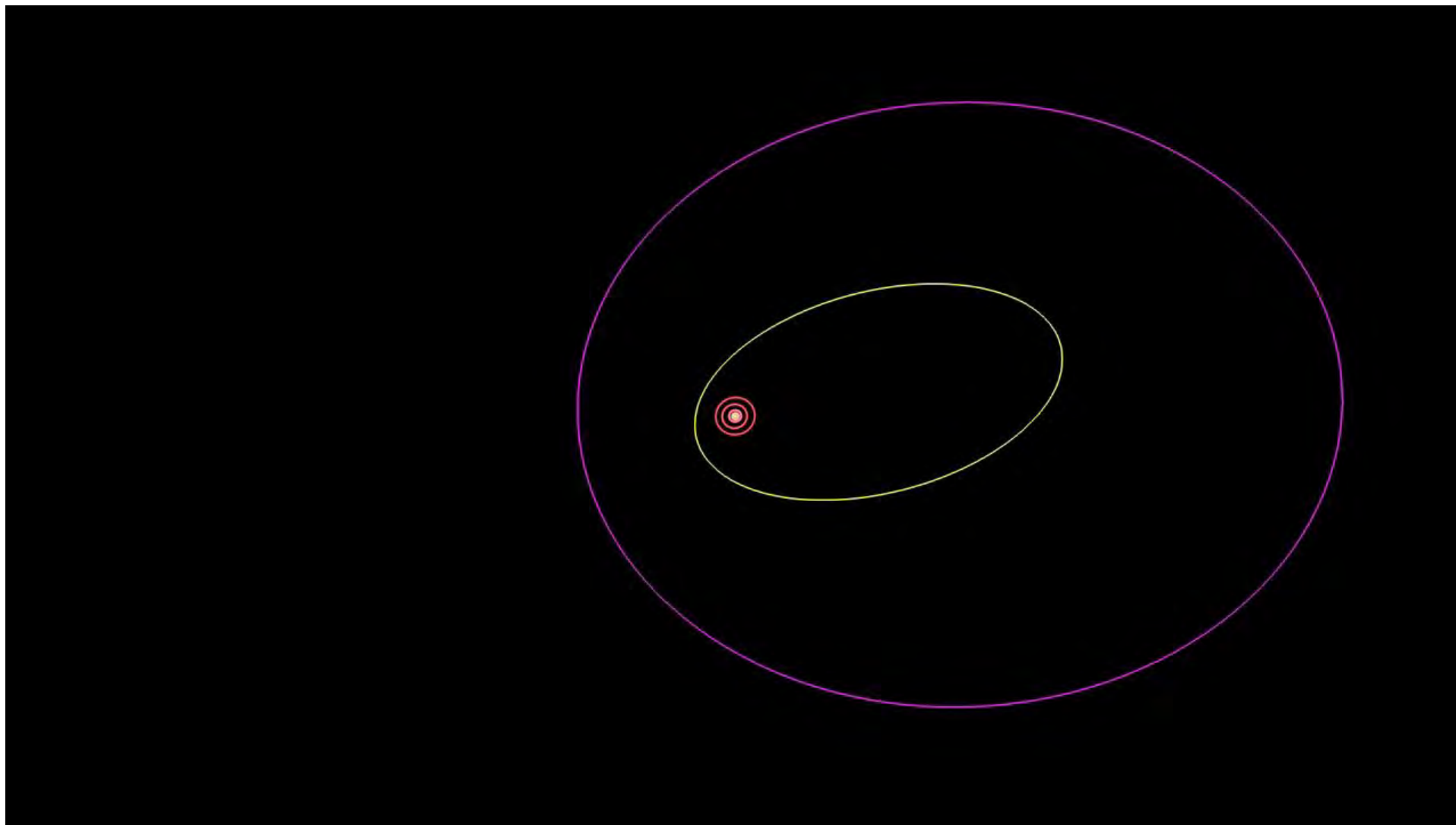


Autres indices: objets avec $i \sim 90^\circ$





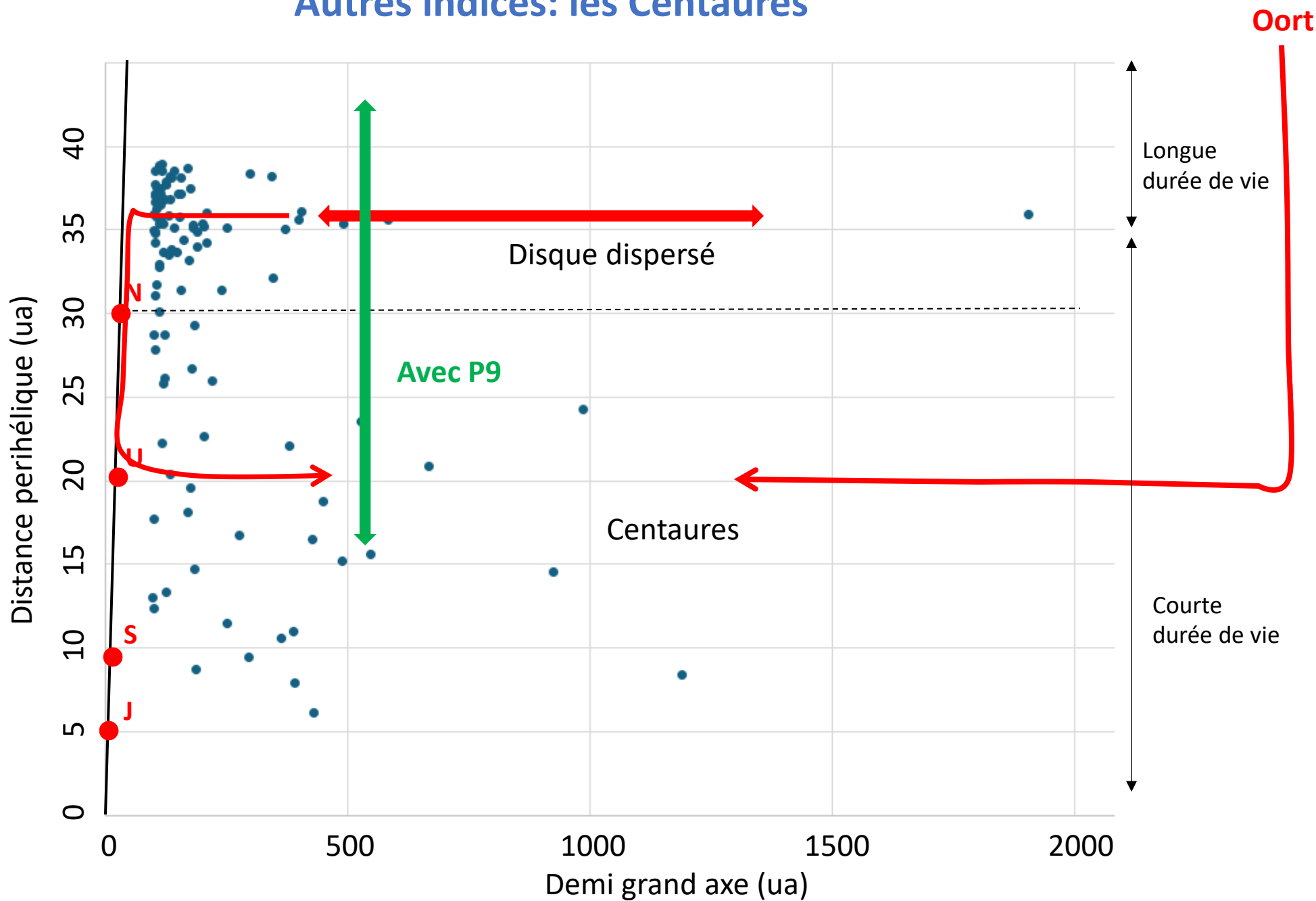
Autres indices: objets avec $i \sim 90^\circ$



La planète IX peut générer ces objets (Batygin et Morbidelli, 2017),
mais le nuage d'Oort peut en être la source aussi



Autres indices: les Centaures

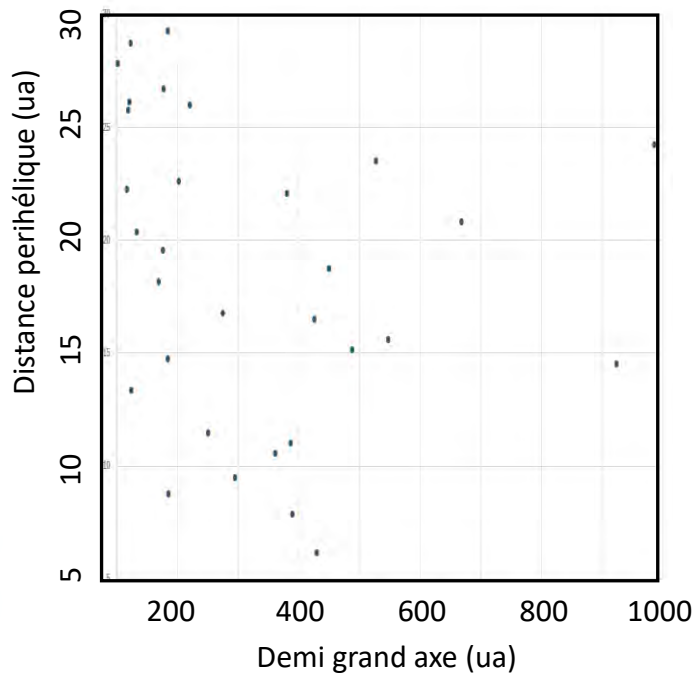




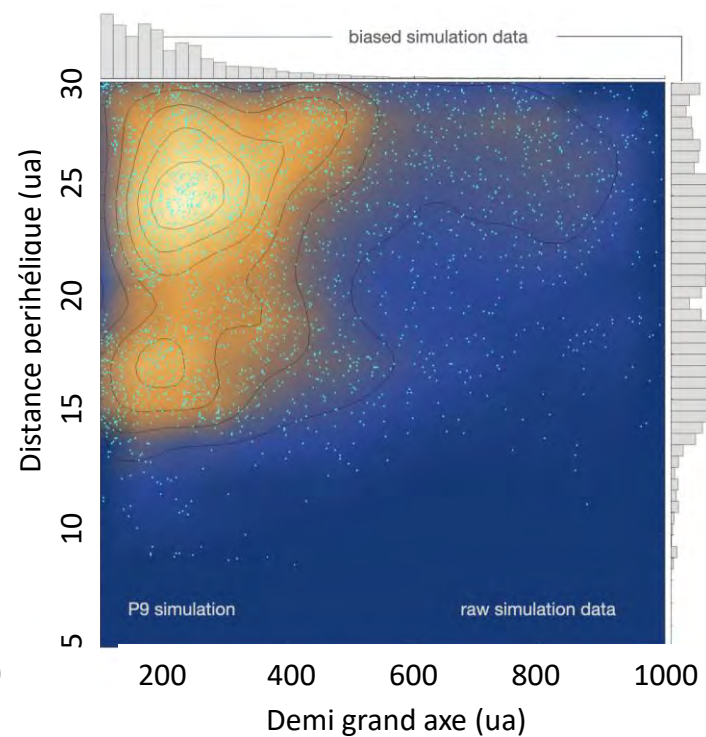
Autres indices: les Centaures

Batygin, Morbidelli et al. (2024)

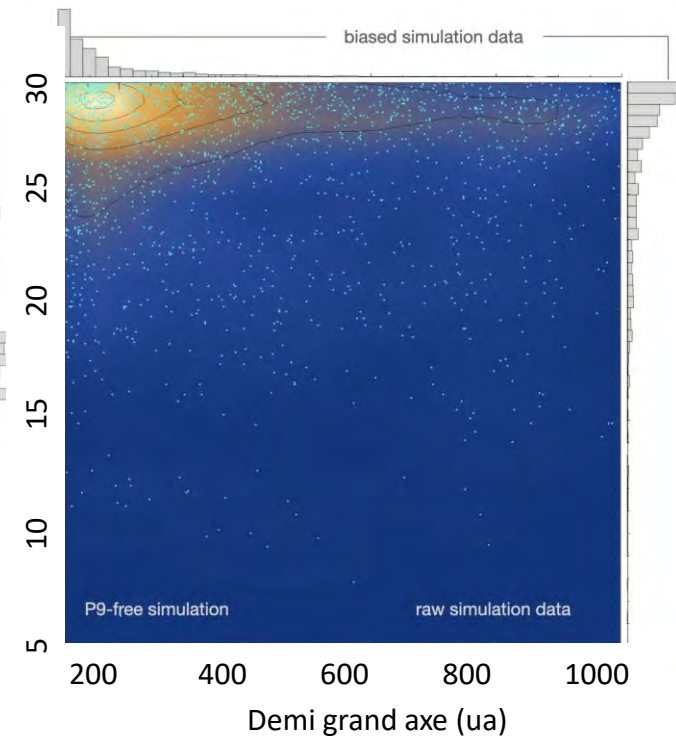
Observations



Modèle avec P9



Modèle sans P9

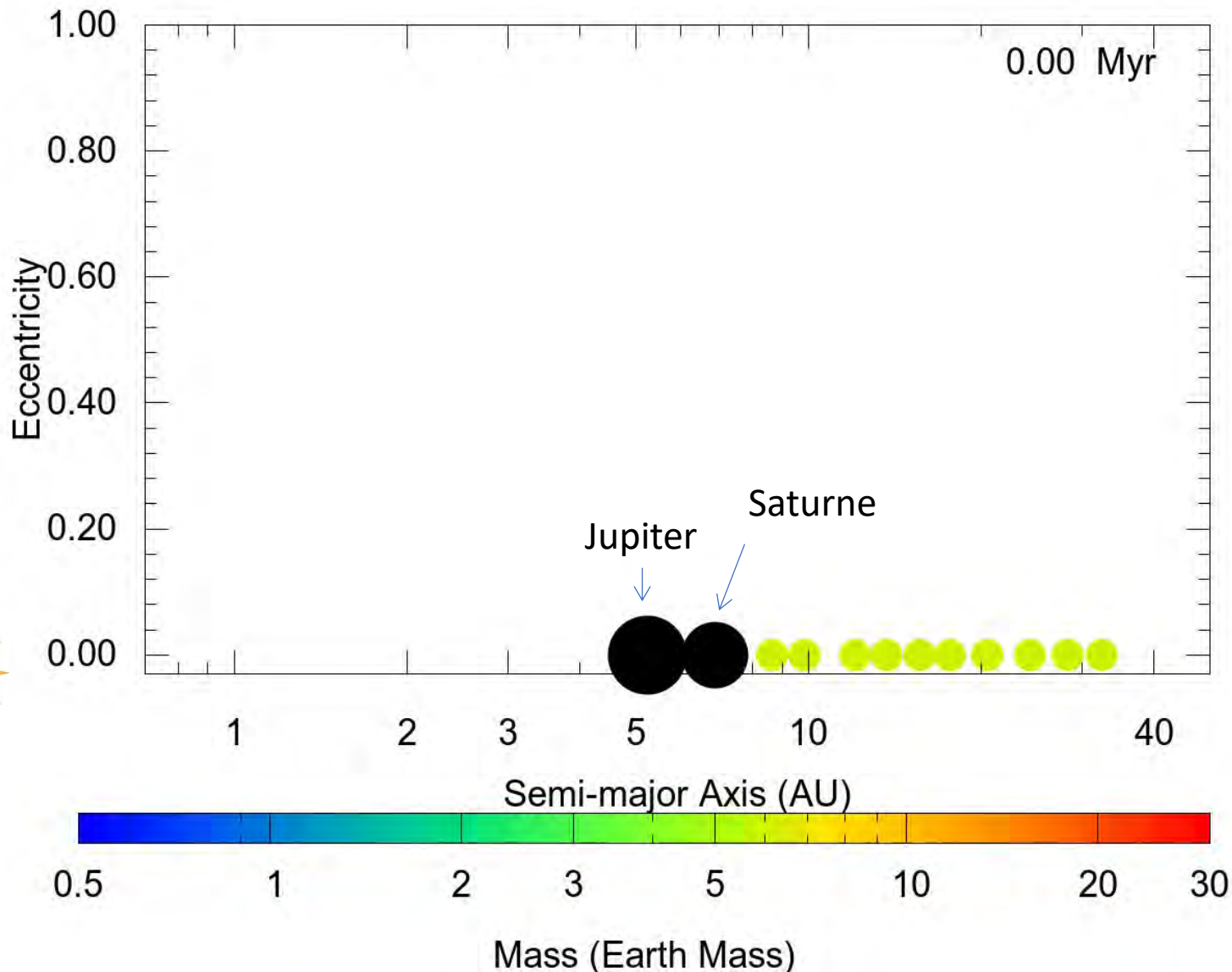




Origine de la planète IX

Formation de Uranus et Neptune et expulsion de proto-planètes

Soleil

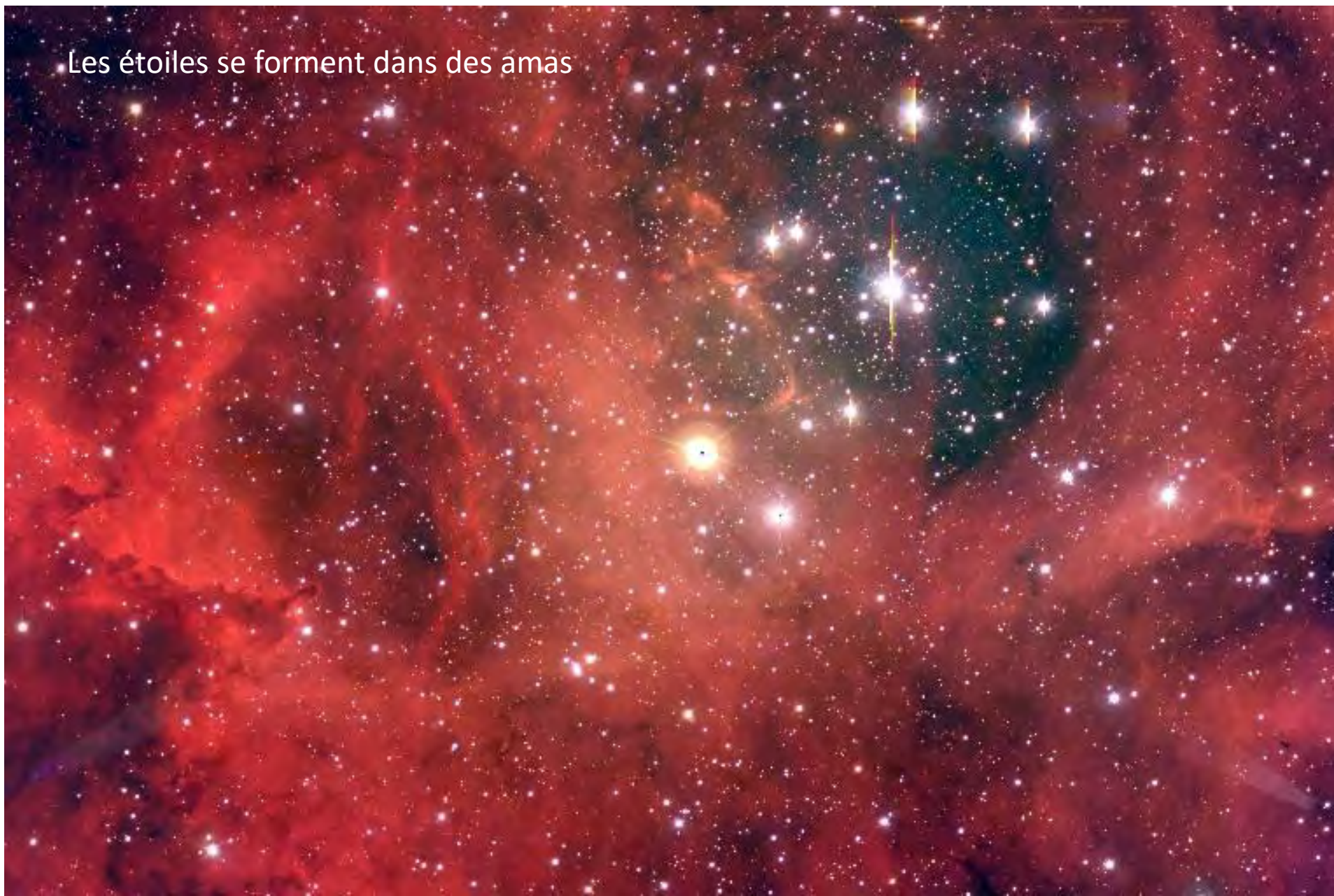


Izidoro, Morbidelli et al., 2015
Jakubik, Morbidelli et al., 2012



Origine de la planète IX

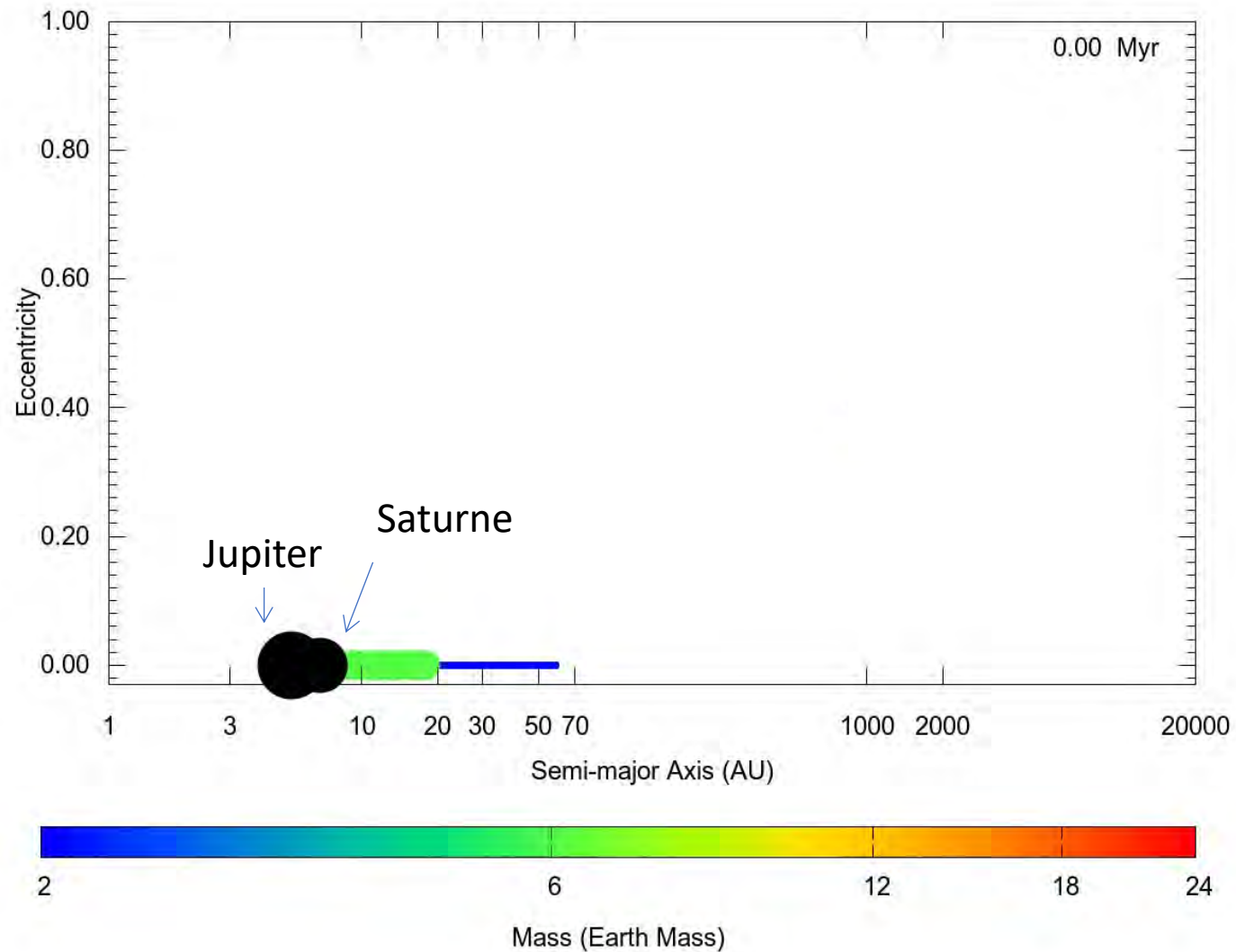
Les étoiles se forment dans des amas





Formation de Uranus et Neptune et expulsion de proto-planètes en présence d'un amas stellaire

Soleil



Izidoro et al., 2016



A retenir

- Les comètes se divisent en deux familles dynamiques: celles avec petites inclinaisons orbitales, dénommées “de la famille de Jupiter” et celle avec distribution homogène en inclinaisons
- Les comètes de la famille de Jupiter proviennent du disque dispersé
- Les comètes avec distribution homogène en inclinaisons proviennent du nuage d’Oort
- En particulier, les comètes nouvelles, avec $a \sim 20\,000 - 40\,000$ ua révèlent la structure isotrope de ce nuage
- Le nuage de Oort se forme à partir de la partie extrême du disque dispersé en demi grand axe à cause de la marée galactique
- Cette même marée galactique injecte sporadiquement des comètes du nuage d’Oort vers l’intérieur du Système solaire ($q < 3$ ua)
- Les objets les plus distants ($a > 250$ ua) du disque fossilisé ($q > 45$ ua) semblent avoir les longitudes du périhélie et du nœuds alignés
- Ca ne semble pas être un effet de biais observationnels, mais c’est à confirmer. Statistique de petits nombres
- Si cet alignement est vrai, une planète (de type mini-Neptune) doit exister sur une orbite inclinée et excentrique, avec demi-grand-axe de $300 - 1\,000$ ua
- Conflit apparent entre les caractéristiques orbitales qui mieux reproduisent l’alignement orbital des TNOs distants et celles exclues par l’absence de perturbations visibles sur les planètes connues
- La planète IX pourrait expliquer aussi l’existence d’objets avec $i \sim 90^\circ$ et les Centaures avec petit q
- Si elle existe, cette planète aurait pu être mise sur son orbite actuelle par expulsion depuis la région de formation des planètes géantes et perturbations dues au champ de gravité de l’amas stellaire au sein duquel le Soleil c’est formé.