



Leçon N. 9 – 17 Décembre 2025

Alessandro
MORBIDELLI

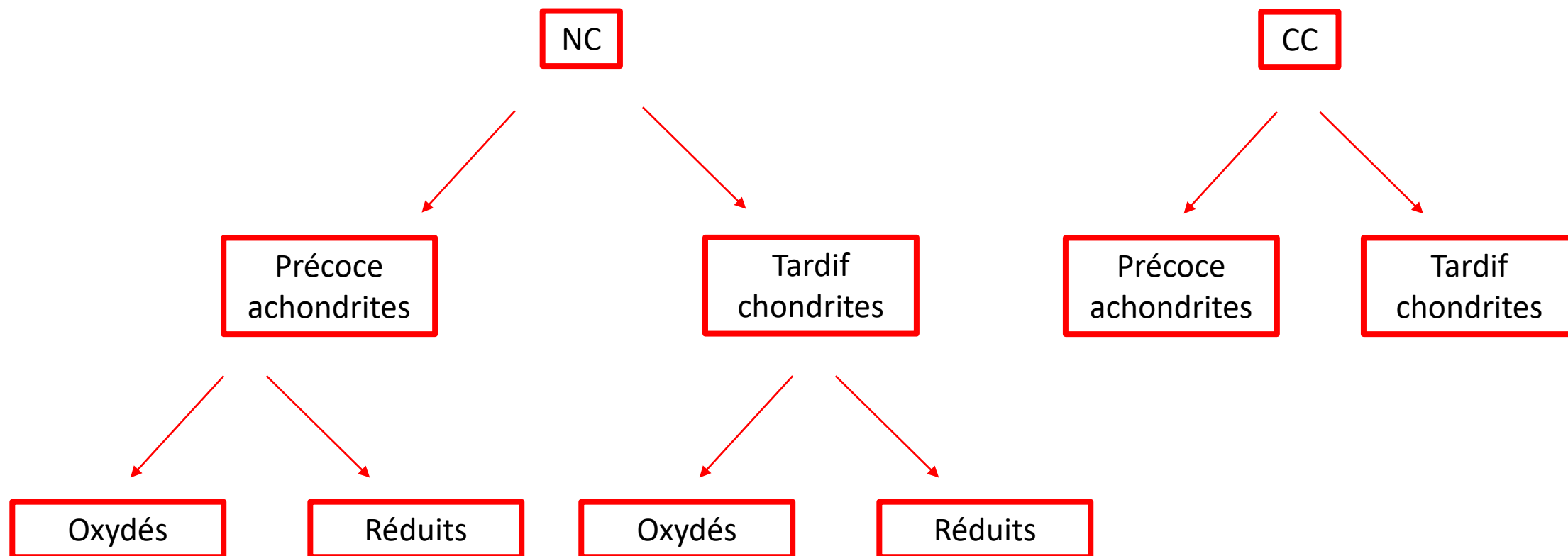
Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

Formation et évolution ceinture des astéroïdes.

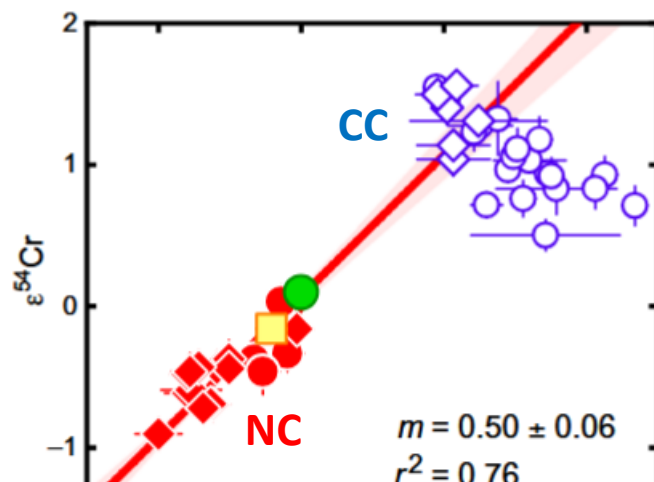


Différentes populations de planétésimaux, aujourd'hui dans la ceinture



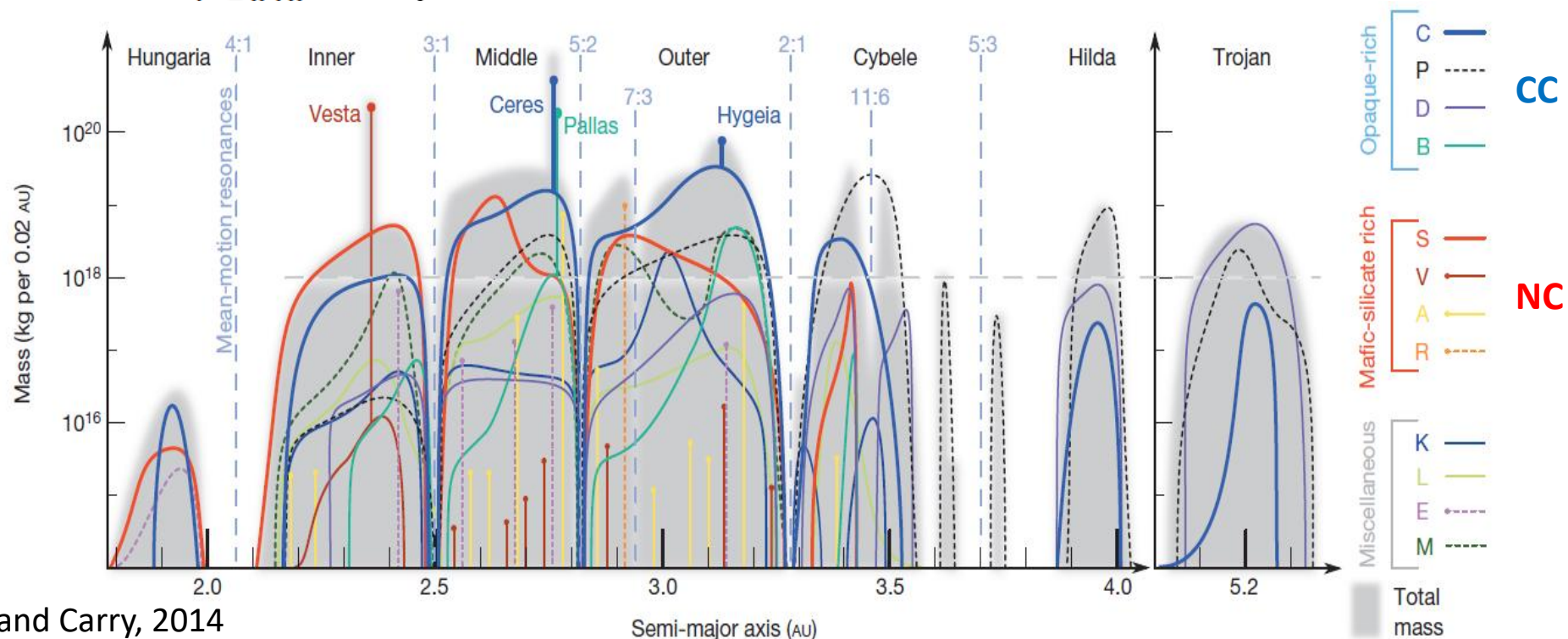
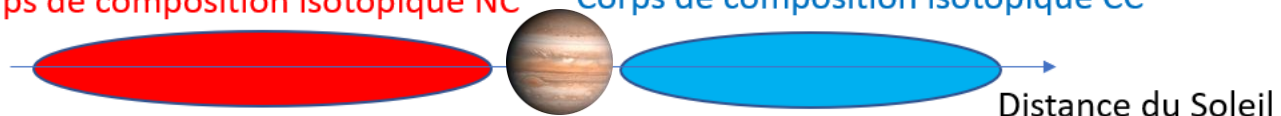


Dichotomie NC - CC



Corps de composition isotopique NC

Corps de composition isotopique CC

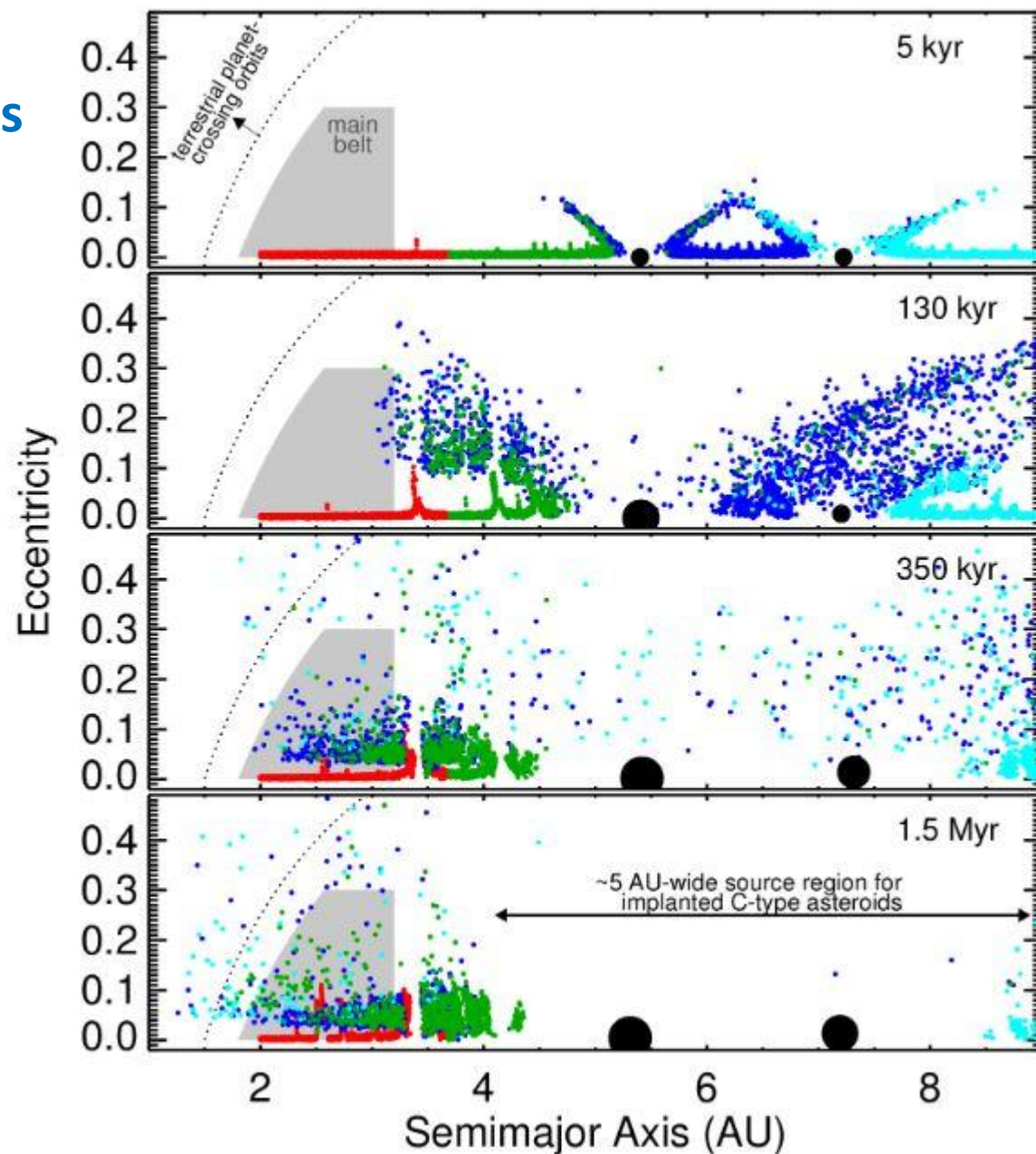


De Meo and Carry, 2014



Injection d'astéroïdes dans la ceinture principale depuis la région des planètes géantes

Pendant la croissance des planètes géantes
Assistée par le frottement gazeux



Raymond and Izidoro, 2017



Deux générations de planétésimaux: mécanismes d'injection distincts?



IVB: Formation du corps parent 0,6 Ma
(Kruijer et al., 2014)



CR chondrite: Formation du corps parent 3,7 Ma
(Neumann et al., 2024)



Deux générations de planétésimaux: mécanismes d'injection distincts?



Co-formation avec Jupiter et Saturne plausible
injection par déstabilisation due à la croissance planétaire

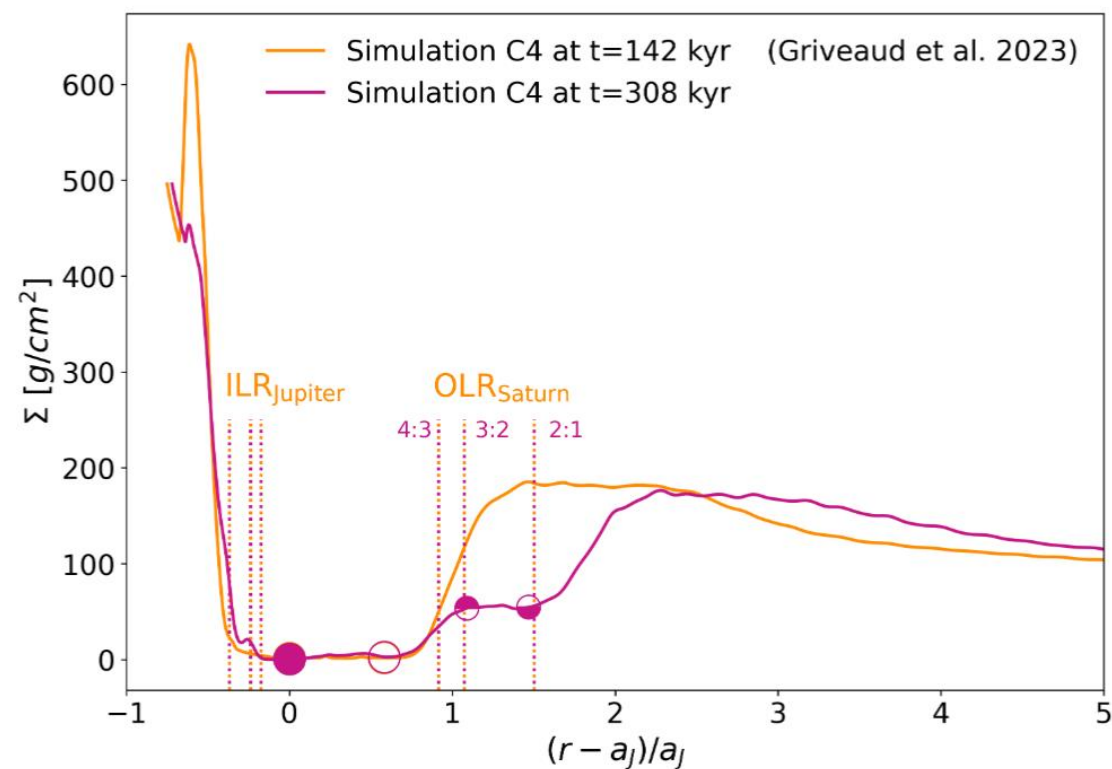
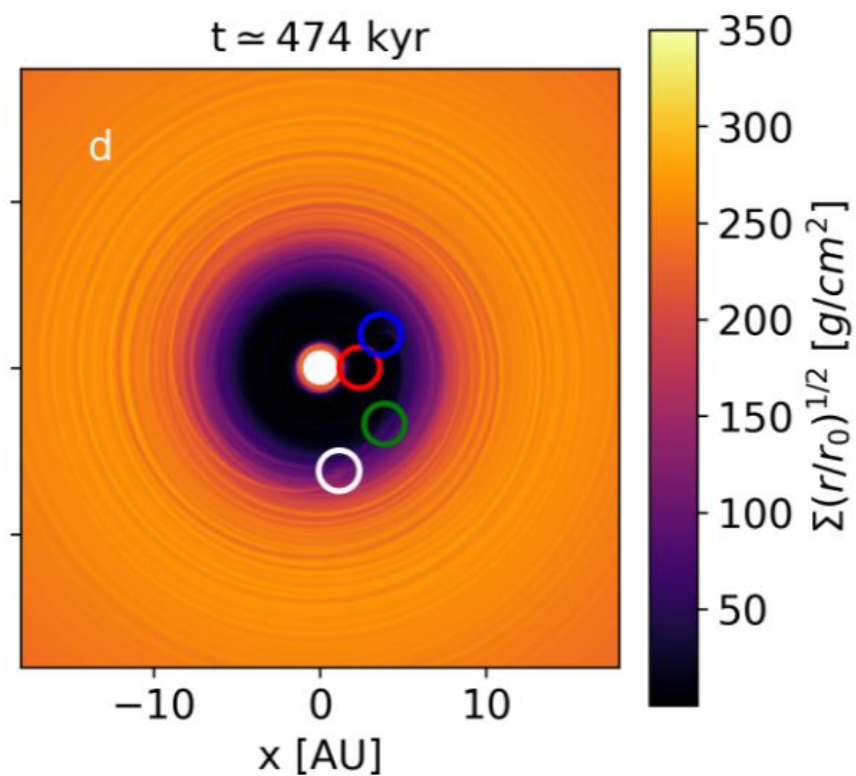


Co-formation avec Uranus et Neptune?
Déstabilisation par la migration de ces planètes?
Autre?



Accrétion-éjection

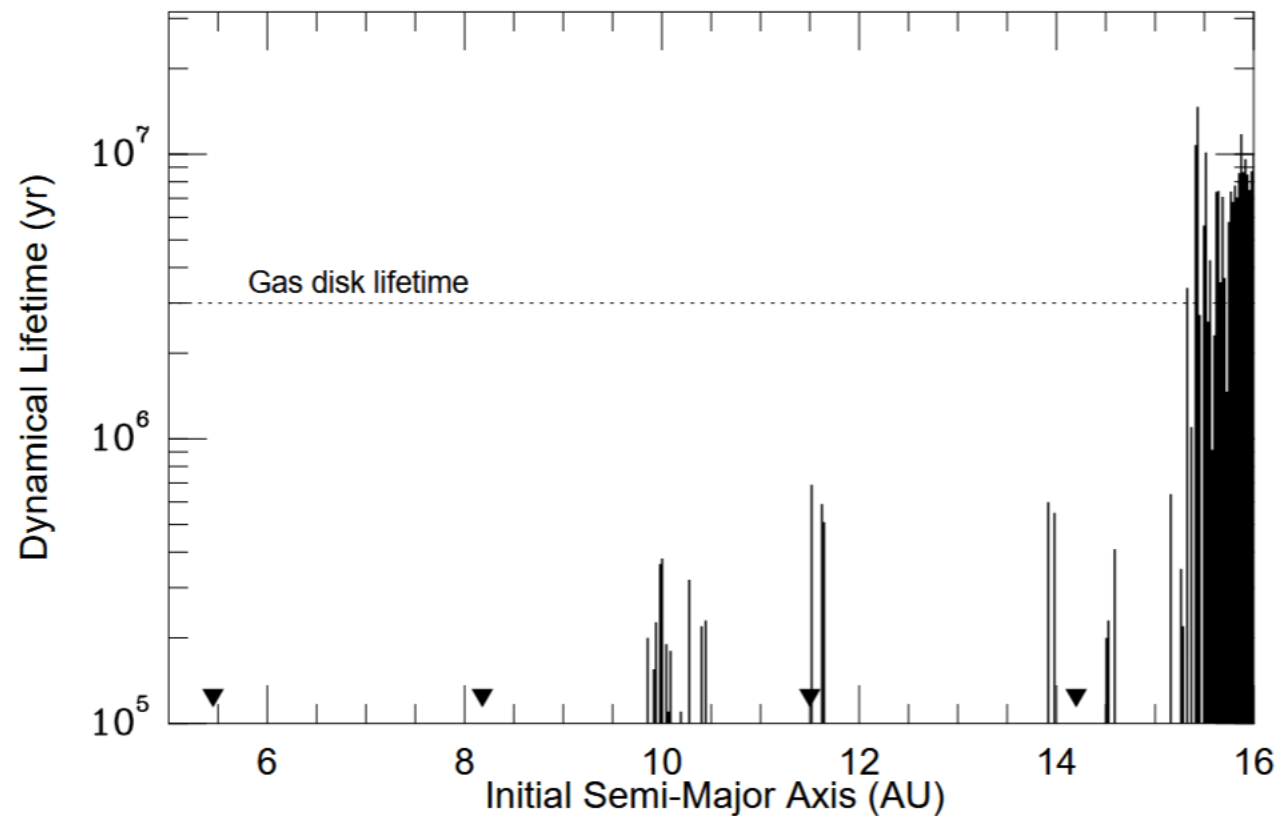
La présence du gaz dans la région des planètes géantes empêche l'éjection des poussières....





Accrétion-éjection

...mais, dès qu'un planétésimal se forme, la friction gazeuse diminue radicalement et le planétésimal est déstabilisé très rapidement



Gomes et al., 2005



nature astronomy

Article

<https://doi.org/10.1038/s41550-025-02635-2>

Different arrival times of CM- and CI-like bodies from the outer Solar System in the asteroid belt

Received: 26 April 2024

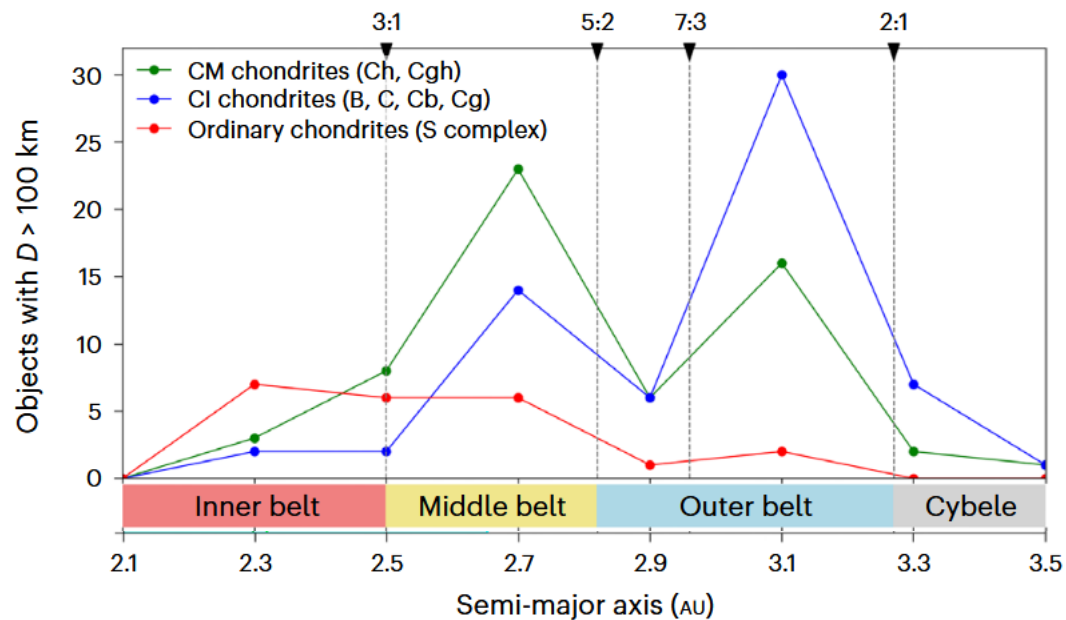
Sarah E. Anderson ^{1,3}✉, Pierre Vernazza ^{1,3} & Miroslav Brož ^{2,3}

La distribution des corps implantés dans la ceinture des astéroïdes dépend très faiblement de leur distribution initiale dans la région des planètes géantes.

En revanche, elle est sensible à la distribution du gaz



Considérations sur l'implantation



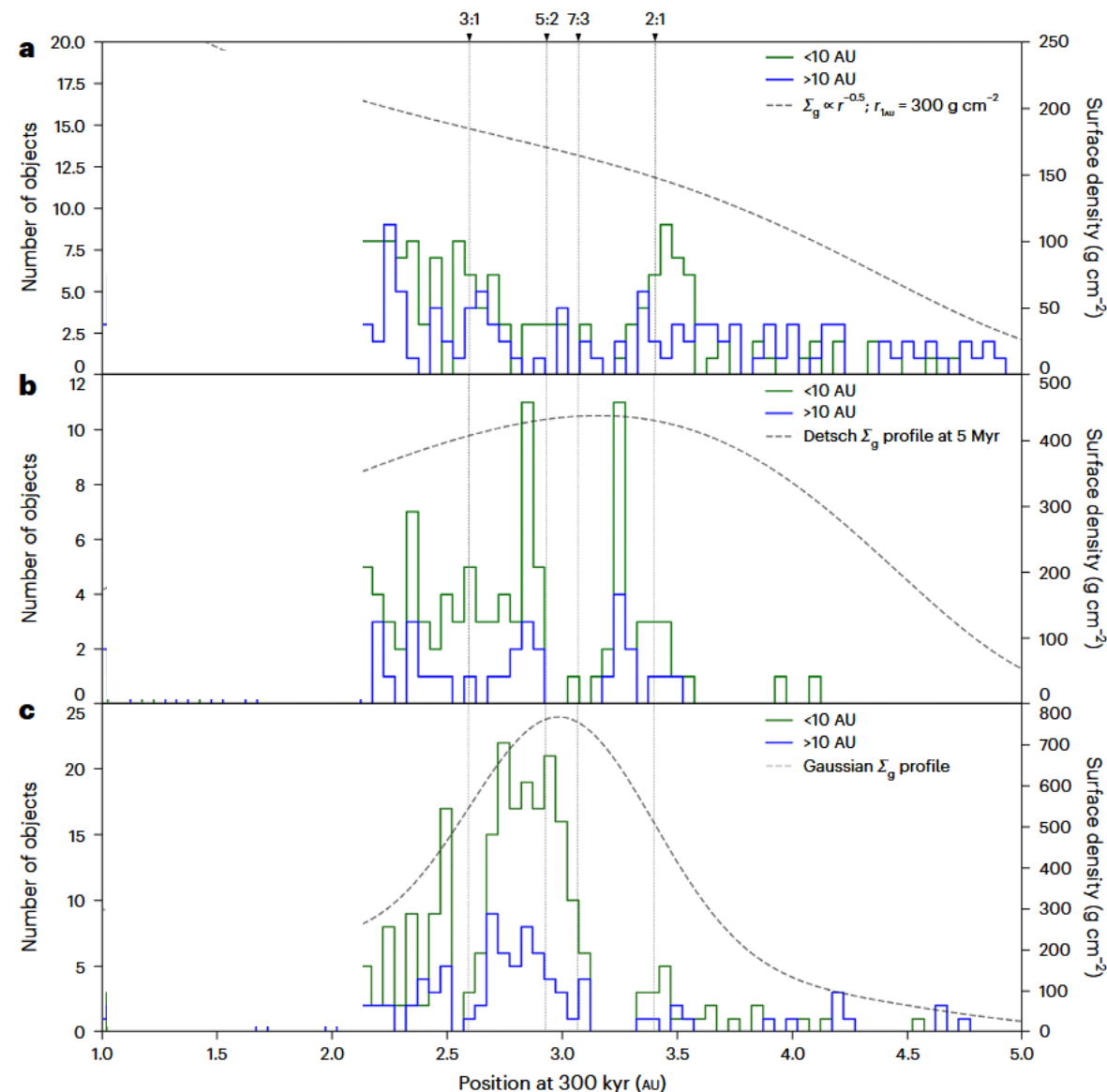
Les distributions radiales des astéroïdes dont le spectre s'apparente aux météorites CM et aux météorites CI sont différentes



Considérations sur l'implantation

Dans un disque de gaz dont la densité décline avec la distance, la plupart des astéroïdes implantés seraient dans la ceinture interne

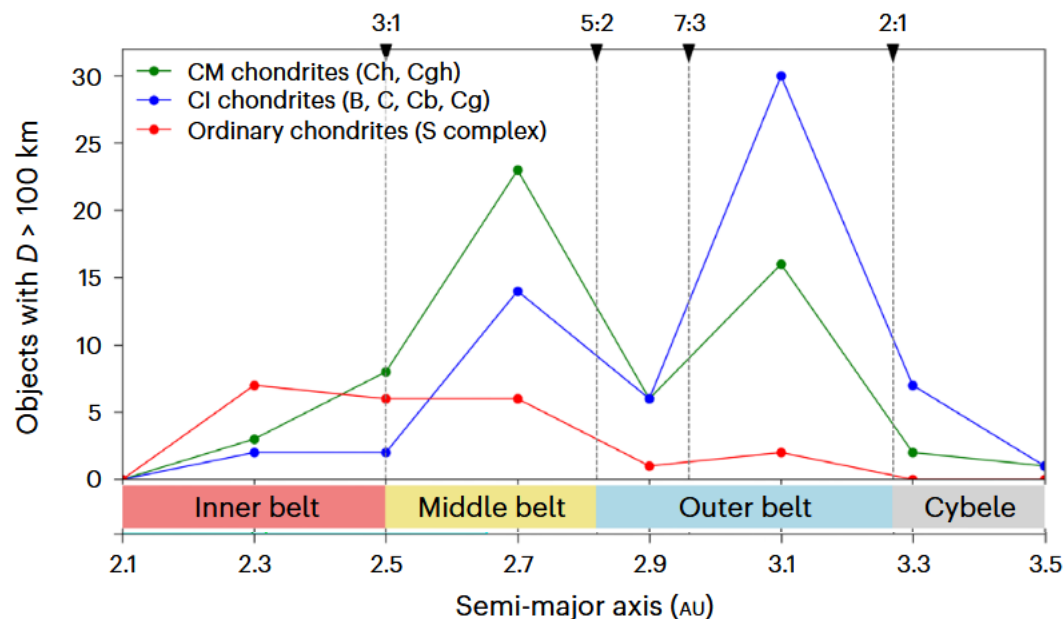
Capter les astéroïdes prioritairement dans la ceinture centrale, nécessite un maximum de la distribution du gaz dans cette région



Anderson et al., 2024



Considérations sur l'implantation



L'observation que les distributions radiales des astéroïdes CM et CI sont différentes implique donc des distributions du gaz différentes, c'est à dire une injection à des temps différents pendant que le disque évoluait

Lors de l'injection des astéroïdes CI, le maximum de la distribution du gaz devait être plus loin
Indice d'une photo-évaporation *inside-out* du disque interne?

(Note: Anderson et al. donnent une interprétation différente – j'y reviendrai)



Le mystère des corps parents des météorites de fer

- Ils sont les débris des noyaux de corps différenciés
- Ils sont nombreux (> 46)
- Ils sont indétectables dans la ceinture des astéroïdes, sans doute trop petits ($< 1\text{km}$, voire $< 0.1\text{km}$)
- Pas des familles d'astéroïdes dans la ceinture principale issues de l'éclatement d'un corps différencié
- A l'exception de Vesta, il n'y a pas d'autres corps différenciés intacts dans la ceinture principale

Ceci suggère que les planétésimaux qui se sont formés en premier (et qui sont donc différenciés) avaient une très grande probabilité de se fragmenter, et il l'ont fait avant la mise en place de la ceinture des astéroïdes actuelle



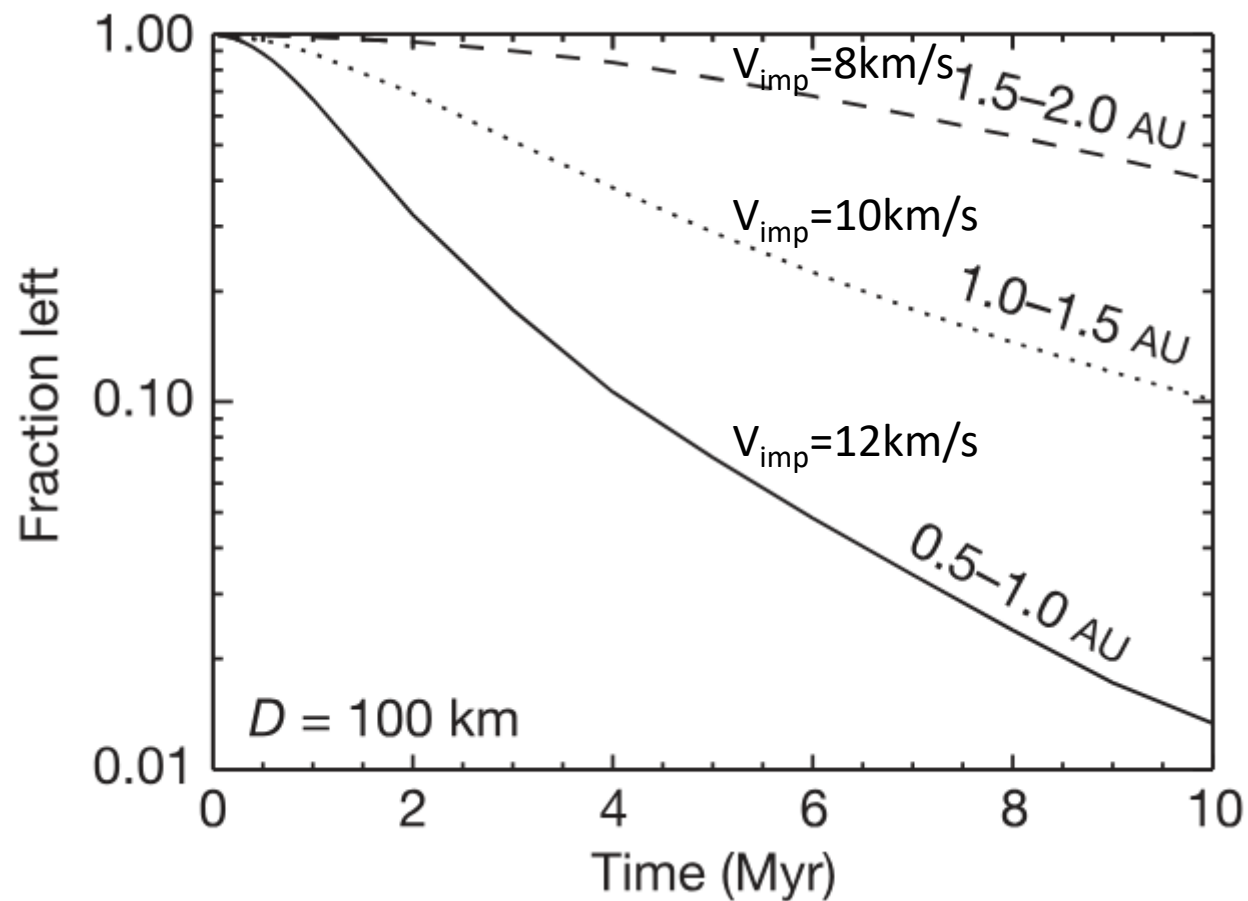
Probabilités et vitesses de collisions

La probabilité et la vitesse de collision sont bien plus élevées dans la région des planètes telluriques que dans la ceinture des astéroïdes.

Il est donc beaucoup plus facile de détruire des planétésimaux dans la région des planètes telluriques

De plus, pour des planétésimaux en dehors de la ceinture des astéroïdes, il y a un biais d'implantation qui favorise les petits fragments des corps détruits par rapport aux objets restés intacts.

Bottke et al., 2006, proposèrent que les corps parents des météorites de fer se soient formés dans la région des planètes telluriques.

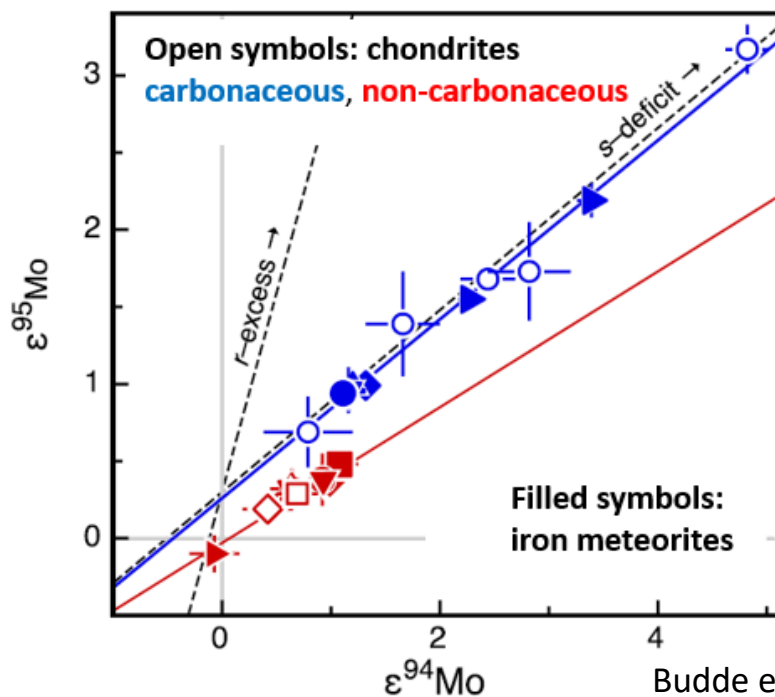


Bottke et al., 2006

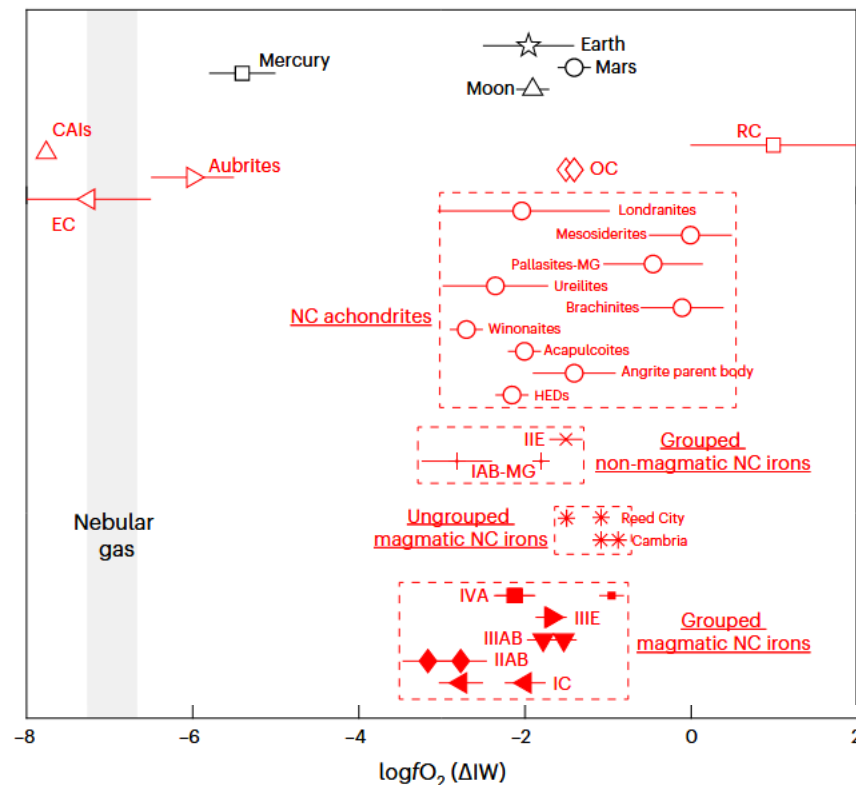


Sur l'origine des corps parent des météorites de fer

L'idée que les corps parents des météorites de fer se soient formés dans la région des planètes telluriques est incompatible avec leur dichotomie isotopique (qui implique que certains se sont formés dans la région des planètes géantes), mais aussi avec l'observation que les corps parents des météorites NC étaient oxydés, à différence de Mercure, et d'autres corps réduits, ce qui suggère qu'il se soient formés plus loin (dans ou près de la ceinture)



Budde et al., 2016
Kruijer et al., 2017



Grewal et al. (2024)



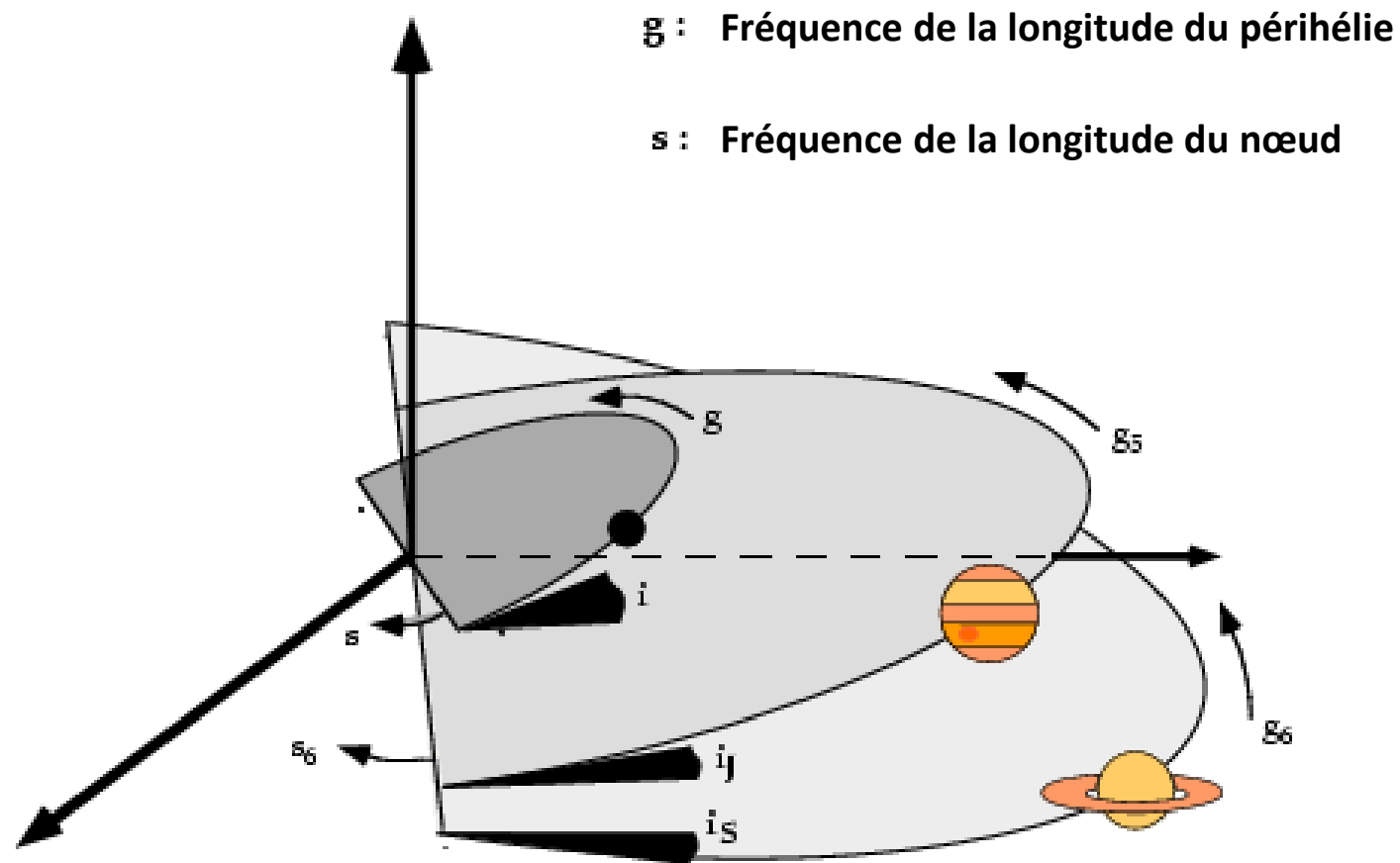
Transports d'astéroïdes vers la région tellurique par balayage de résonances

L'orbite des astéroïdes précède plus vite que celles de Jupiter ou Saturne.

Mais quand il y avait encore du gaz, le potentiel gravitationnel de celui-ci rendait la précession des astéroïdes plus lente

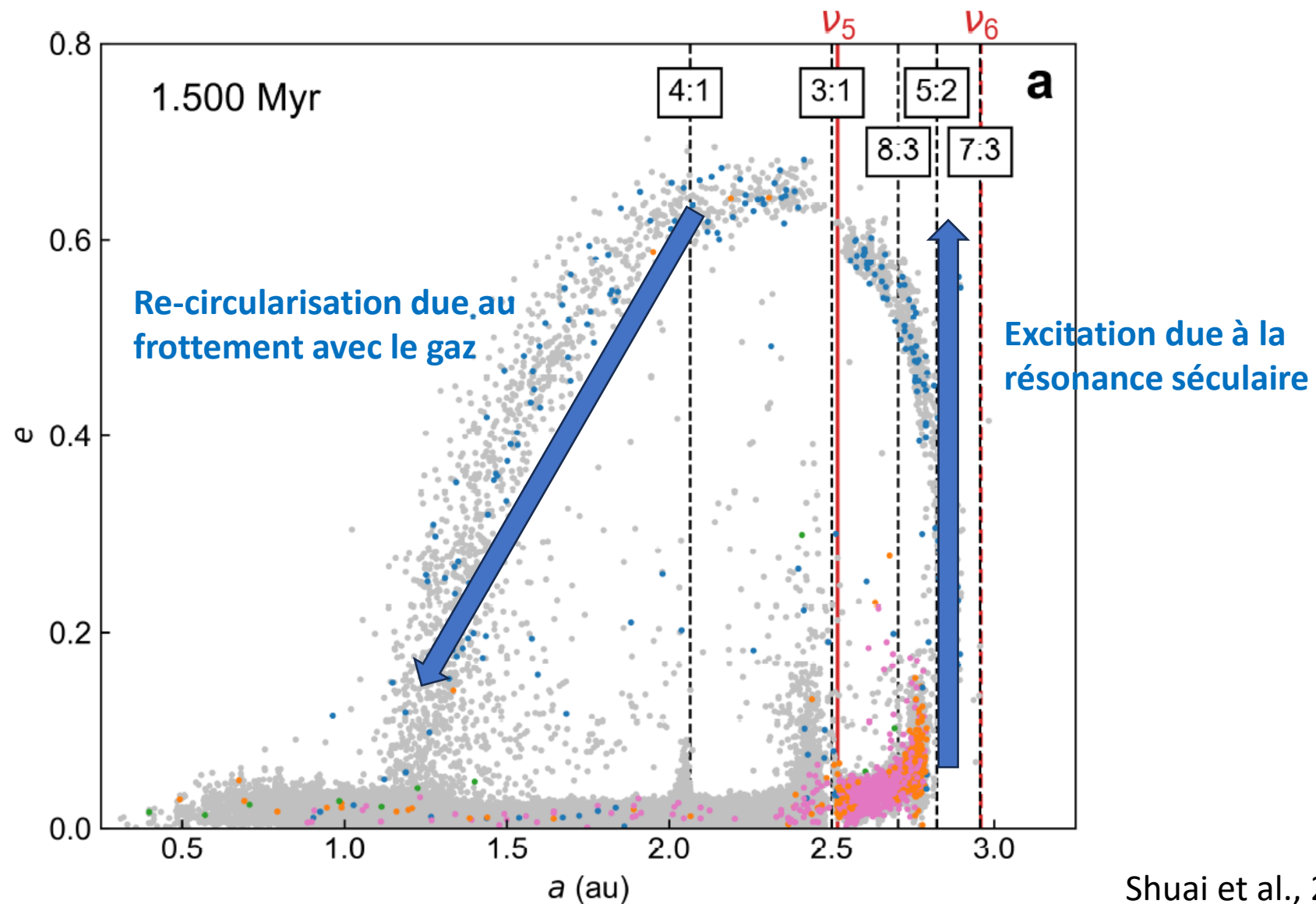
A la dissipation du gaz il y eut alors un moment quand les astéroïdes étaient en résonance séculaire.

Ça marche si Jupiter et Saturne avaient leurs orbites actuelles, mais aussi si elles étaient en résonance 2/1, comme attendu avant l'instabilité des planètes géantes.



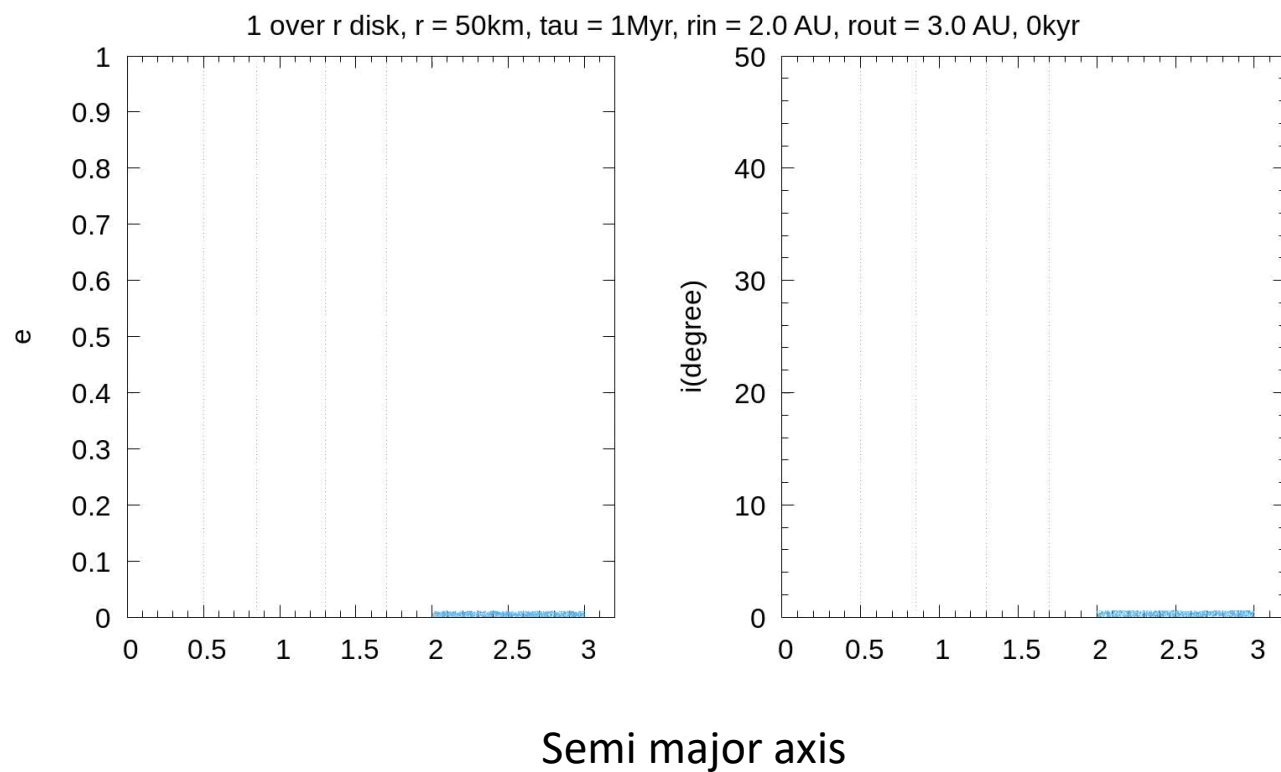


Transports d'astéroïdes vers la région tellurique par balayage de résonances





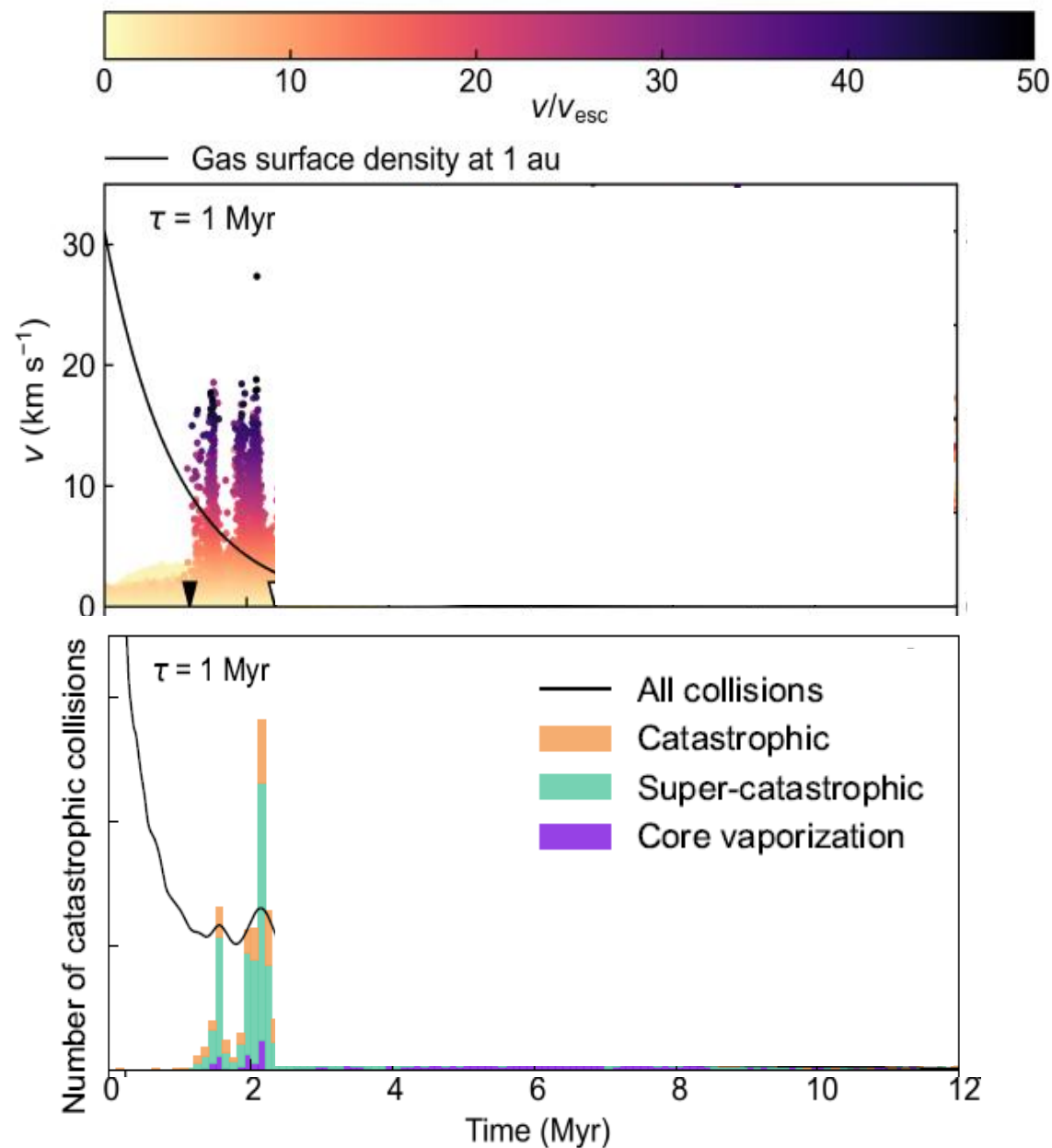
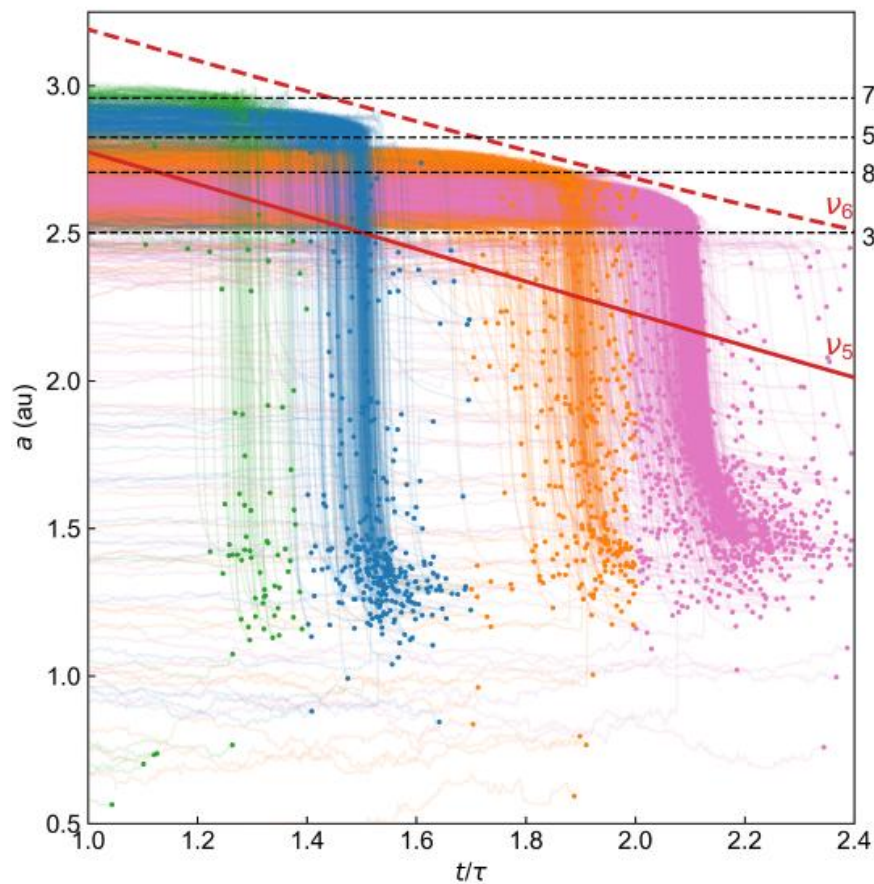
Transports d'astéroïdes vers la région tellurique par balayage de résonances



Goldberg et al. (2005)



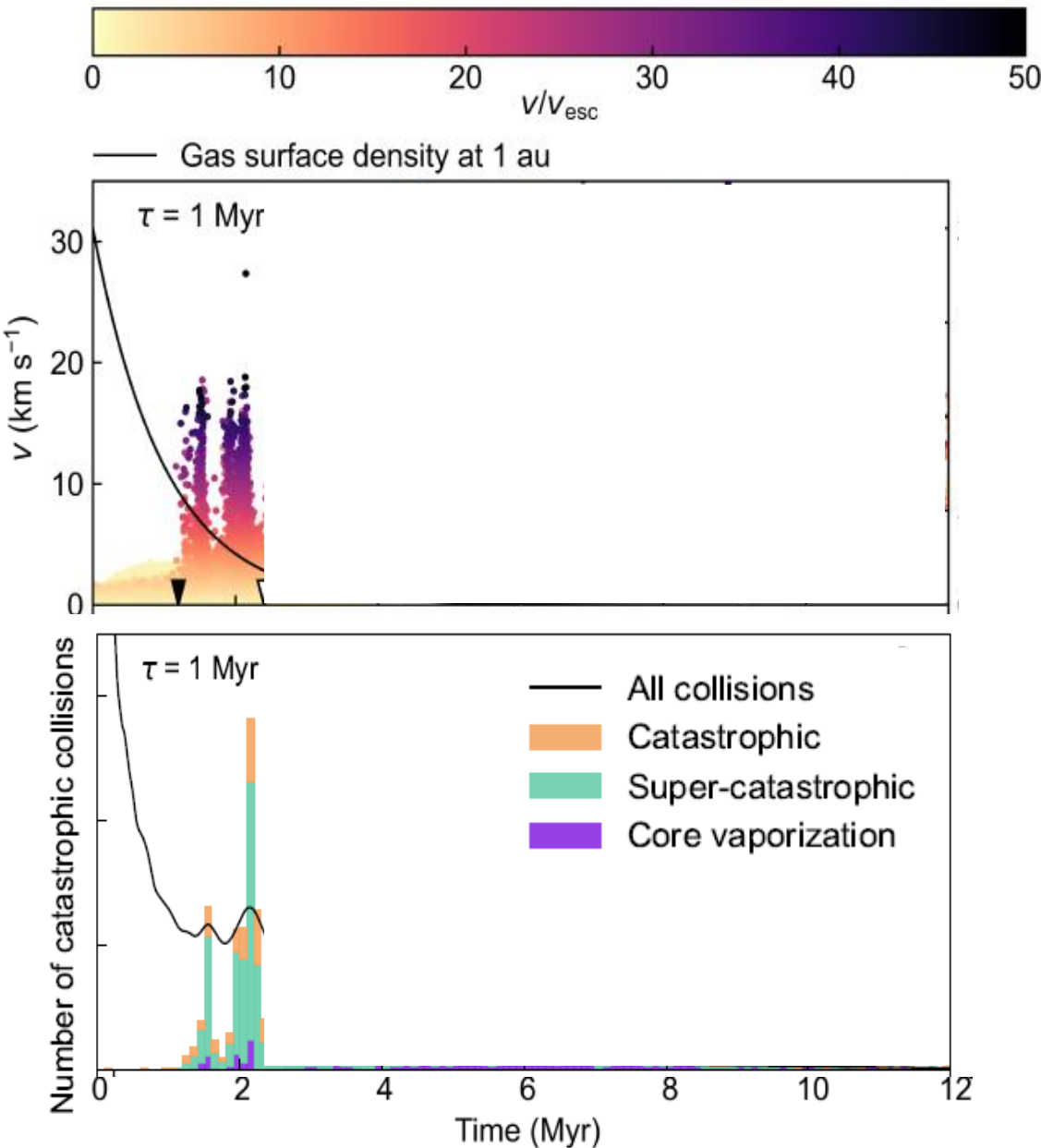
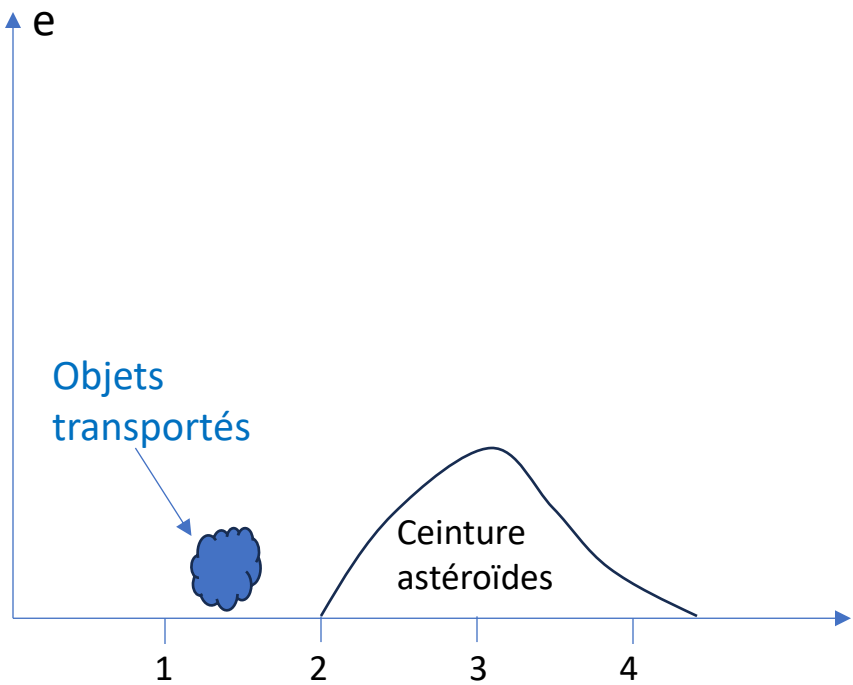
Conséquences collisionnelles



Shuai et al., 2026



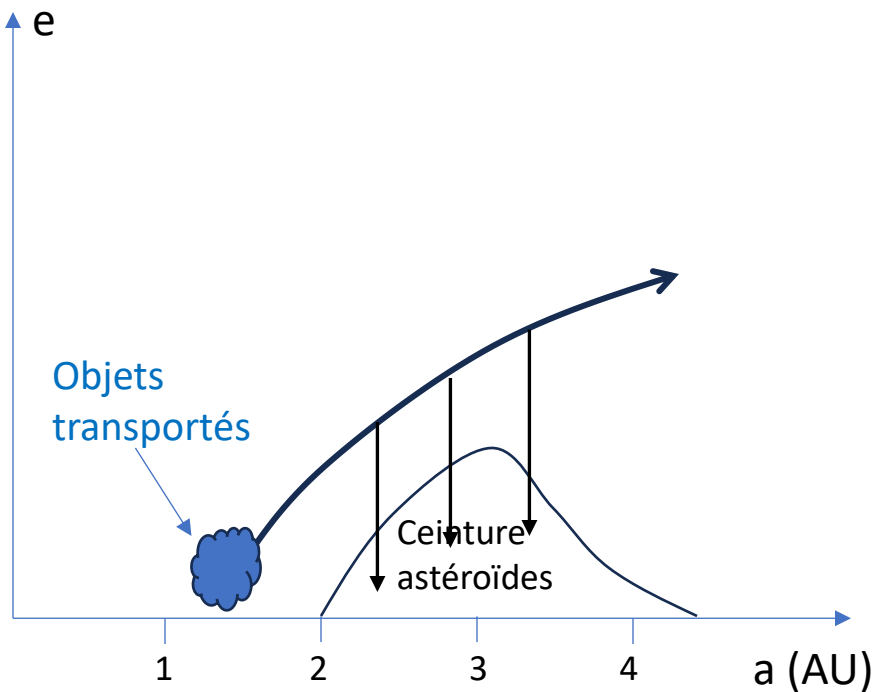
Conséquences collisionnelles



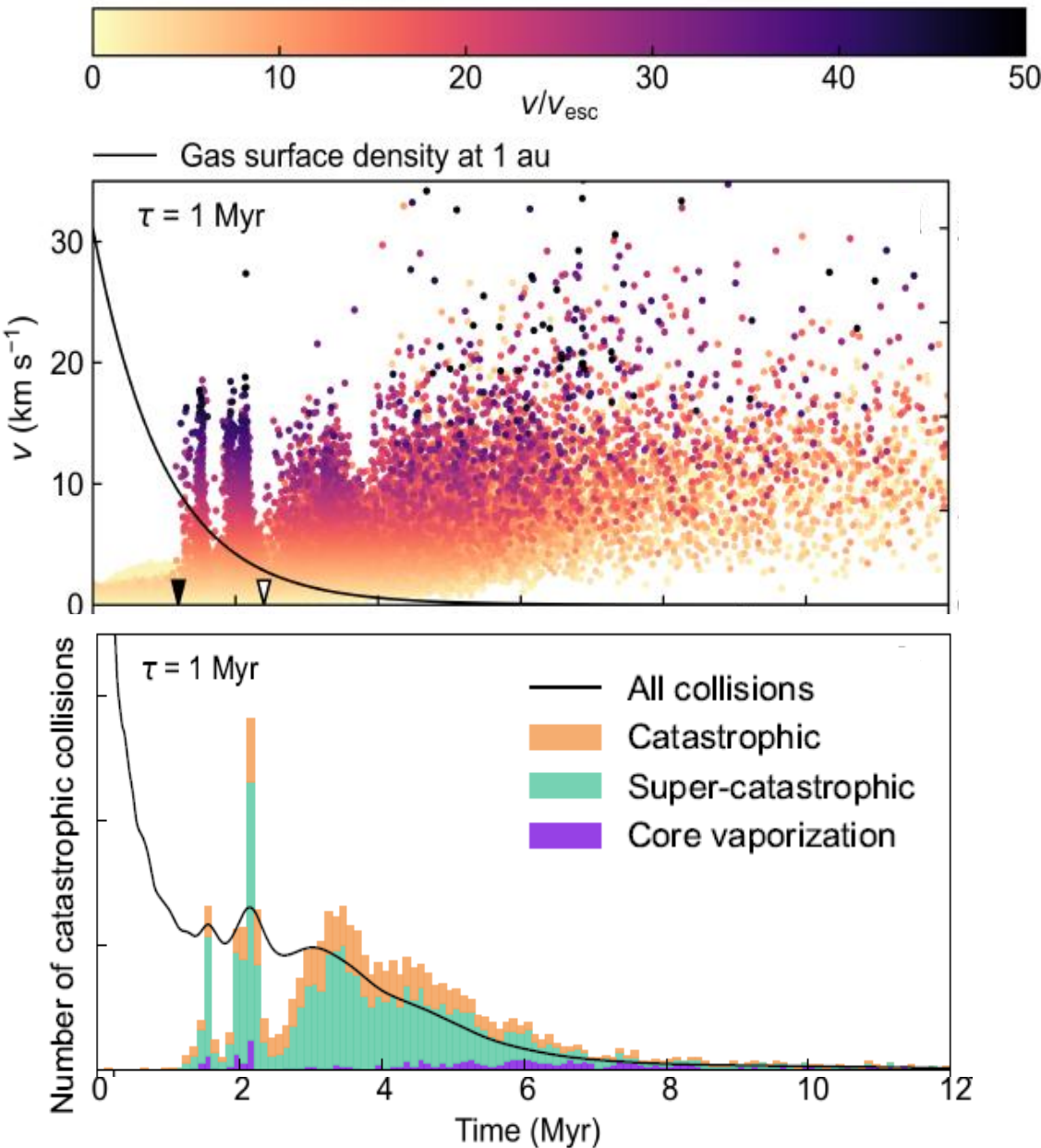
Shuai et al., 2026



Conséquences collisionnelles

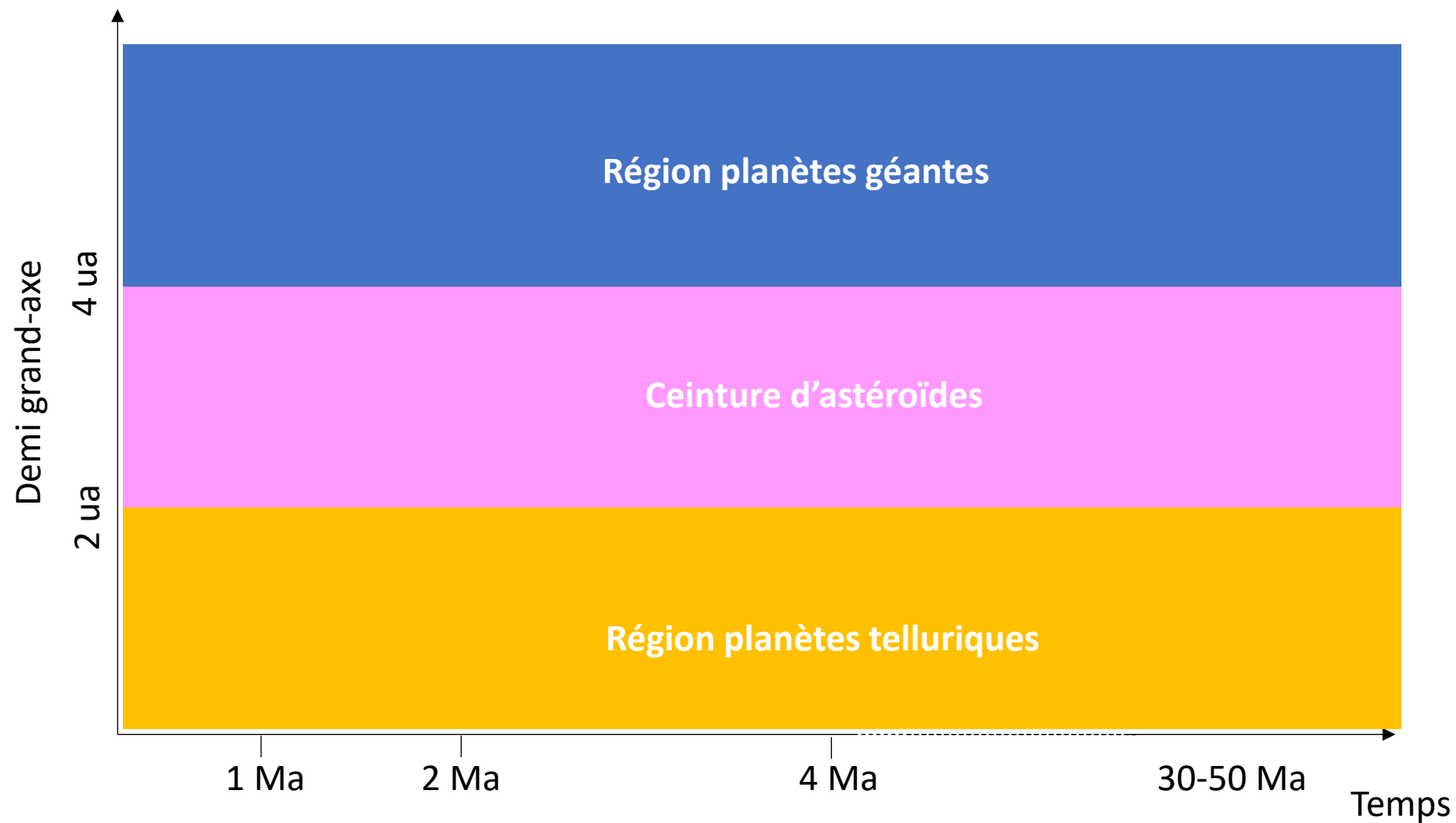


Shuai et al., 2026



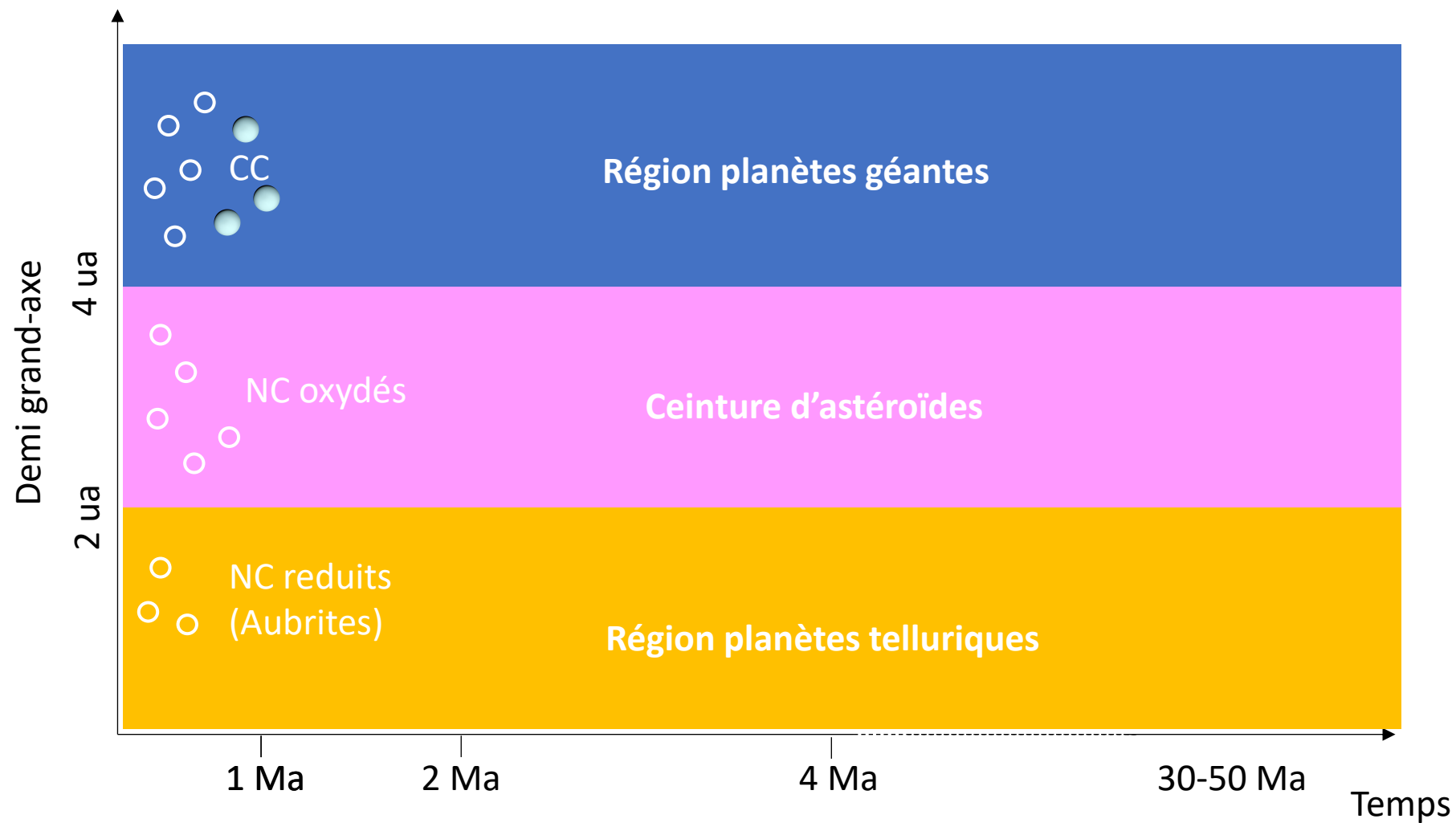


Un schéma des évènements



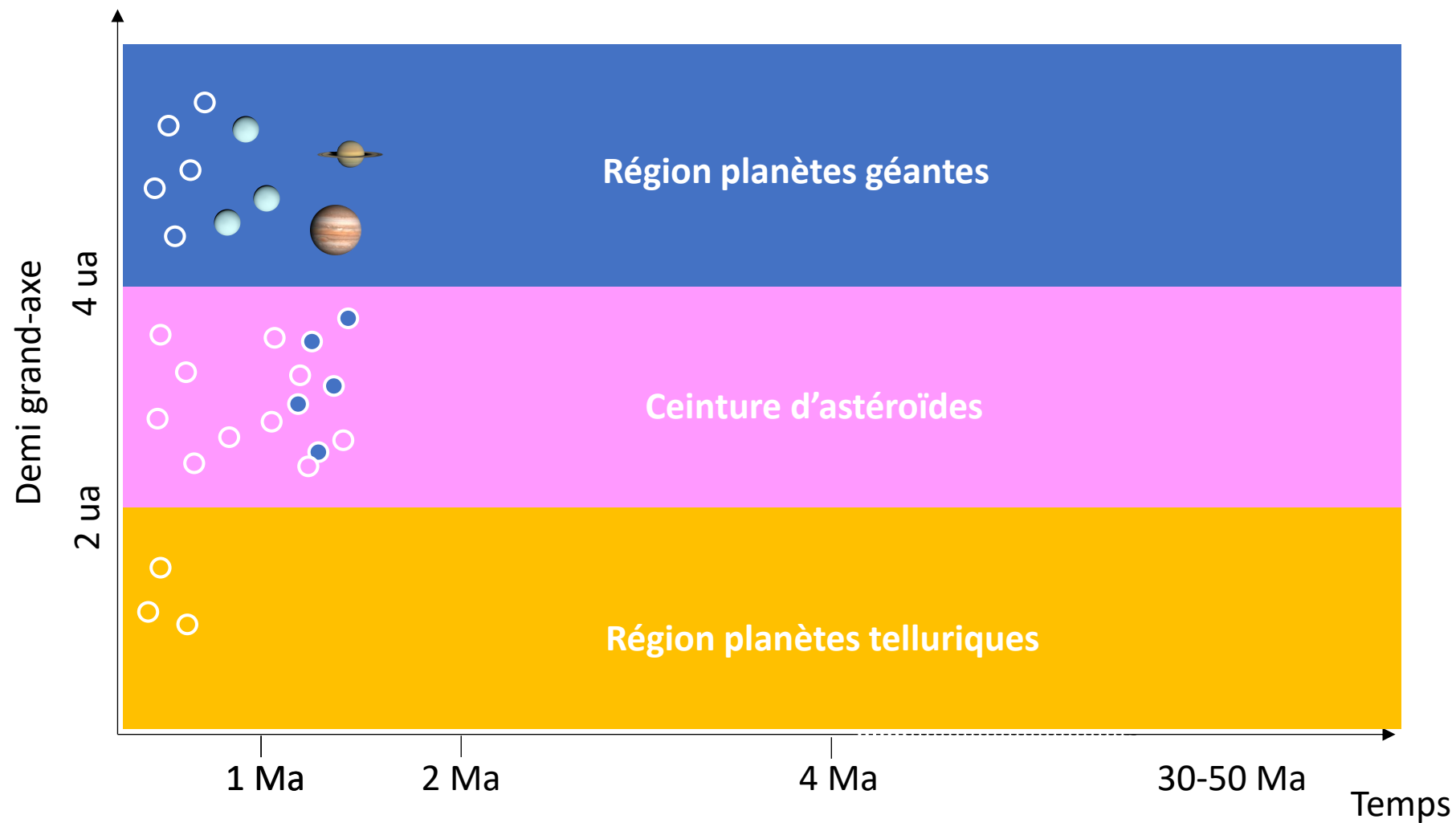


Un schéma des évènements



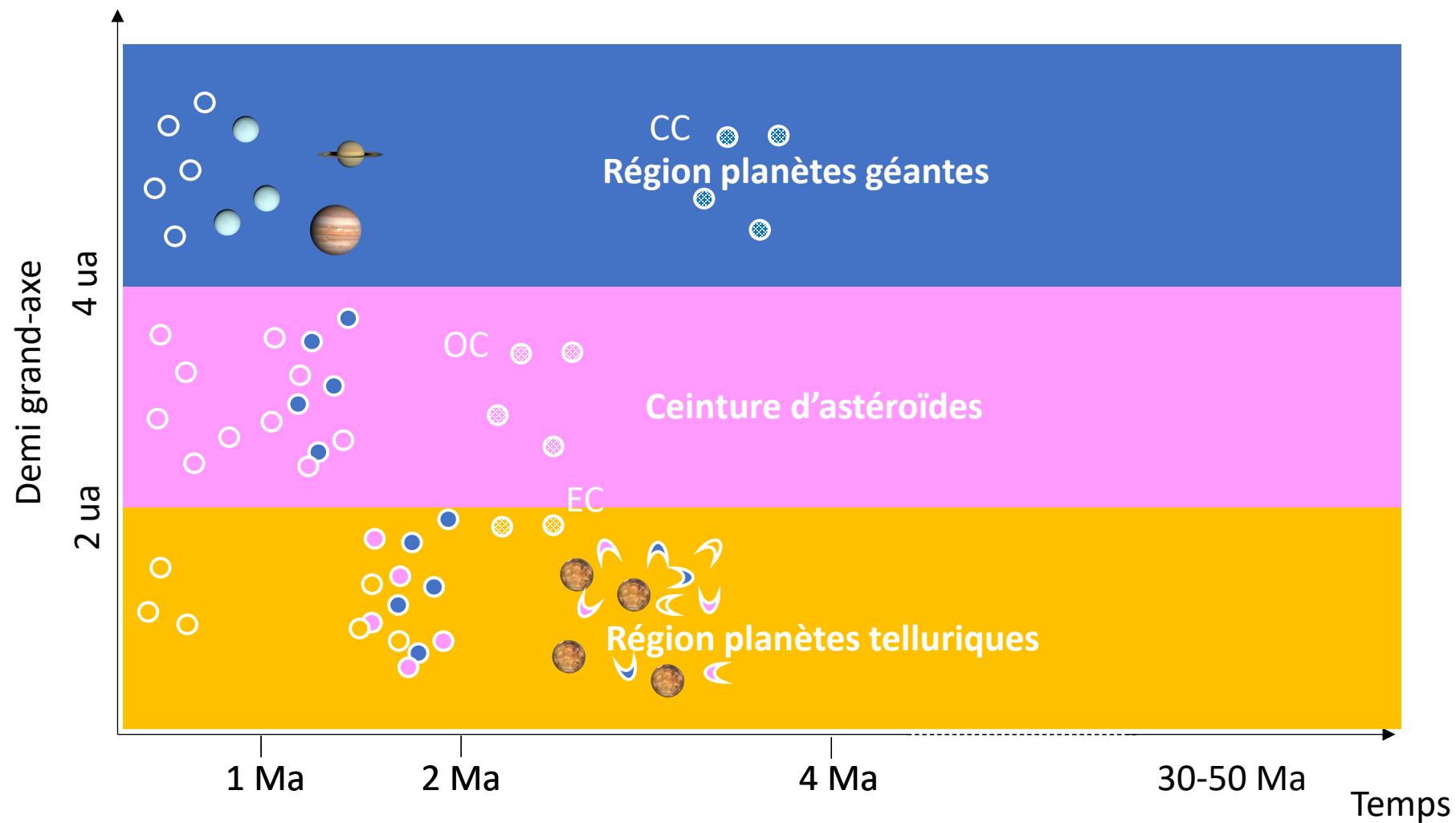


Un schéma des évènements



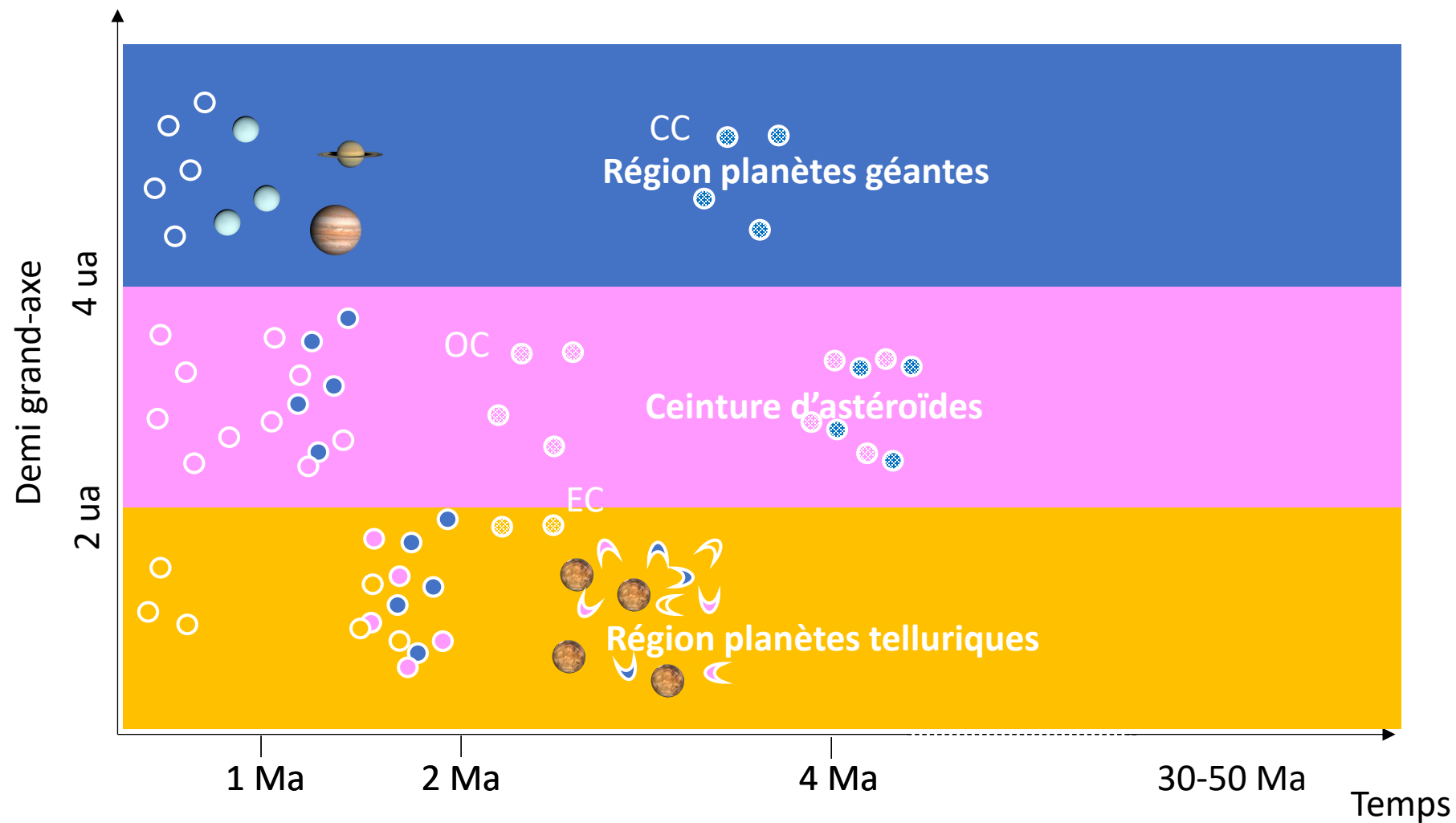


Un schéma des évènements



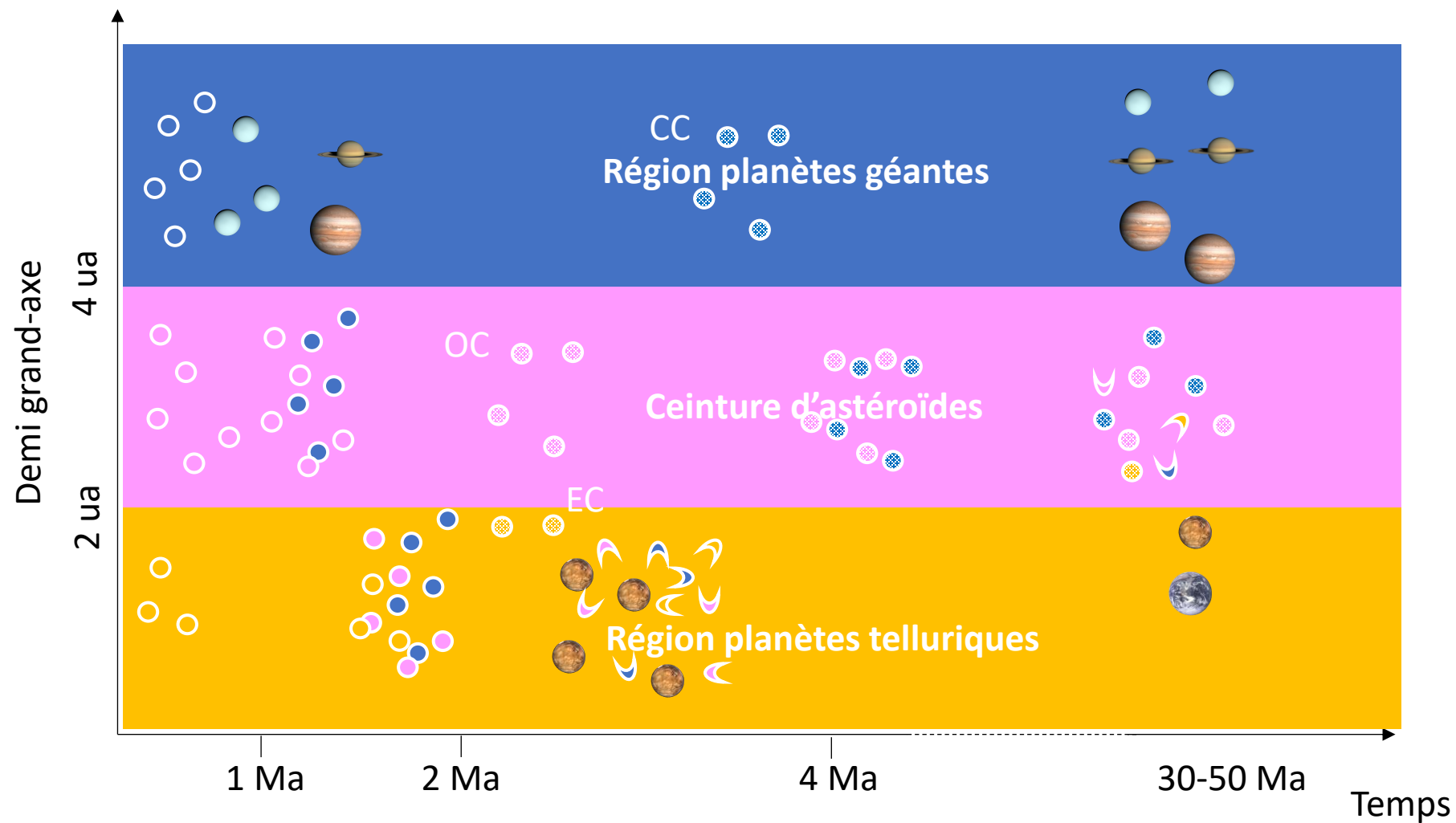


Un schéma des évènements



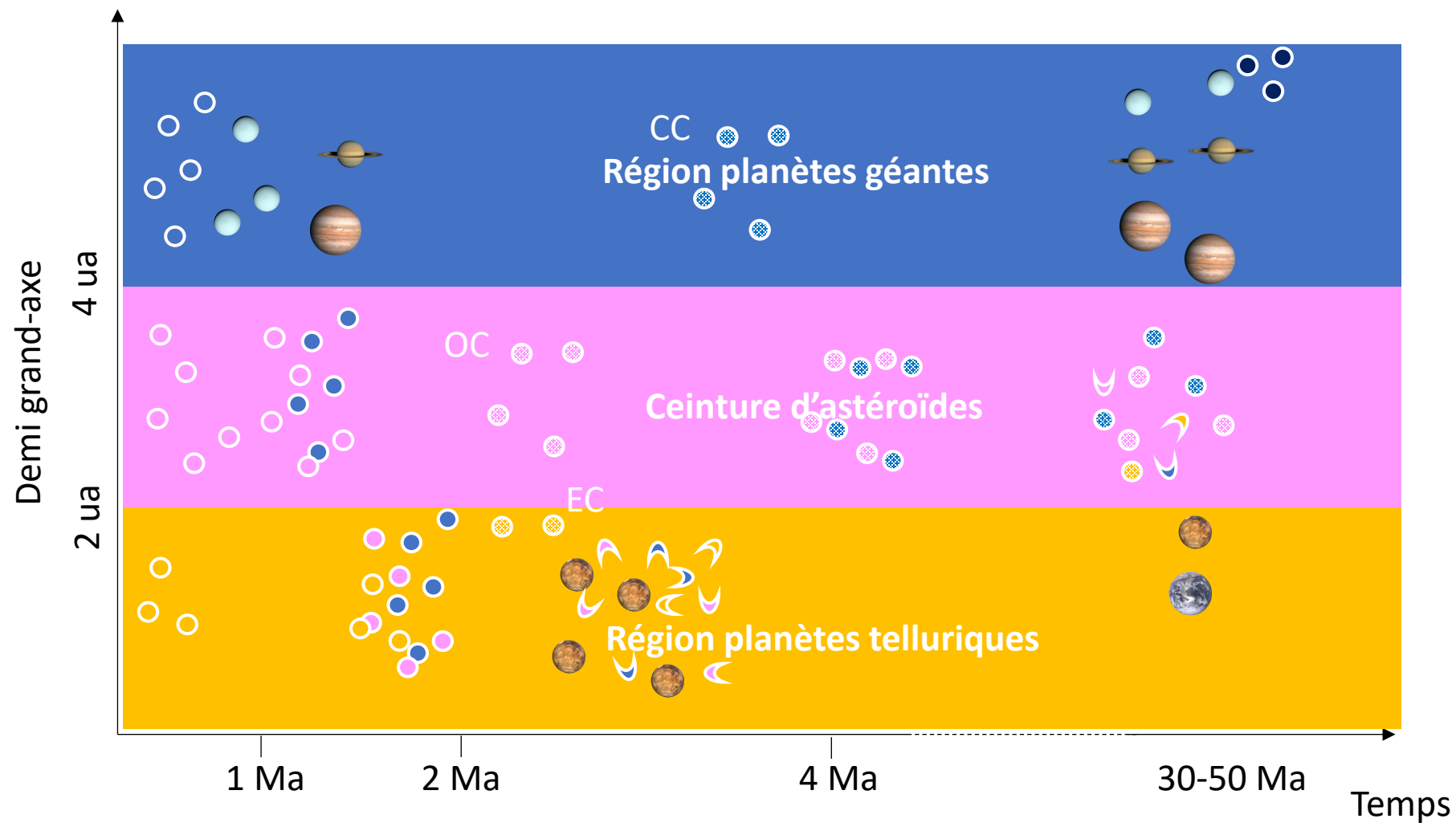


Un schéma des évènements





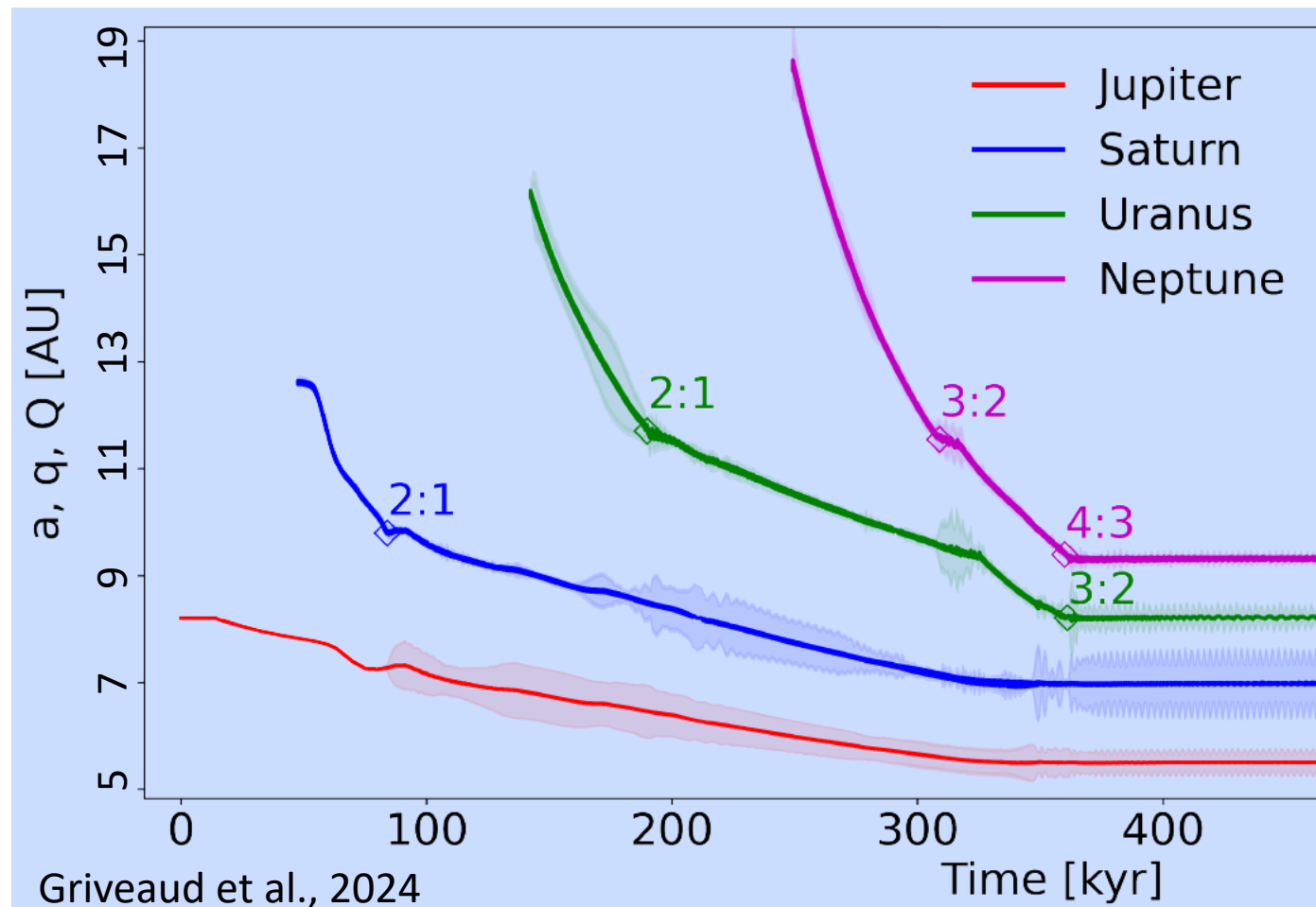
Un schéma des évènements





L'instabilité des planètes géantes

La migration planétaire au sein du disque de gaz amène les planètes dans une chaîne de résonances, ou elles arrêtent leur migration



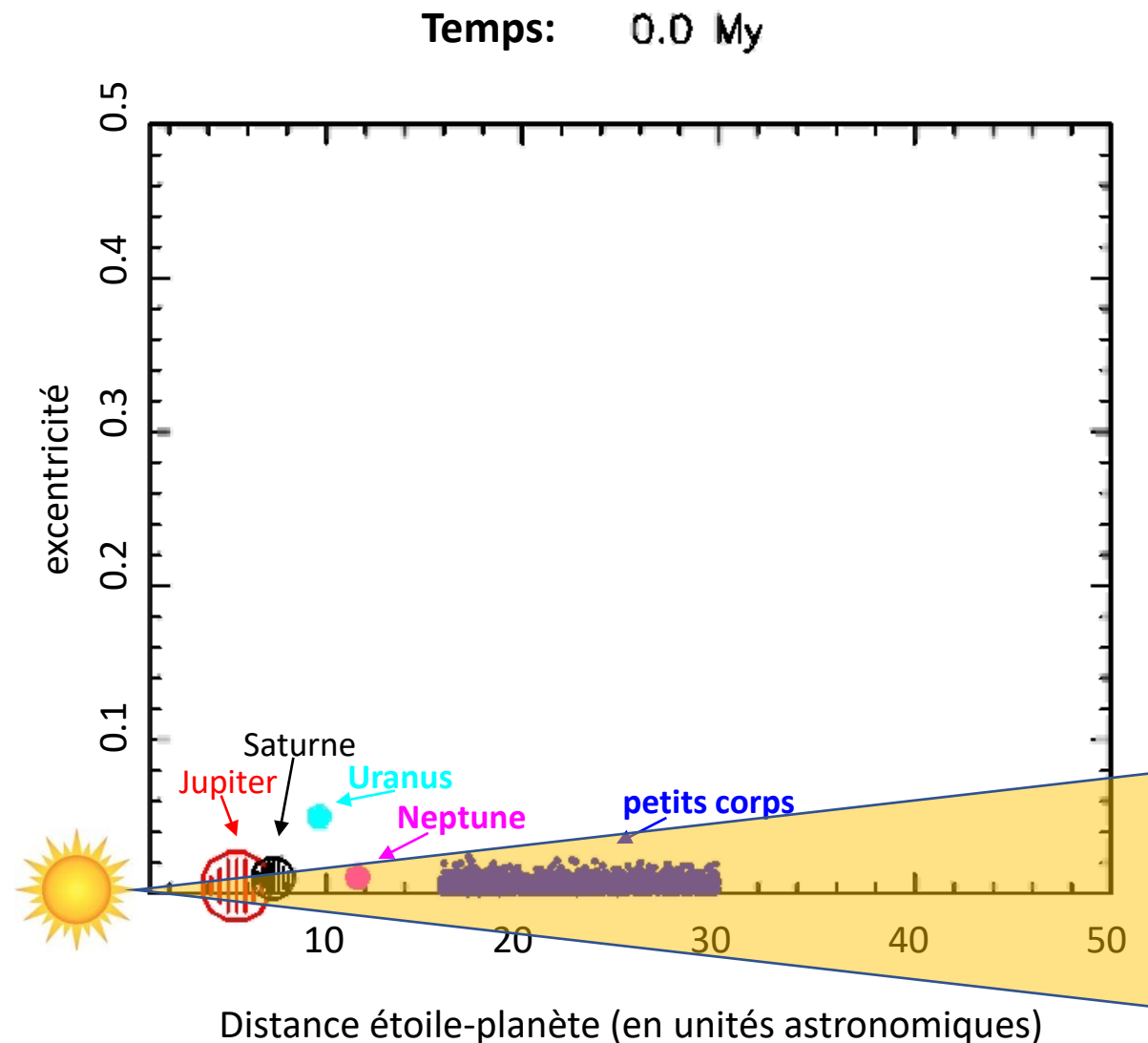


L'instabilité des planètes géantes

Les planètes ont donc une configuration orbitale différente de celle actuelle

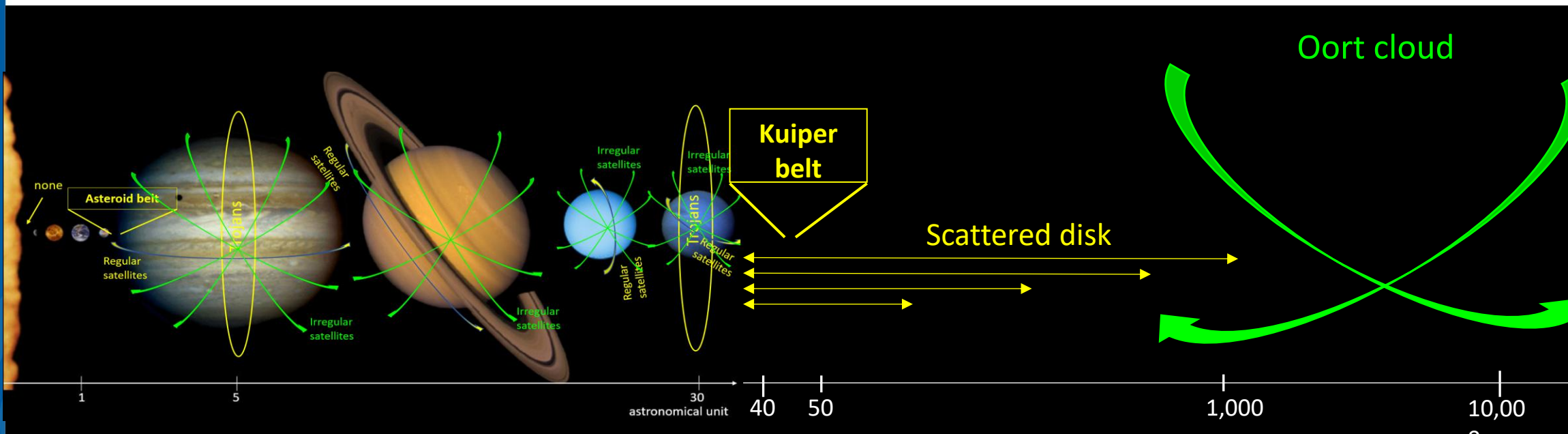
Un certain temps après la disparition du gaz, en interagissant avec un disque massif de planétésimaux trans-Neptuniens, elles finissent de devenir instables, ce qui change la configuration orbitale et disperse le disque

(Morbidelli et al., 2007; Nesvorny et Morbidelli, 2012; Nesvorny 2018; Griveaud et al., 2024)





Conséquences sur le Système solaire externe

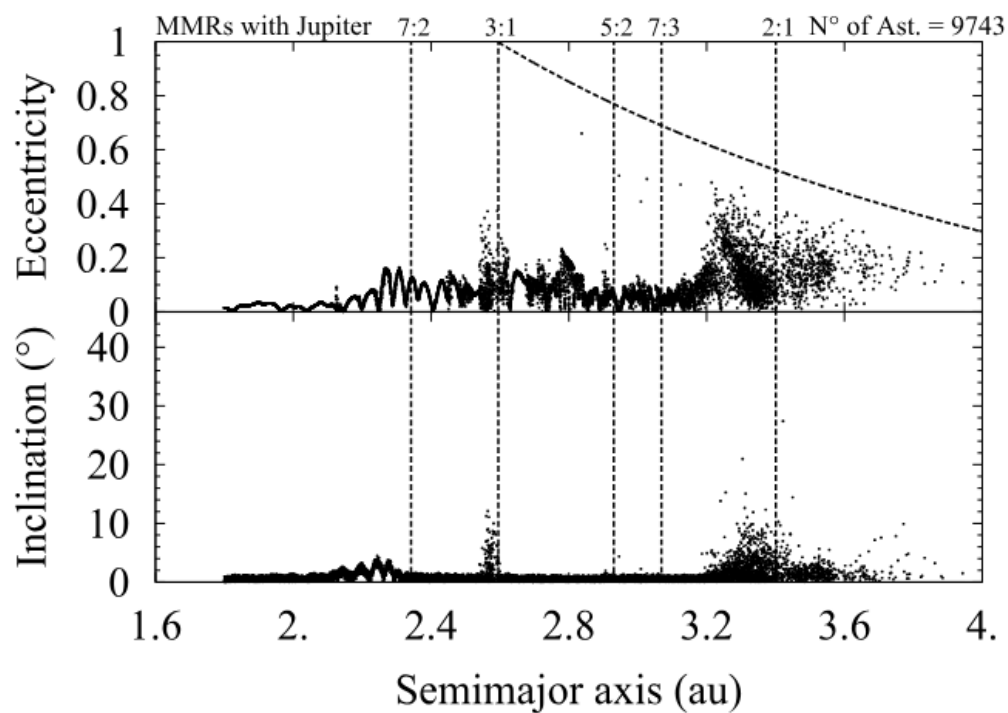




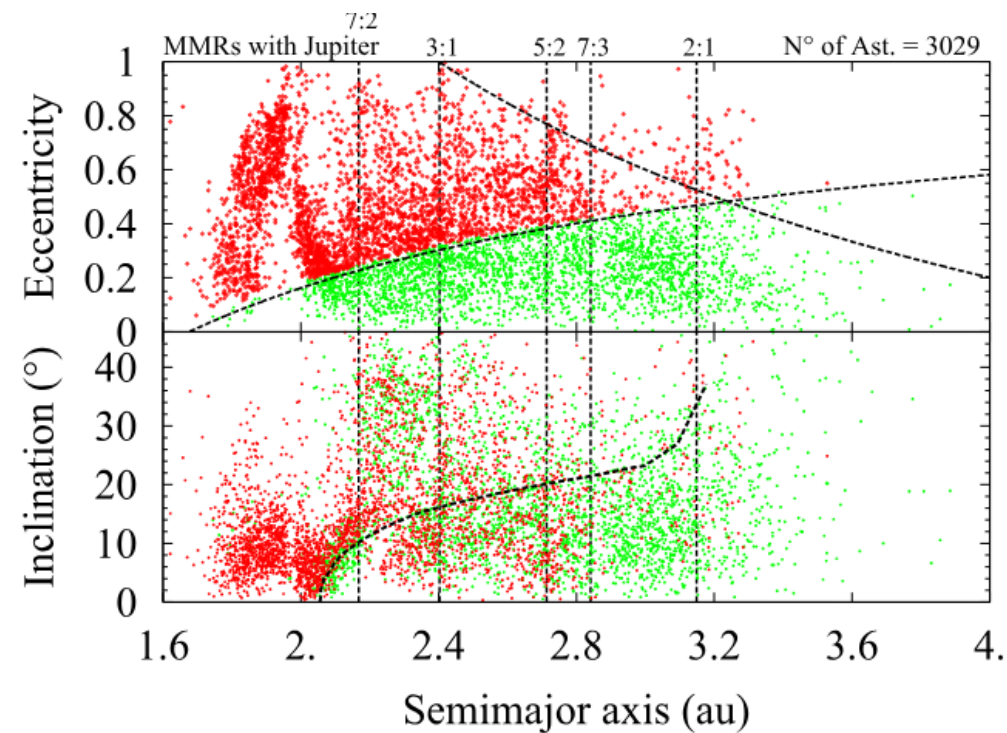
Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

I) Excitation orbitale

Avant l'instabilité



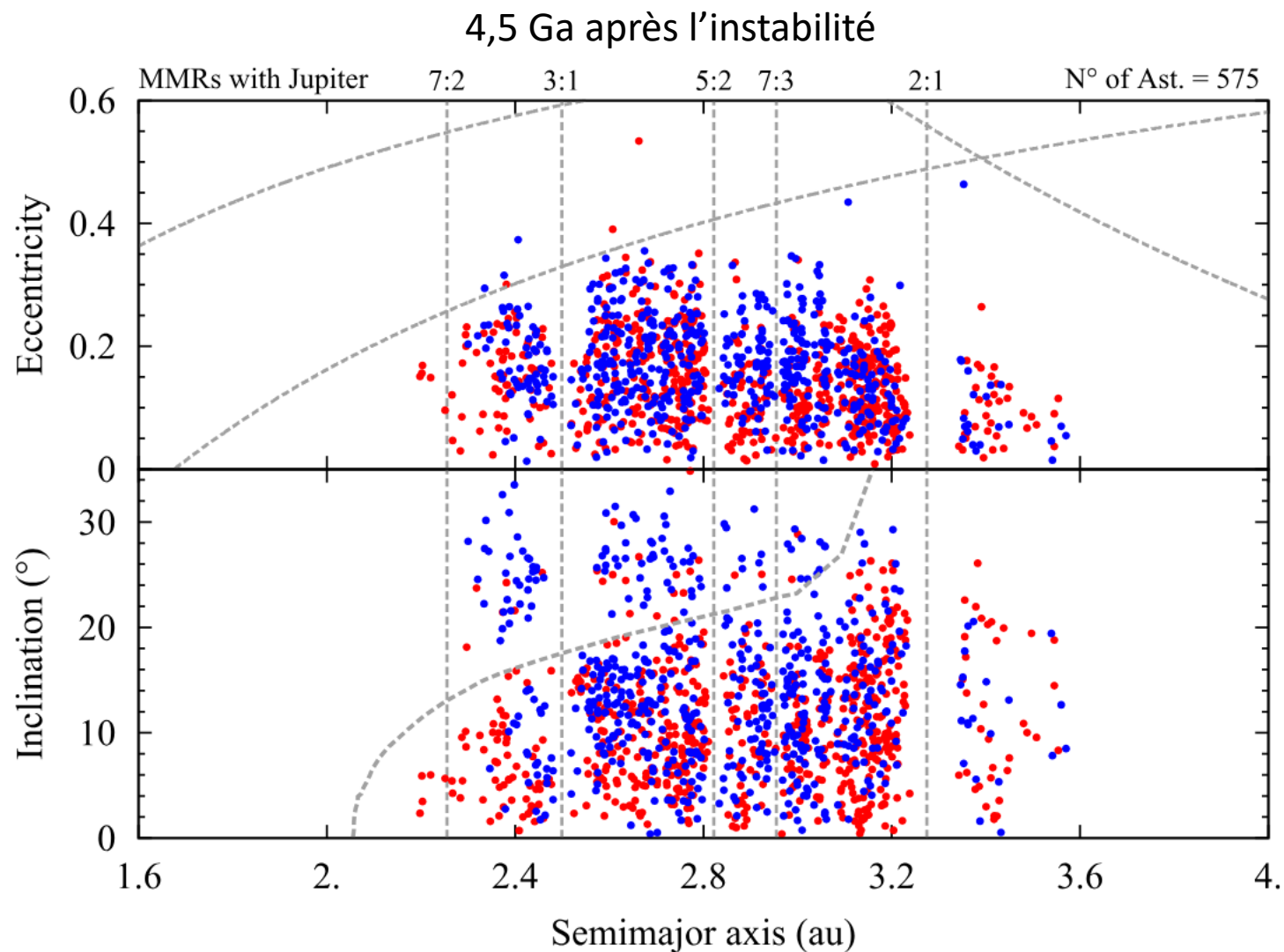
Juste après l'instabilité





Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

I) Excitation orbitale



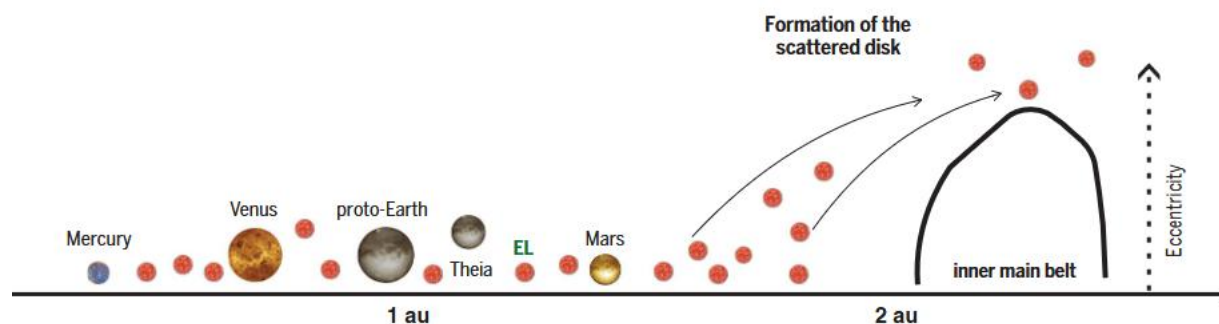
Deienno et al., 2018



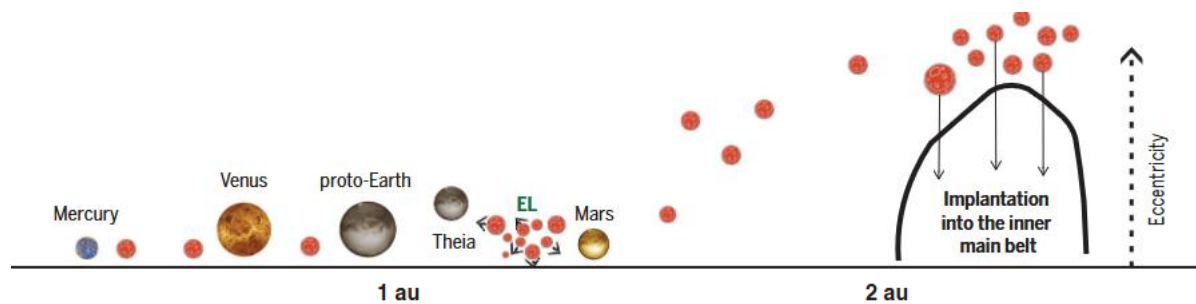
Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

II) Implantation d'objets depuis la région terrestre

Avant l'instabilité



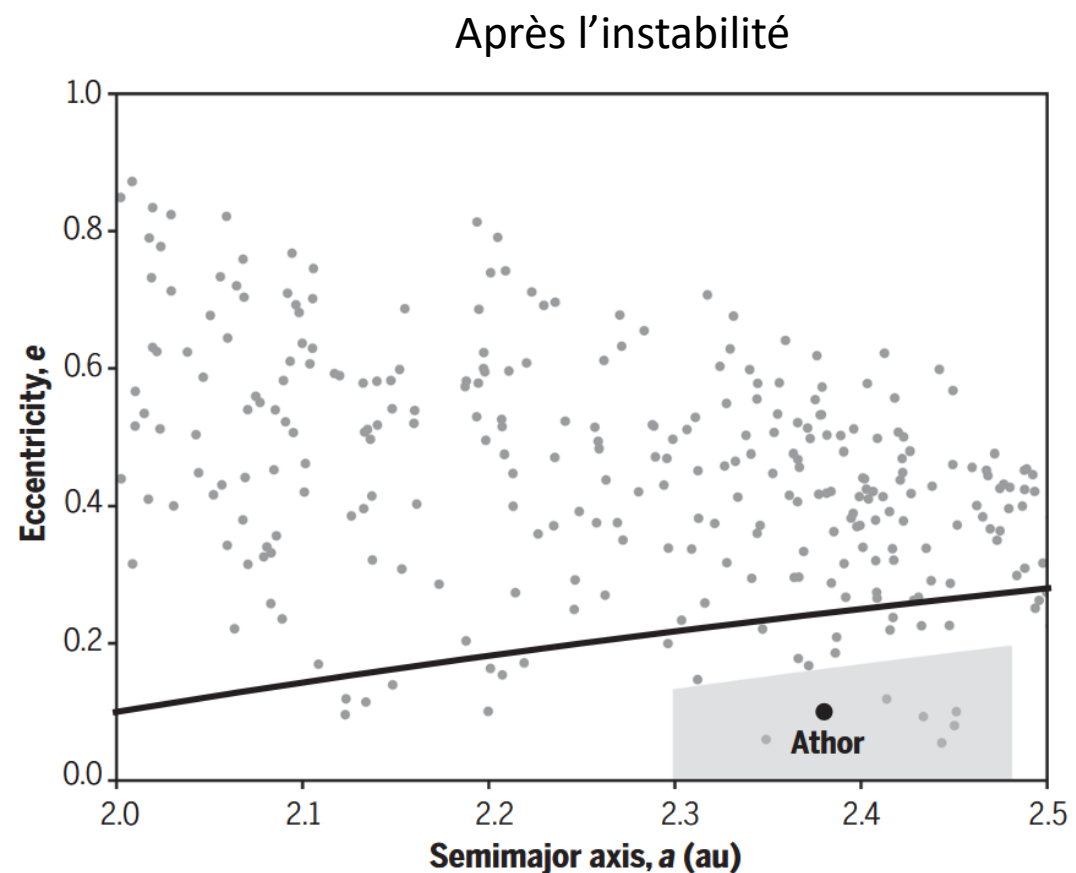
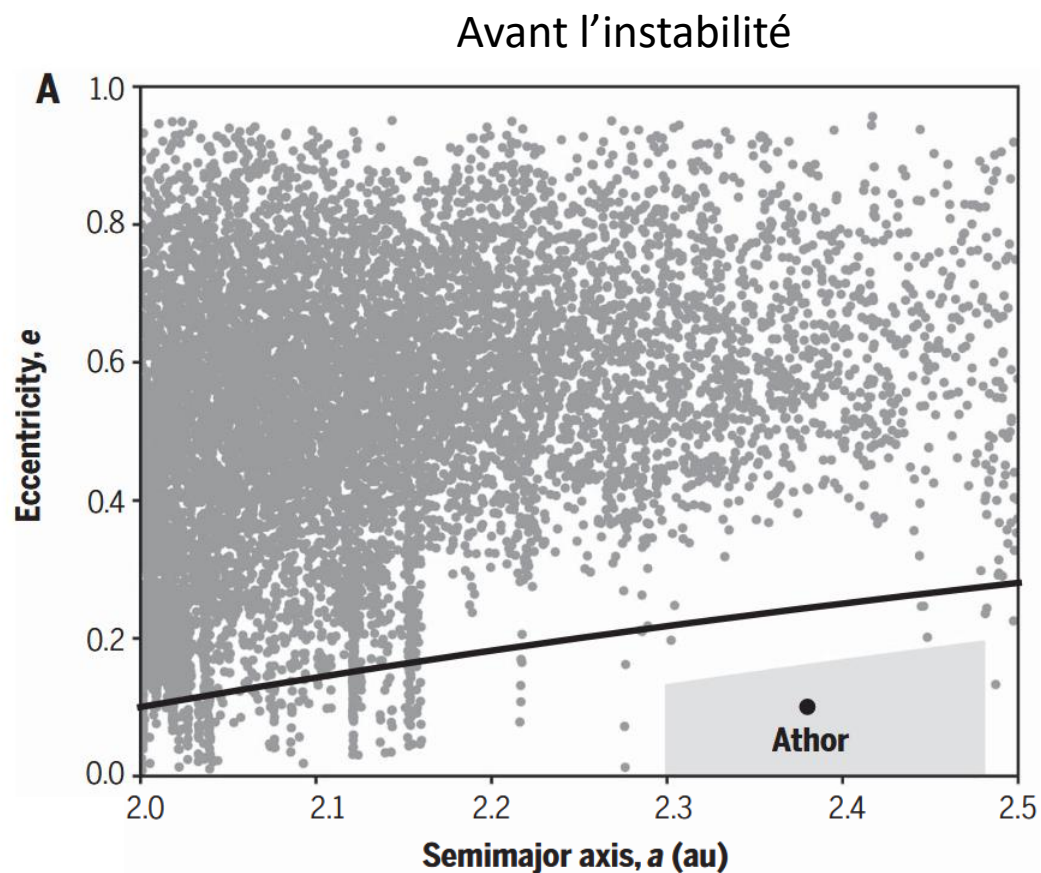
Après l'instabilité





Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

II) Implantation d'objets depuis la région terrestre

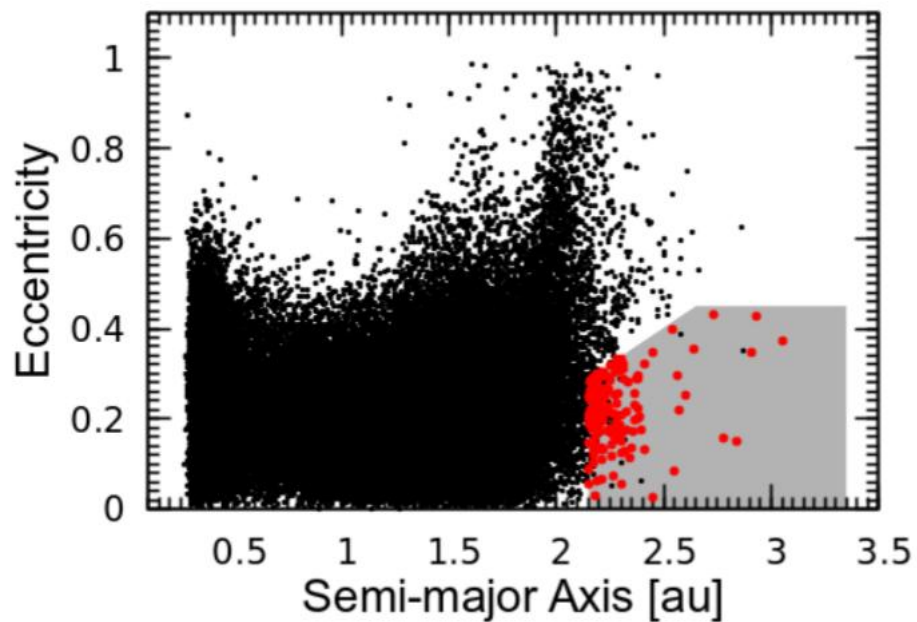




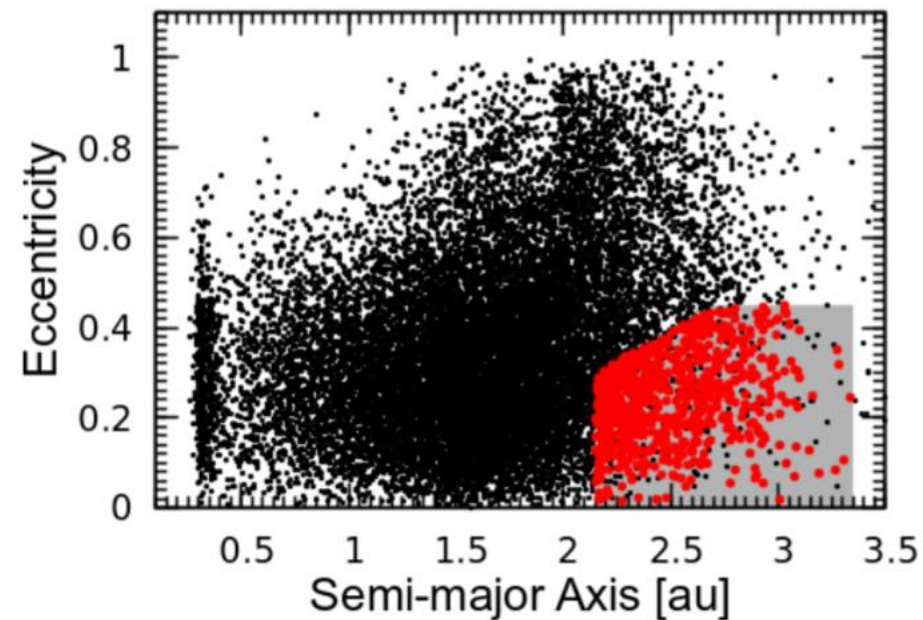
Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

II) Implantation d'objets depuis la région terrestre

Instabilité précoce (5Ma)



Instabilité tardive (50Ma)

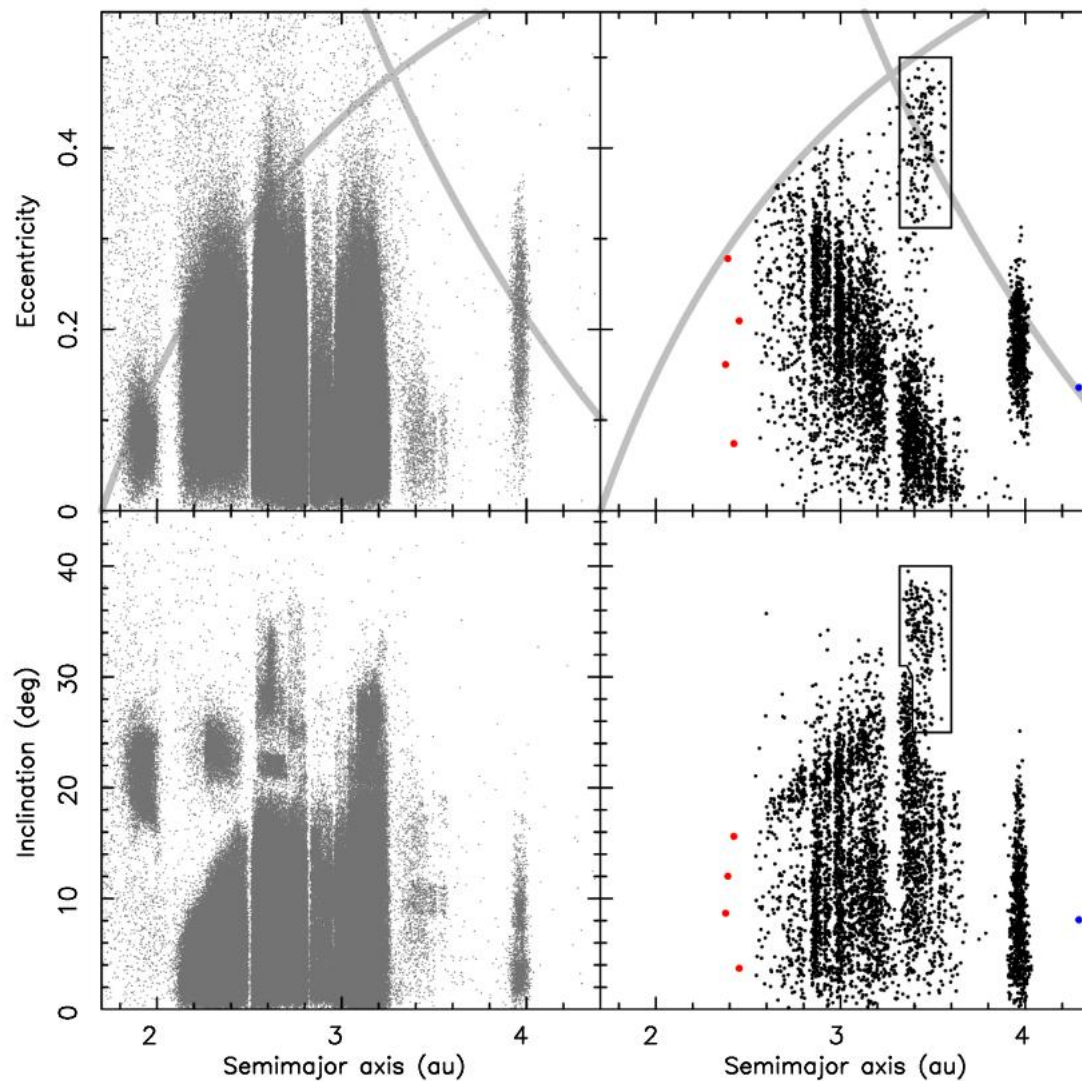




Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

III) Implantation d'objets depuis la région trans-Neptunienne (astéroïdes D et P)

Ceinture observée
(tout types spectraux)



Objets capturés depuis le
disque trans-Neptunien (D/P)



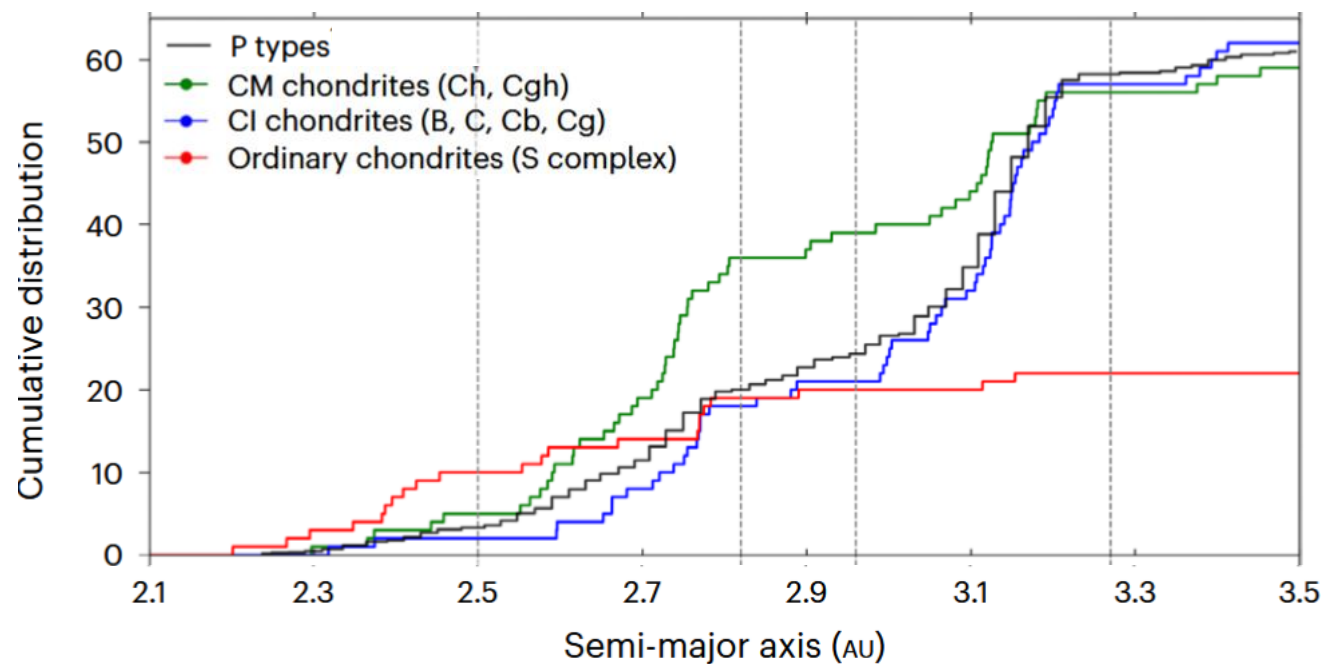
Conséquences sur la ceinture des astéroïdes

Implantation des corps parents des météorites CI?

Anderson et al. (2025) remarquent que la distribution en demi grand axe des astéroïdes dont le spectre est compatible avec une nature CI est essentiellement la même de celle des astéroïdes P/D, implantés depuis le disque trans-Neptunien.

Ils proposent donc que les CIs aussi soient trans-Neptuniennes, implantées pendant l'instabilité des planètes géantes.

Quid de la dichotomie CI – comètes?





BONUS

L'environnement du Soleil naissant

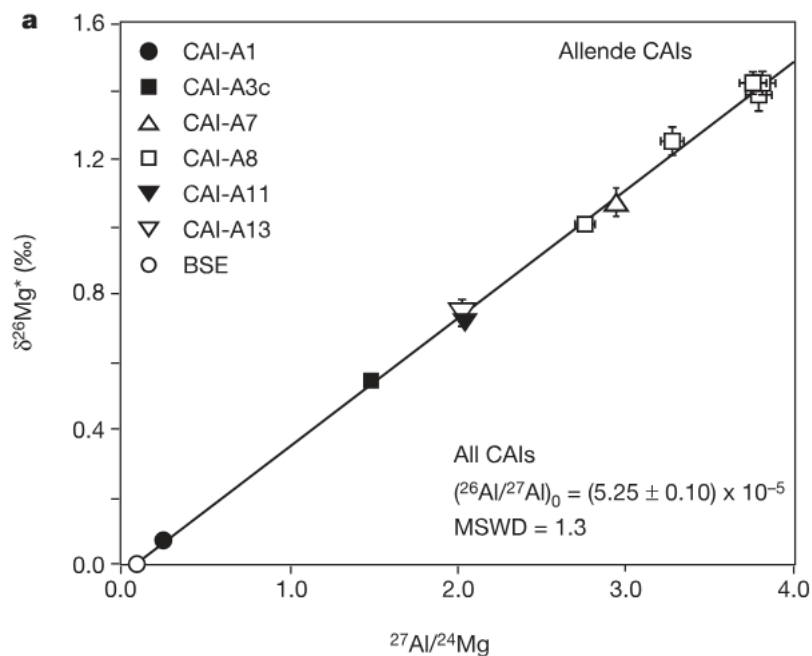


Radioactivités à courte période

^{26}Al demi-vie= 0,7 Ma

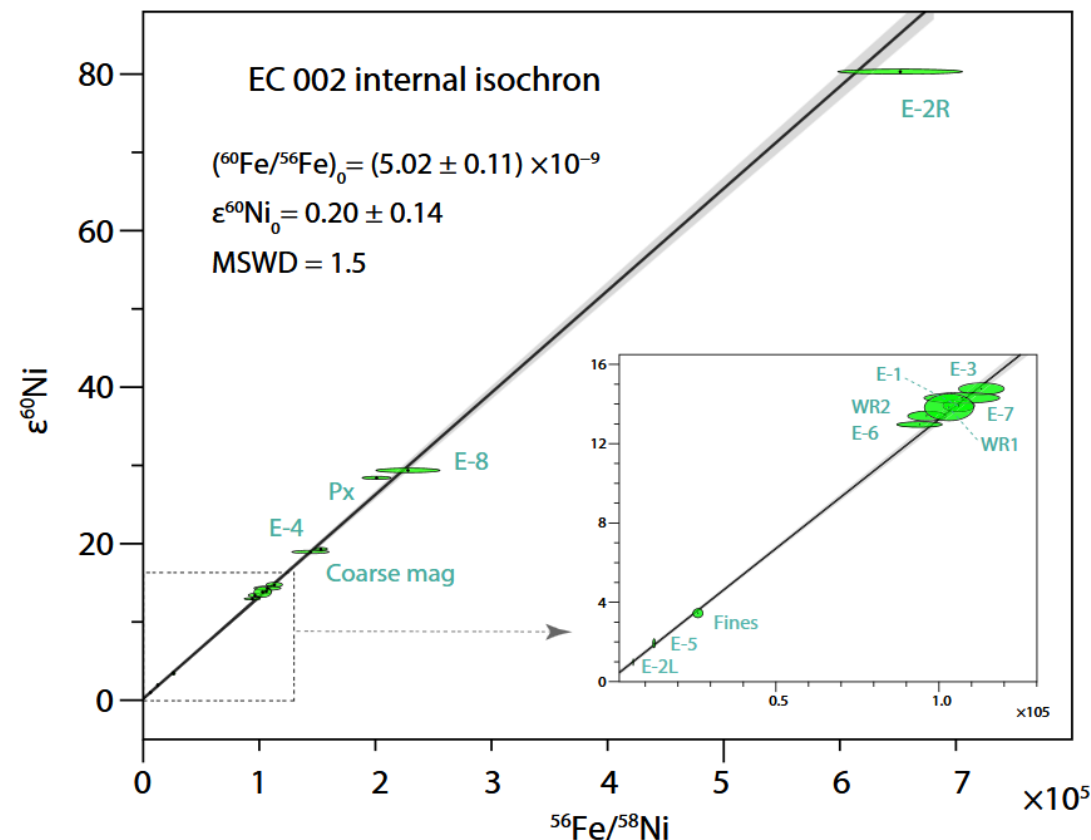
^{60}Fe demi-vie=2,6Ma

CAI : abondance initiale de ^{26}Al



Bizzarro et al.,2004

abondance de ^{60}Fe dans ERG Chech 002



Fang et al.,2025

En considérant un âge de cristallisation de EC002 de 1.62 Ma, le rapport $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ à l'époque de formation des CAIs était $(7.71 \pm 0.47) \times 10^{-9}$ (Fang et al., 2025). Tang et Dauphas (2015) estimèrent $11.57 \pm 2.6 \times 10^{-9}$. Pour comparaison, les valeurs moyens du fond galactique sont $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 3 \times 10^{-6}$ et $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = 3 \times 10^{-7}$.



Pas de supernova

Le faible rapport initial $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ exclue l'hypothèse classique (Cameron et Truran, 1977) que l'effondrement gravitationnel qui a induit à la naissance du Soleil a été engendré par l'explosion d'une supernova à proximité.

Une supernova produisant $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}=5\times 10^{-5}$ produirait $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} \sim 10^{-6}$ (Meyer, 2005)

Ceci n'est pas en contradiction avec l'origine par les supernovæ des anomalies nucléosynthétiques des éléments du group de Fe, car ces éléments sont stables et peuvent avoir été produit par des supernovæ ayant explosé il y a longtemps



Étoiles Wolf-Rayet

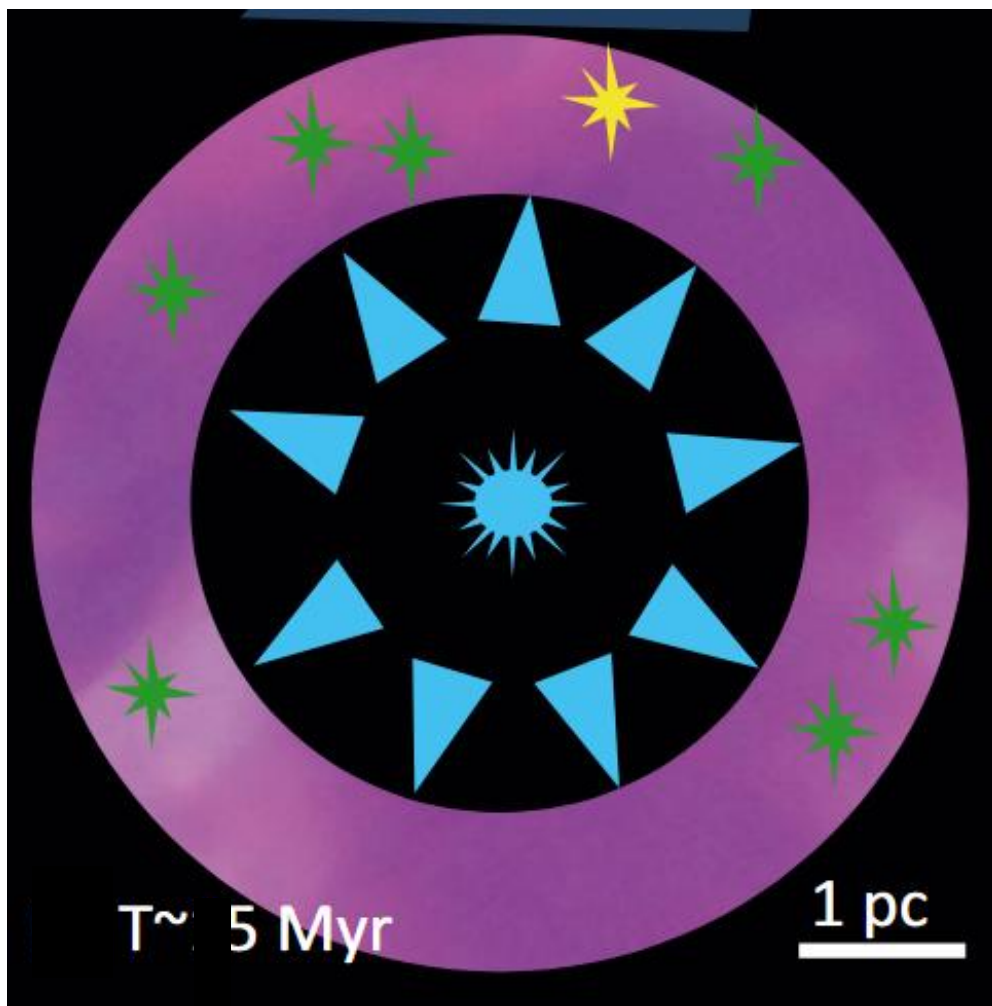
Découvertes en 1867 à l'Observatoire de Paris, elles sont des étoiles de plusieurs dizaines de masses solaires qui, après quelques millions d'années seulement, expulsent la matière entourant leurs noyaux sous forme de vents stellaires à haute vitesse

Elles injectent dans le milieu interstellaire du ^{26}Al , mais pas du ^{60}Fe

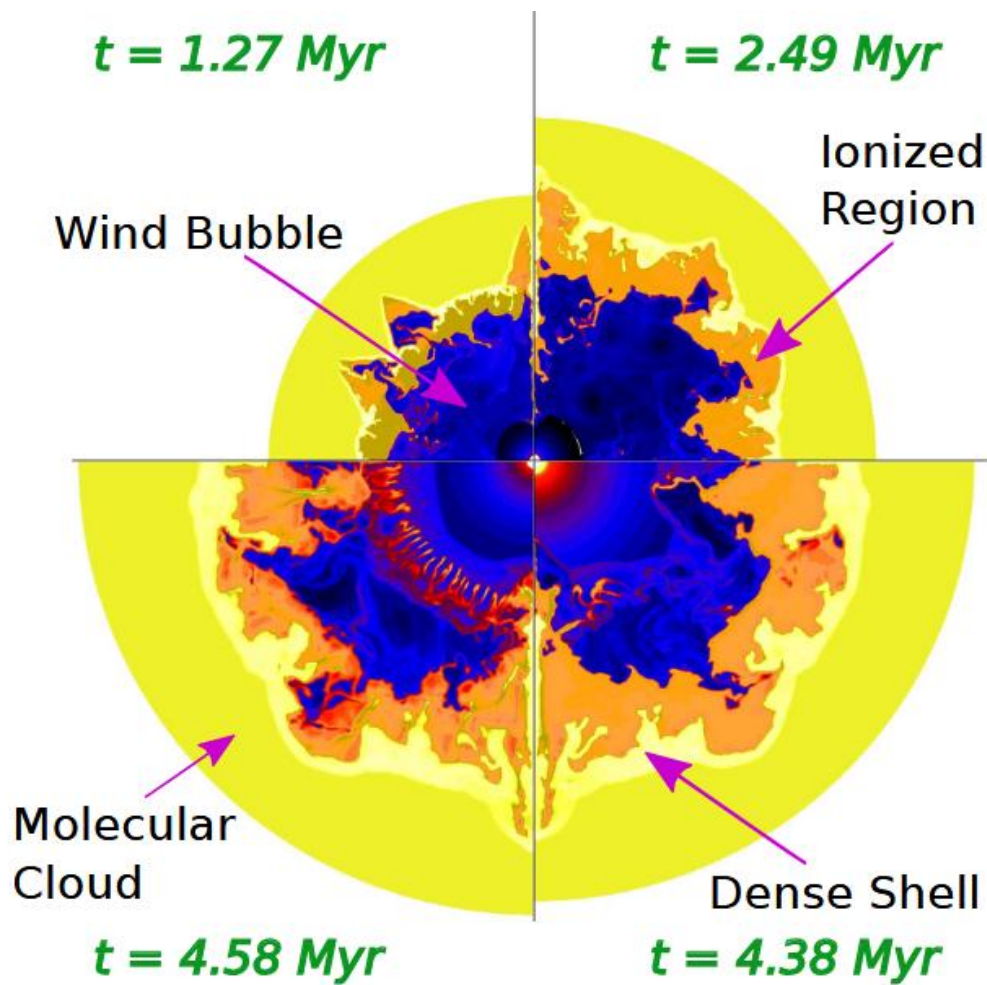




Insémination du ^{26}Al par une étoile Wolf-Rayet



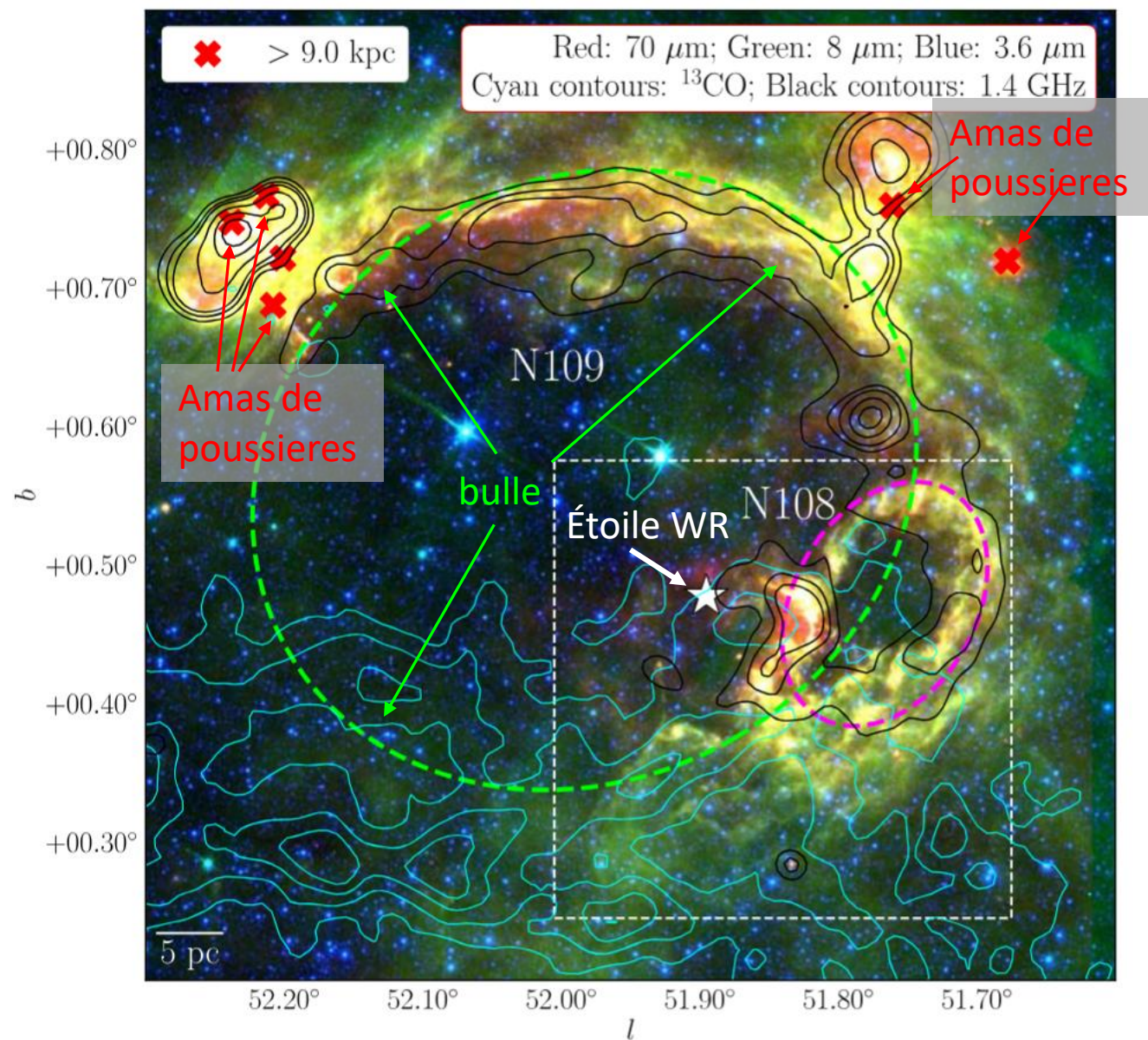
Gounelle et Meynet, 2006



Dwarkadas et al., 2018



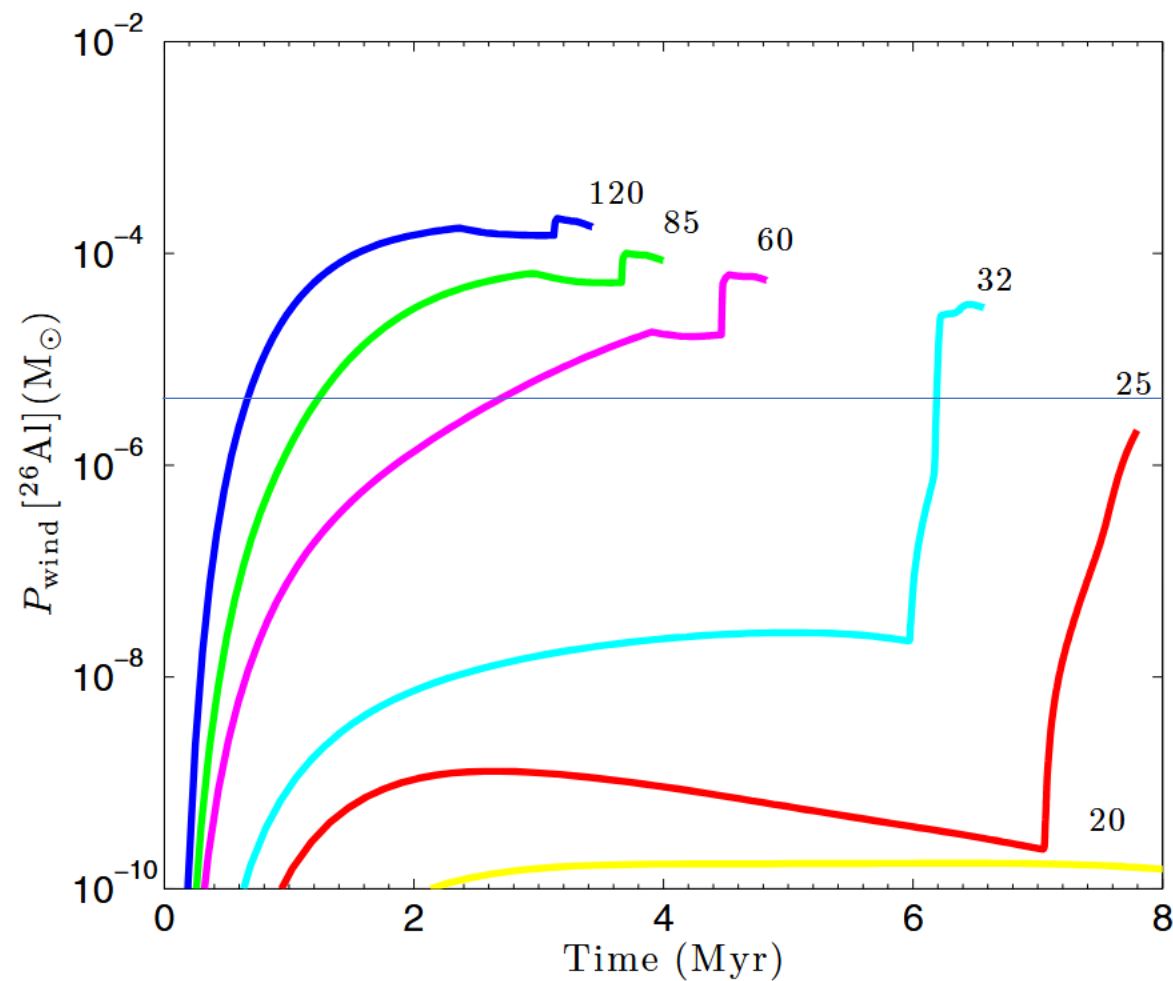
Observations



Baug et al., 2019



Quelle étoile pour le Système solaire?

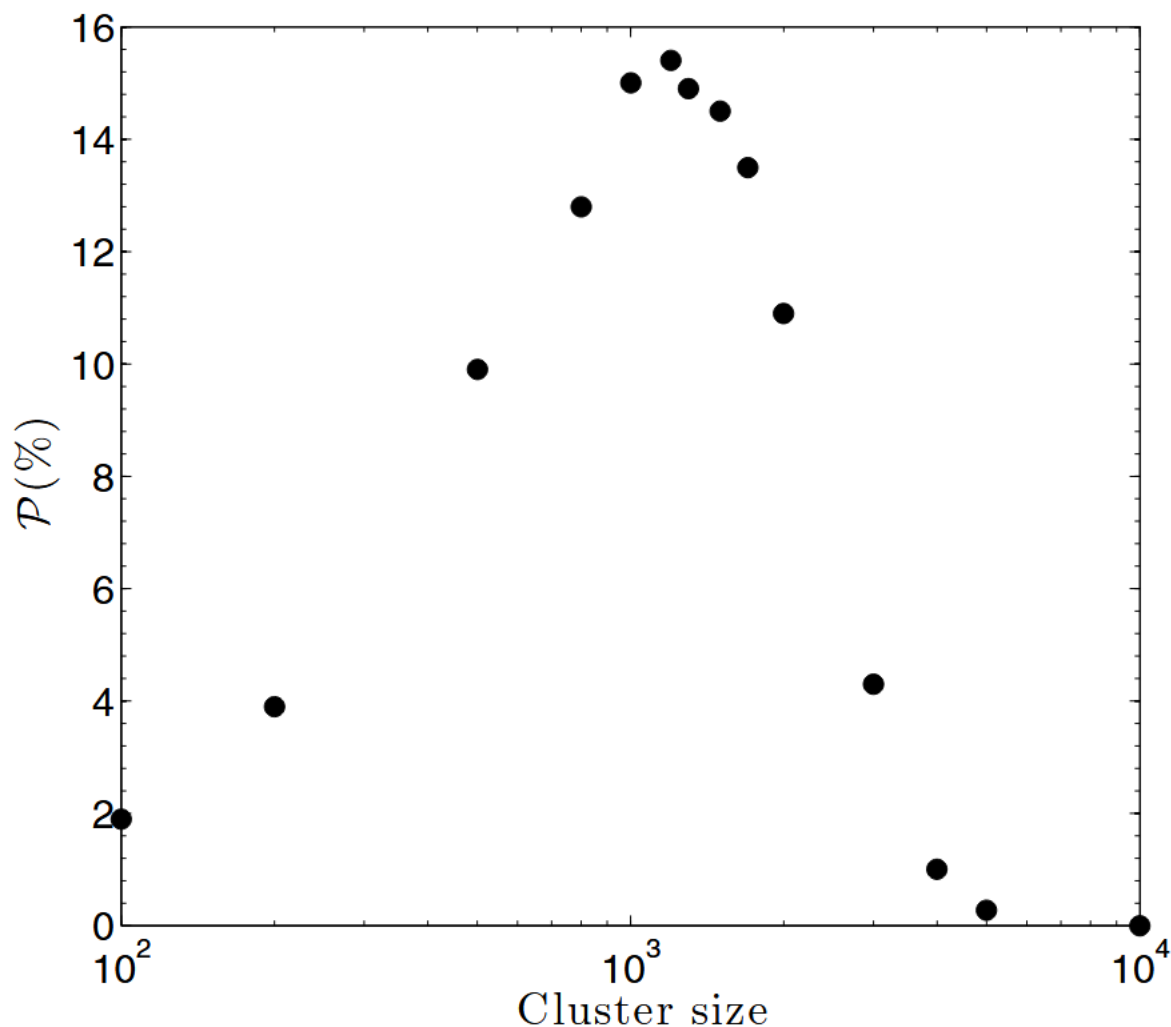


Concentration du ^{26}Al du Système solaire si le vent est intercepté par une coquille de 1,000 masses solaires

Gounelle et Meynet, 2006



Amas stellaire propice à l'existence d'une étoile W-R



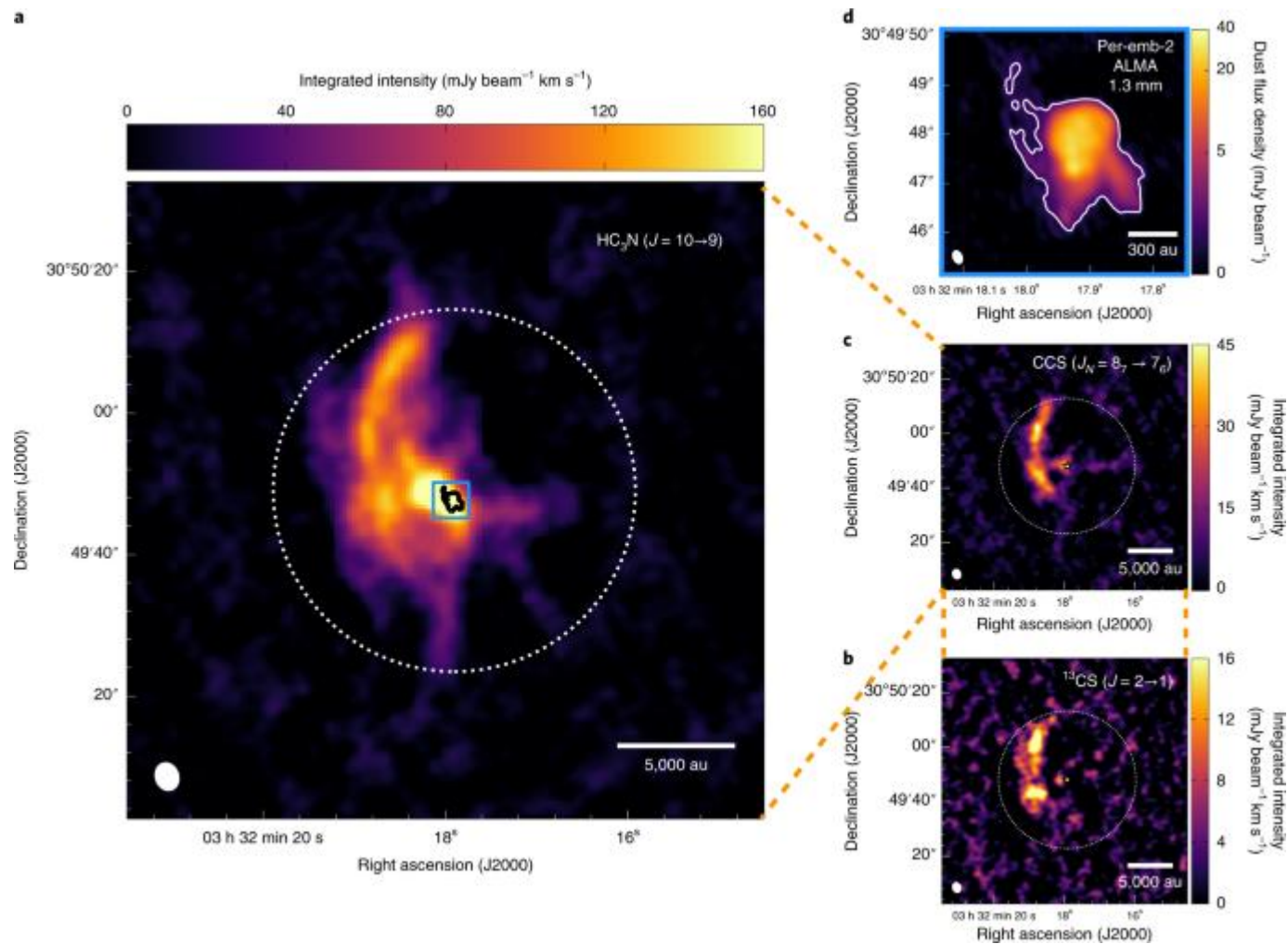
Un amas stellaire d'un millier d'étoiles est compatible avec la structure du Système solaire externe (distance de rencontres stellaires) et la durée du disque vis-à-vis de la photo-évaporation par irradiation externe (Adams et al., 2010; (Desch et Miret-Roig 2024)

Gounelle et Meynet, 2006





Apport de matériel tardif au disque protoplanétaire (late streamer)





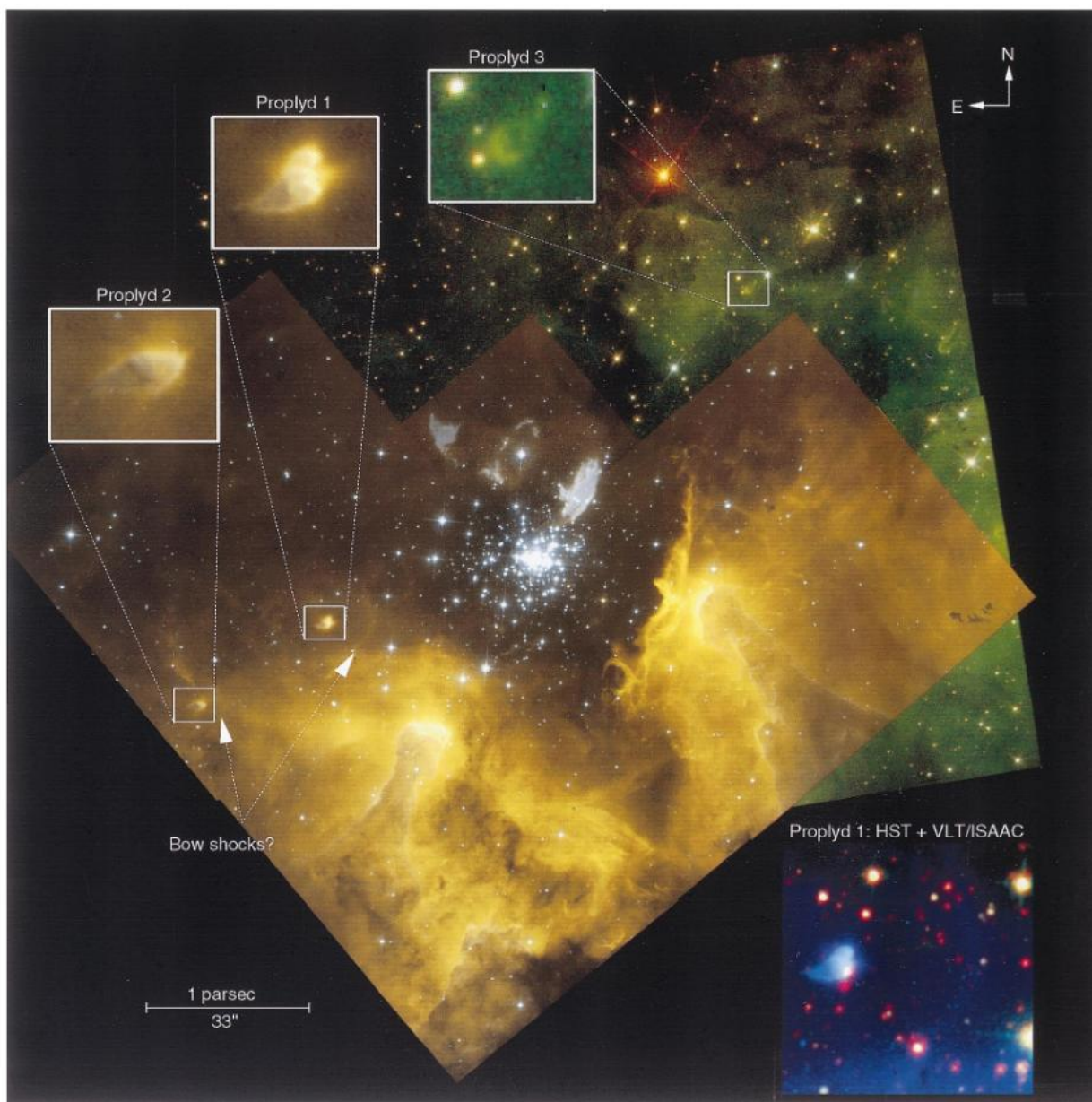
Un “late streamer” pour le Système solaire?

Non, car:

- Il n'y a pas de différence systématique dans les propriétés isotopiques entre les achondrites (échantillons de planétésimaux formés tôt) et les chondrites (échantillons de planétésimaux formés tardivement) dans chacune des classes NC et CC, ce qui indique qu'aucun nouveau matériau n'a été livré entre les deux périodes de formation des planétésimaux.
- Le passage du matériau solaire au matériau NC pendant la formation du disque s'est produit très tôt, avant la formation des premiers planétésimaux et donc ne peut pas être du à l'apport tardif de nouvelle matière.
- Le matériau incorporé dans les planétésimaux CC provenant de la partie externe du disque est plus proche de la composition solaire que le matériau incorporé dans les planétésimaux NC provenant de la partie interne du disque. C'est exactement le contraire de ce à quoi on pourrait s'attendre si un matériau exotique avait été apporté par un courant qui, compte tenu de son grand moment cinétique par rapport à l'étoile, alimente principalement le disque externe.
- Les huit planètes et la ceinture de Kuiper froide se trouvent toutes à quelques degrés d'un plan unique, orthogonal au moment cinétique total du système. Cela exclut tout désalignement du disque protosolaire jusqu'à au moins 45 au.



La bulle créée par l'étoile WR aurait pu isoler le Système solaire du milieu



NGC 3603

20 étoiles de type O et WR

Brandner et al., 2000

Voir: Desch & Miret-Roig 2025



A retenir

- L'histoire de la ceinture des astéroïdes est complexe
- L'injection des planétésimaux CC (différenciés ou pas) se fait en deux phases
- Les premiers planétésimaux (différenciés) formés ou implantés dans la ceinture des astéroïdes ont été déplacés dans la région de formation des planètes telluriques par le balayage des résonances séculaires à la disparition du gaz.
- C'était l'environnement propice à leur destruction collisionnelle
- Certains fragments, petits et nombreux, ont été réimplantés dans la ceinture après
- Les corps parents des chondrites ordinaires sont probablement les seuls objets à se former dans la ceinture des astéroïdes et l'avoir jamais quittée
- L'instabilité des planètes géantes est responsable de l'excitation dynamique dans la ceinture, la capture des fragments des corps différenciés, la capture d'objets trans-Neptuniens (type spectral P/D)
- Le Système solaire ne s'est pas formé à cause de l'explosion d'une supernova à proximité
- En revanche il s'est formé sur le bord d'une bulle créée par une étoile WR, qui l'a protégé de l'apport tardif de matière, qui aurait fortement perturbé le disque