

UN MODÈLE DE NICE CONSTRUIT À PARTIR D'UN DISQUE PROTOSOLAIRE À FAIBLE VISCOSITÉ

Philippine Griveaud

Observatoire de la Côte d'Azur
Max-Planck Institut für Astronomie

RÉSUMÉ

PARTIE I: Introduction

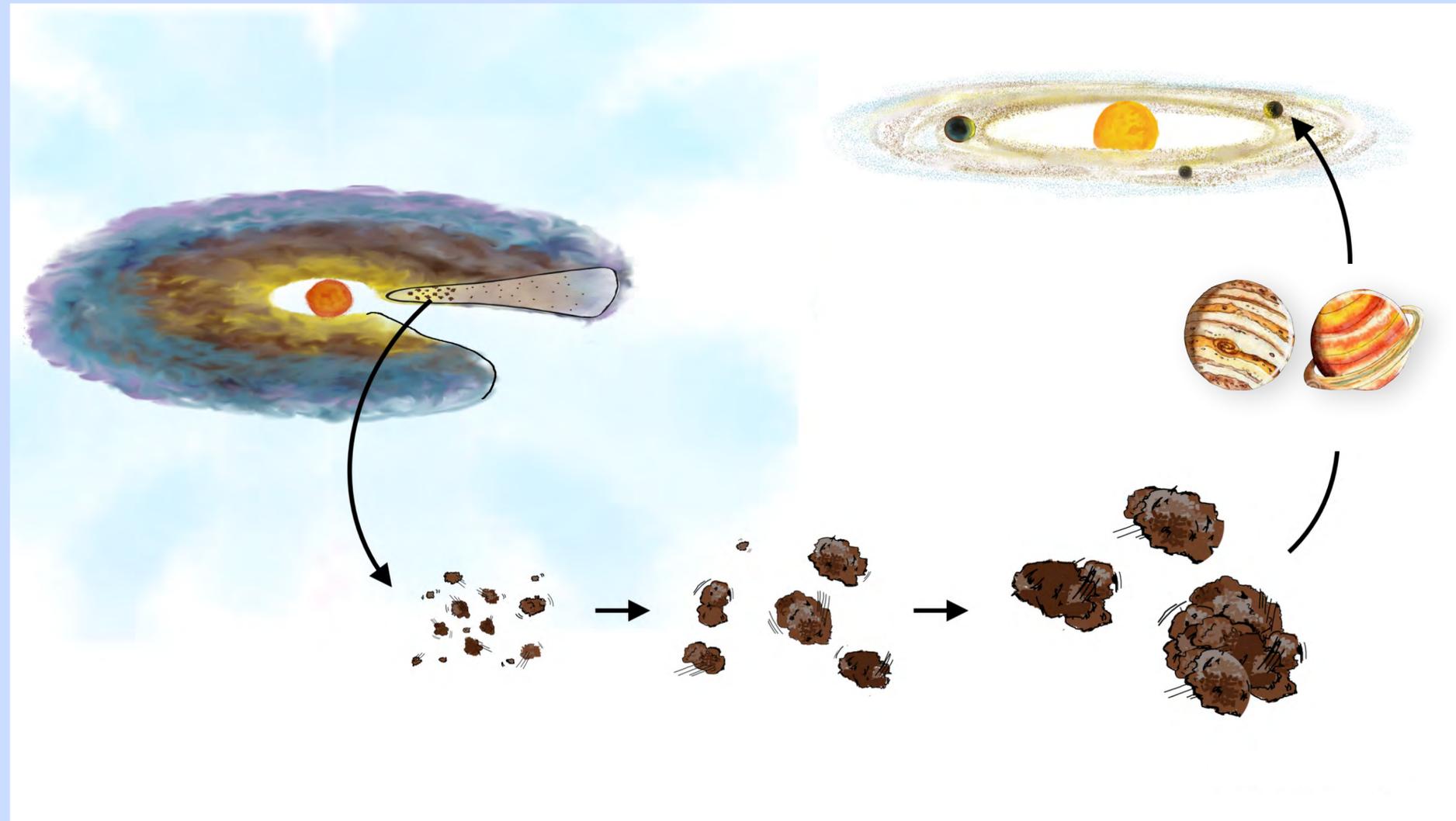
- * Disque à faible viscosité
- * Migration planétaire

PARTIE II: Migration dans le disque protosolaire

- * Jupiter & Saturne dans disque à faible viscosité
- * Construction des chaînes de résonances

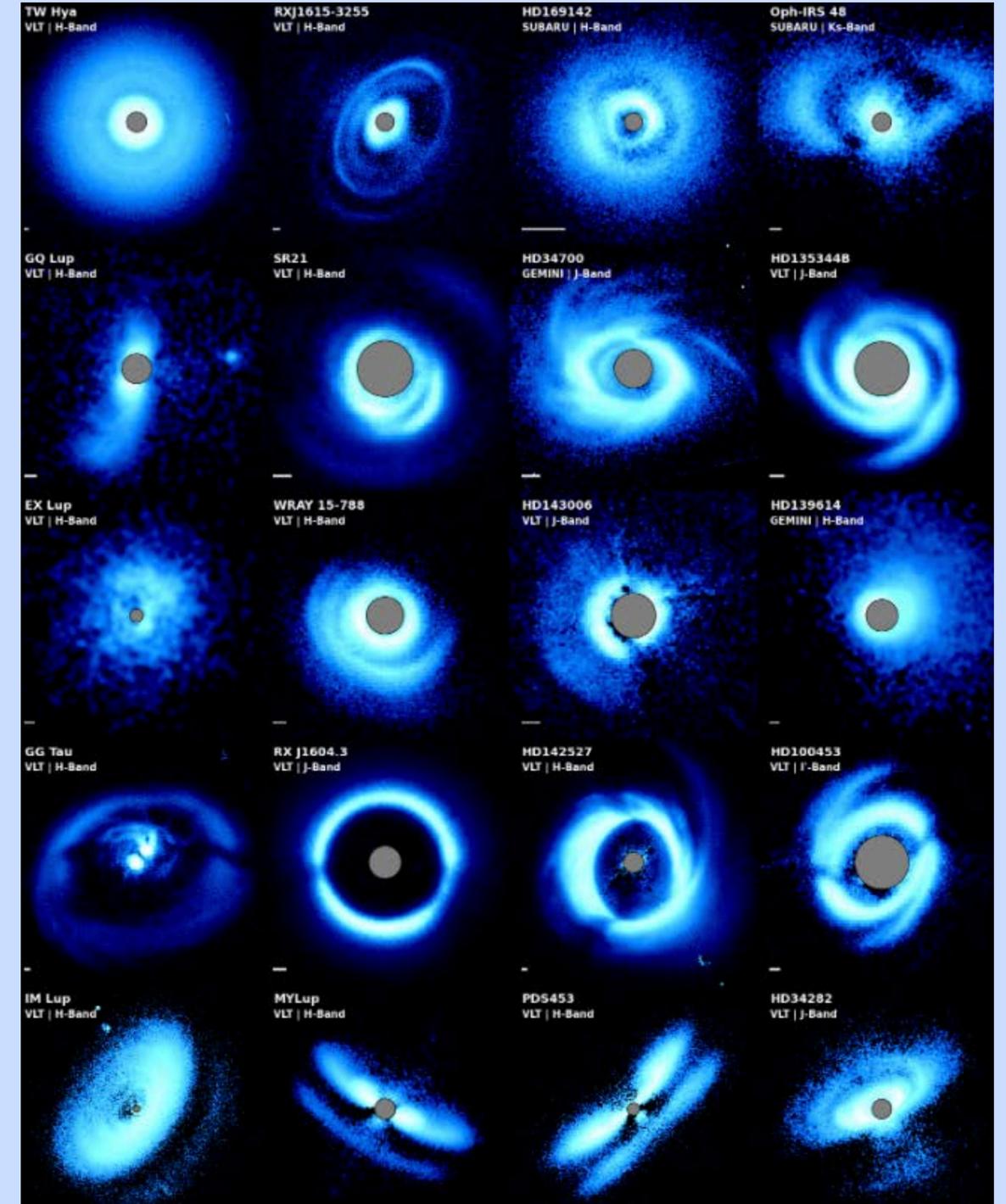
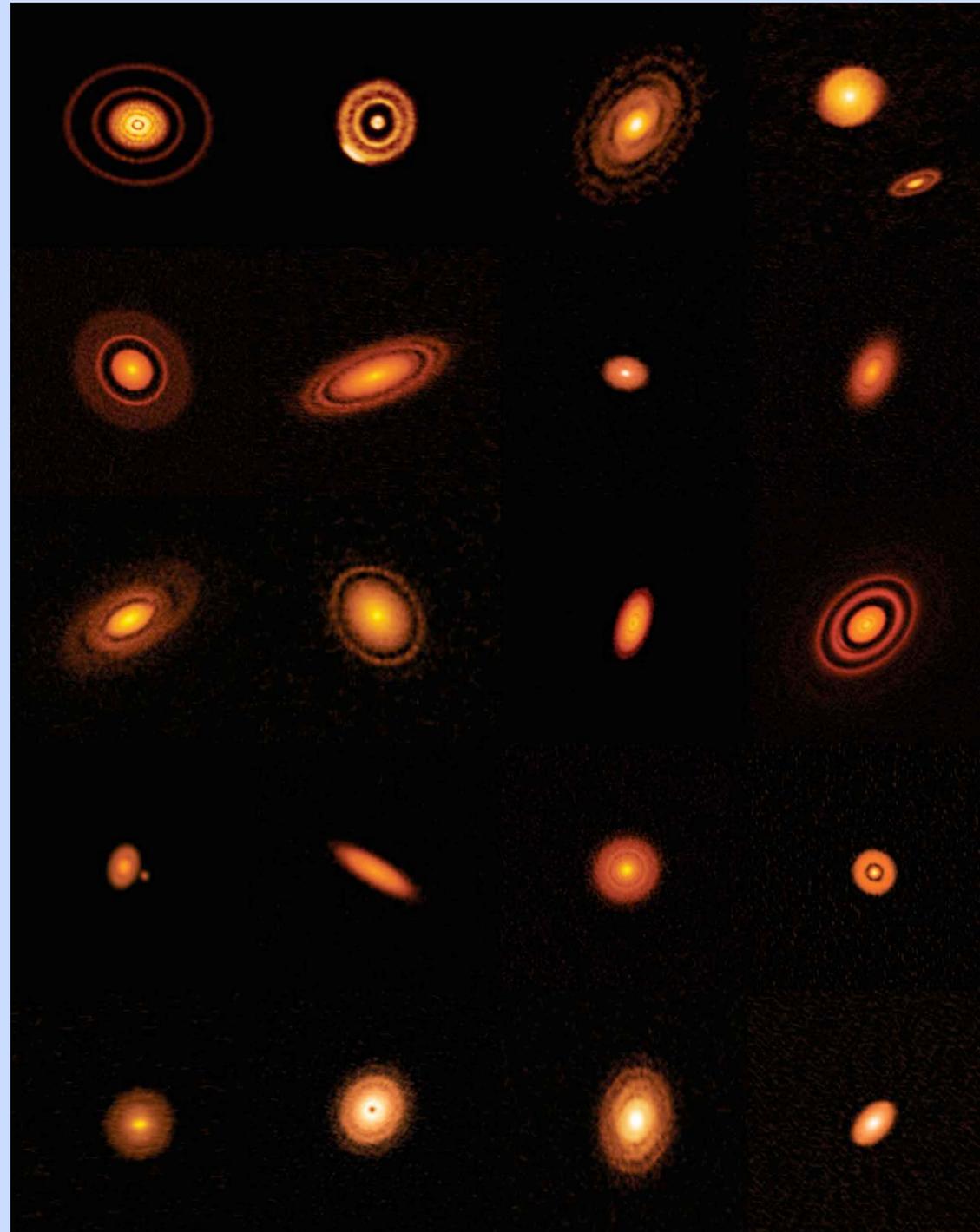
PARTIE III: Conséquence sur le Modèle de Nice

DISQUE PROTOSOLAIRE À FAIBLE VISCOSITÉ



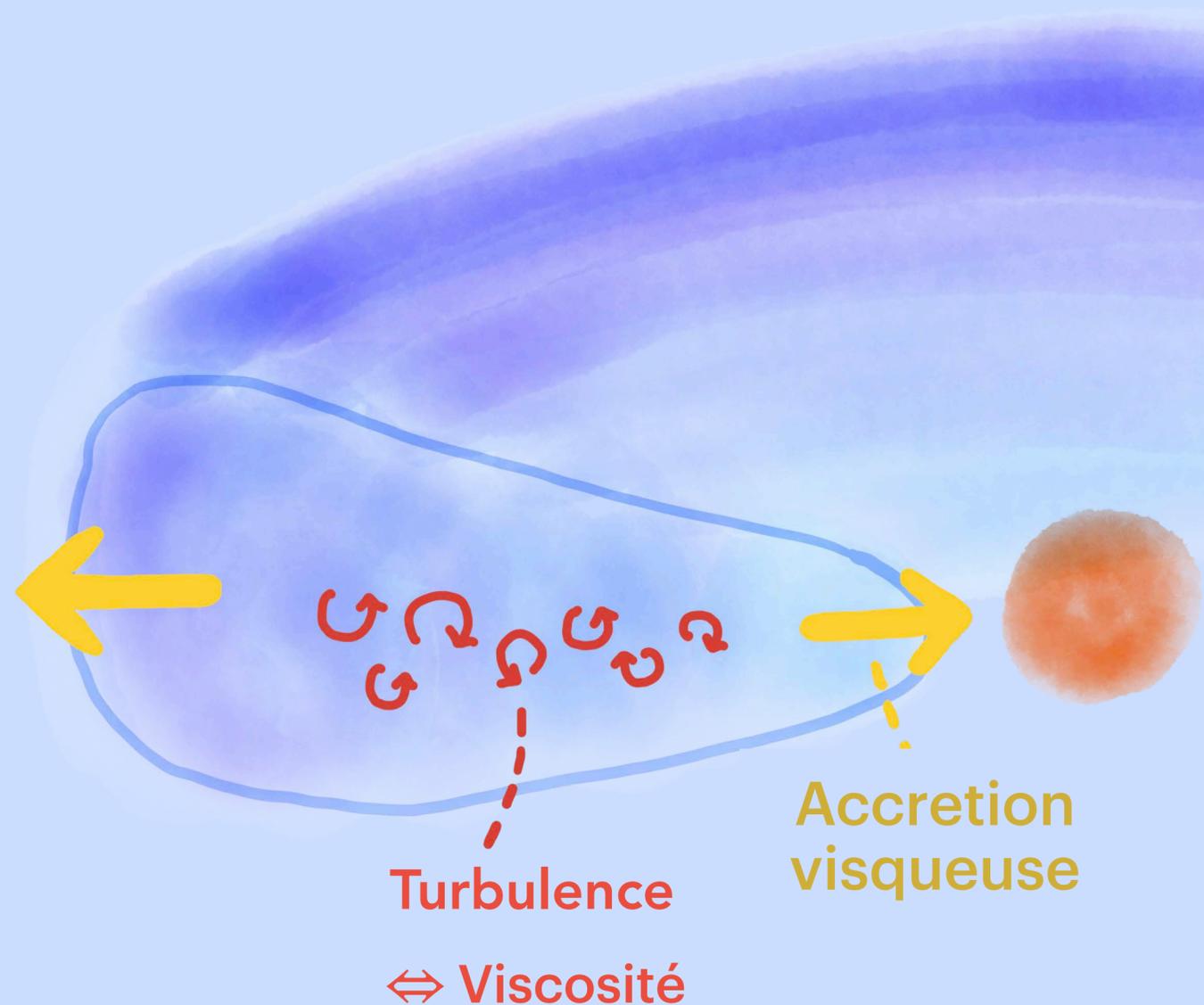
Adapted figure from Daria Dall'Olio & Andrei Zolotarev

DISQUE PROTOSOLAIRE À FAIBLE VISCOSITÉ



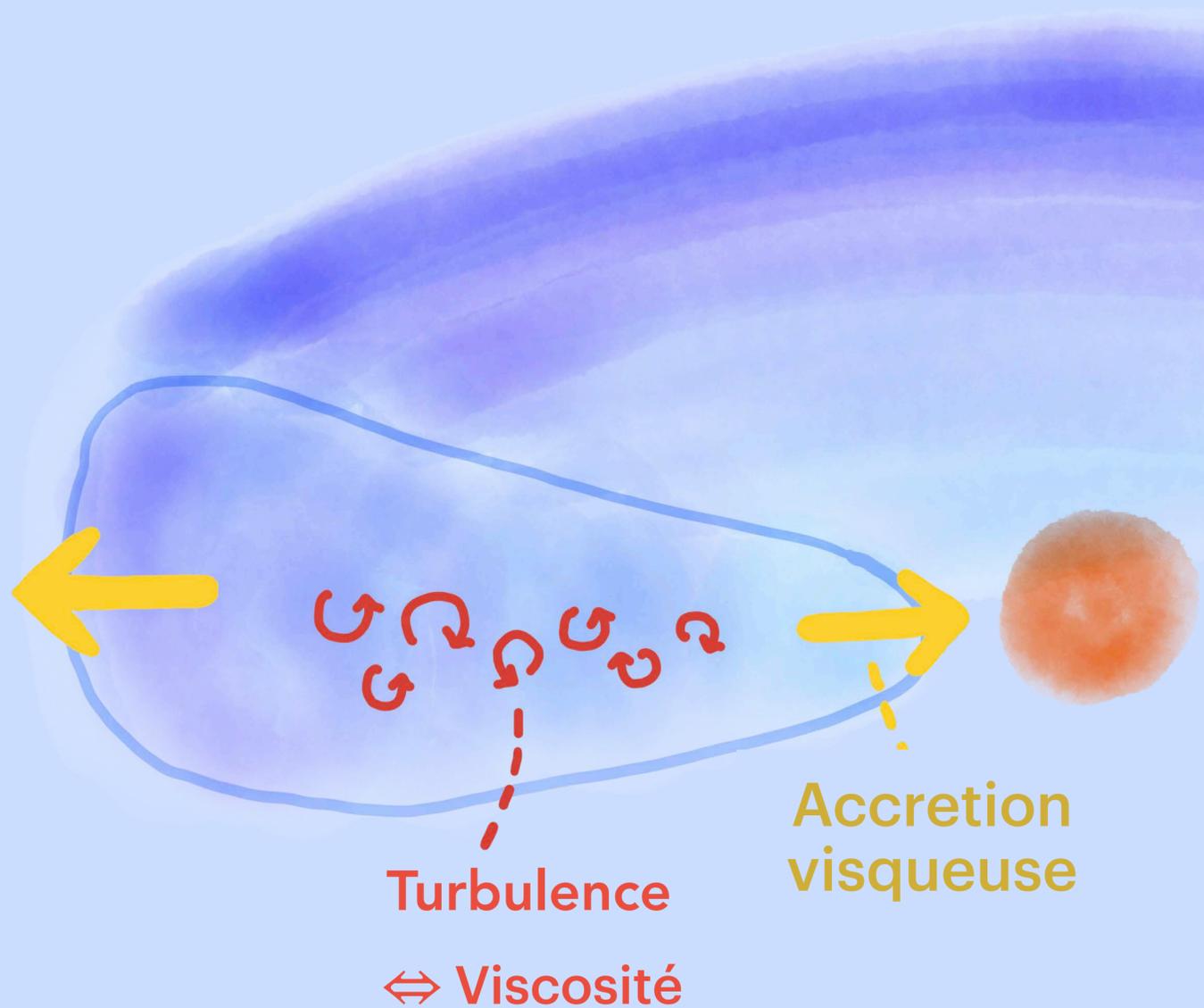
DISQUE PROTOSOLAIRE À FAIBLE VISCOSITÉ

Modèle à haute viscosité

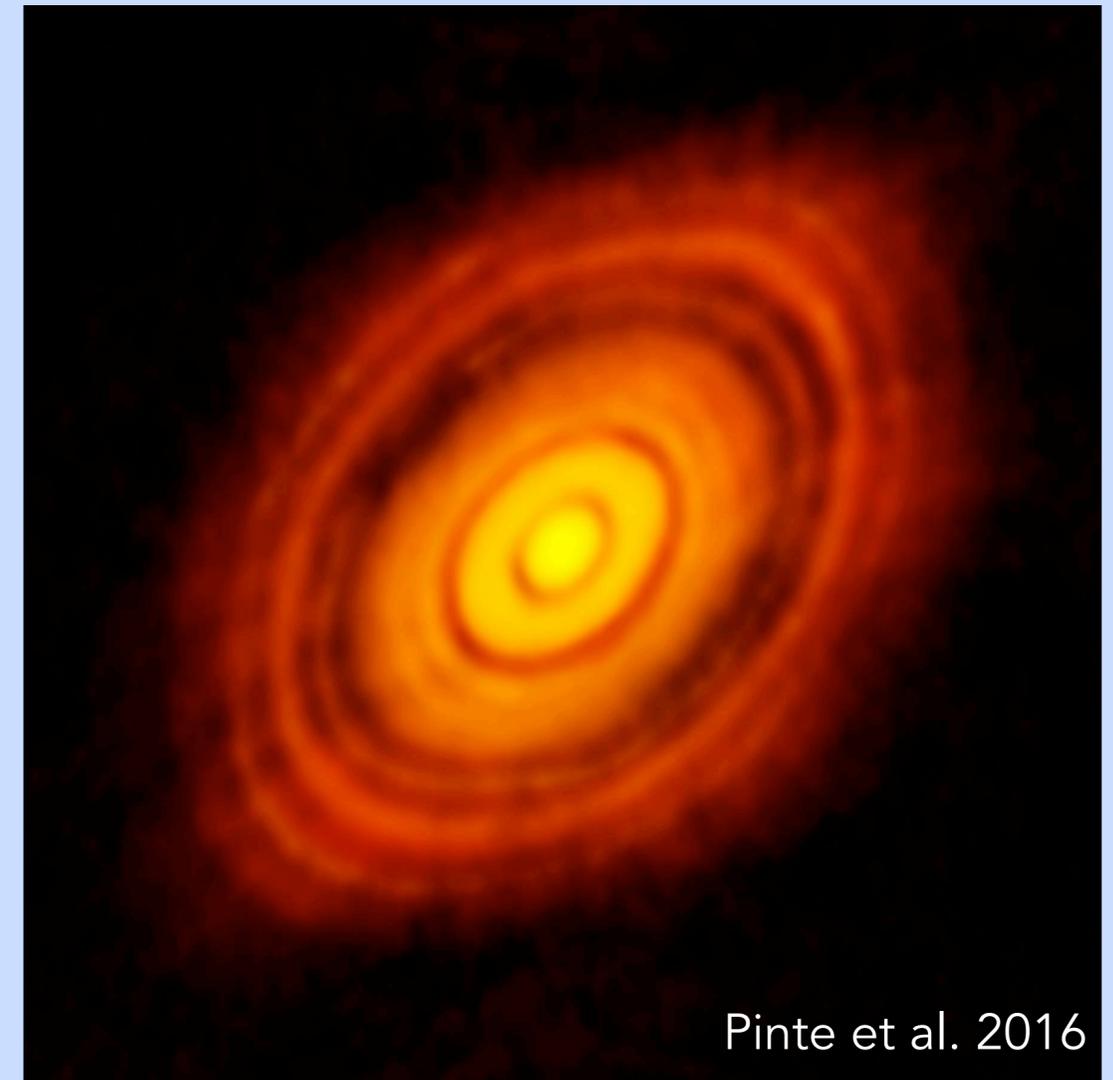


DISQUE PROTOSOLAIRE À FAIBLE VISCOSITÉ

Modèle à haute viscosité



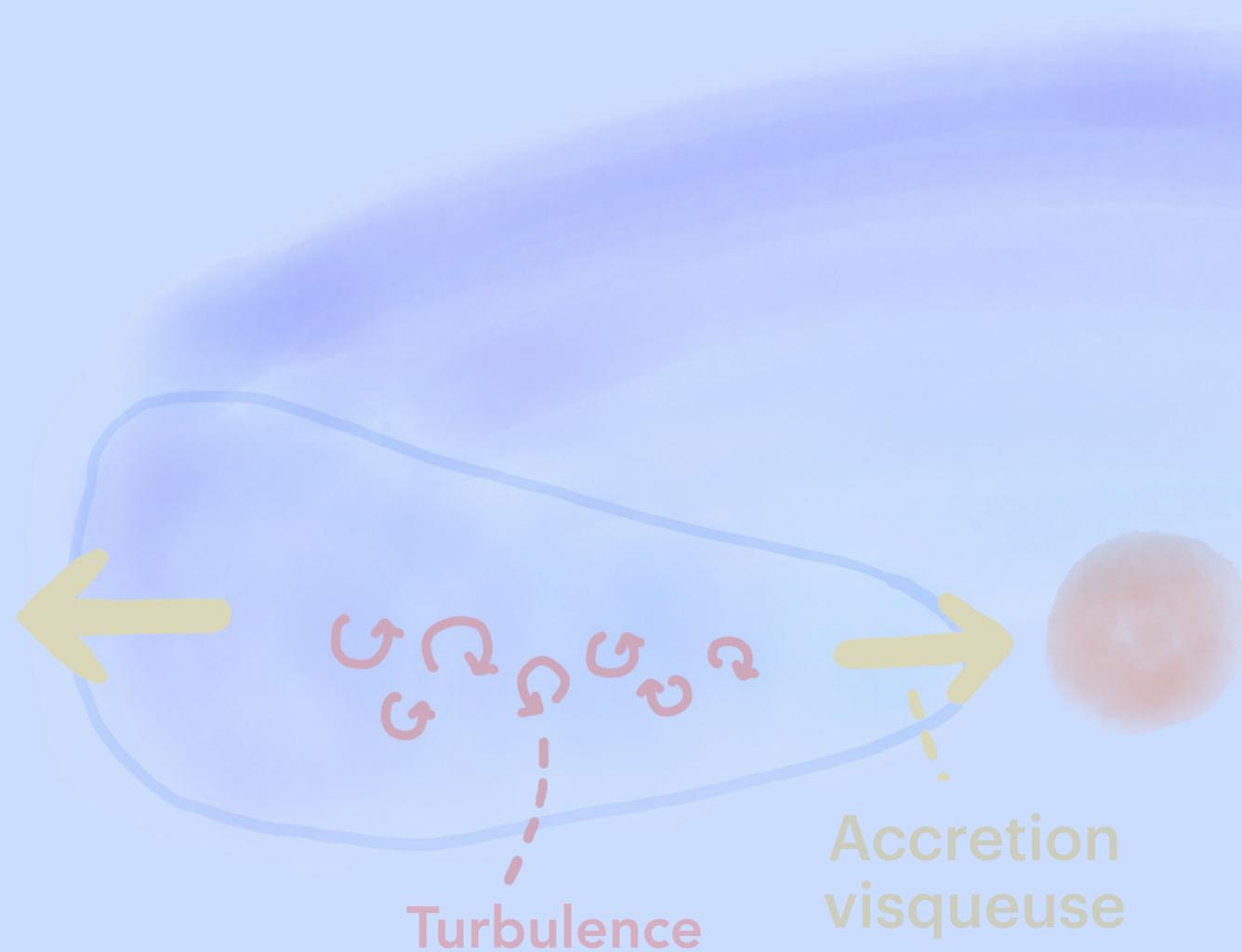
HL TAU



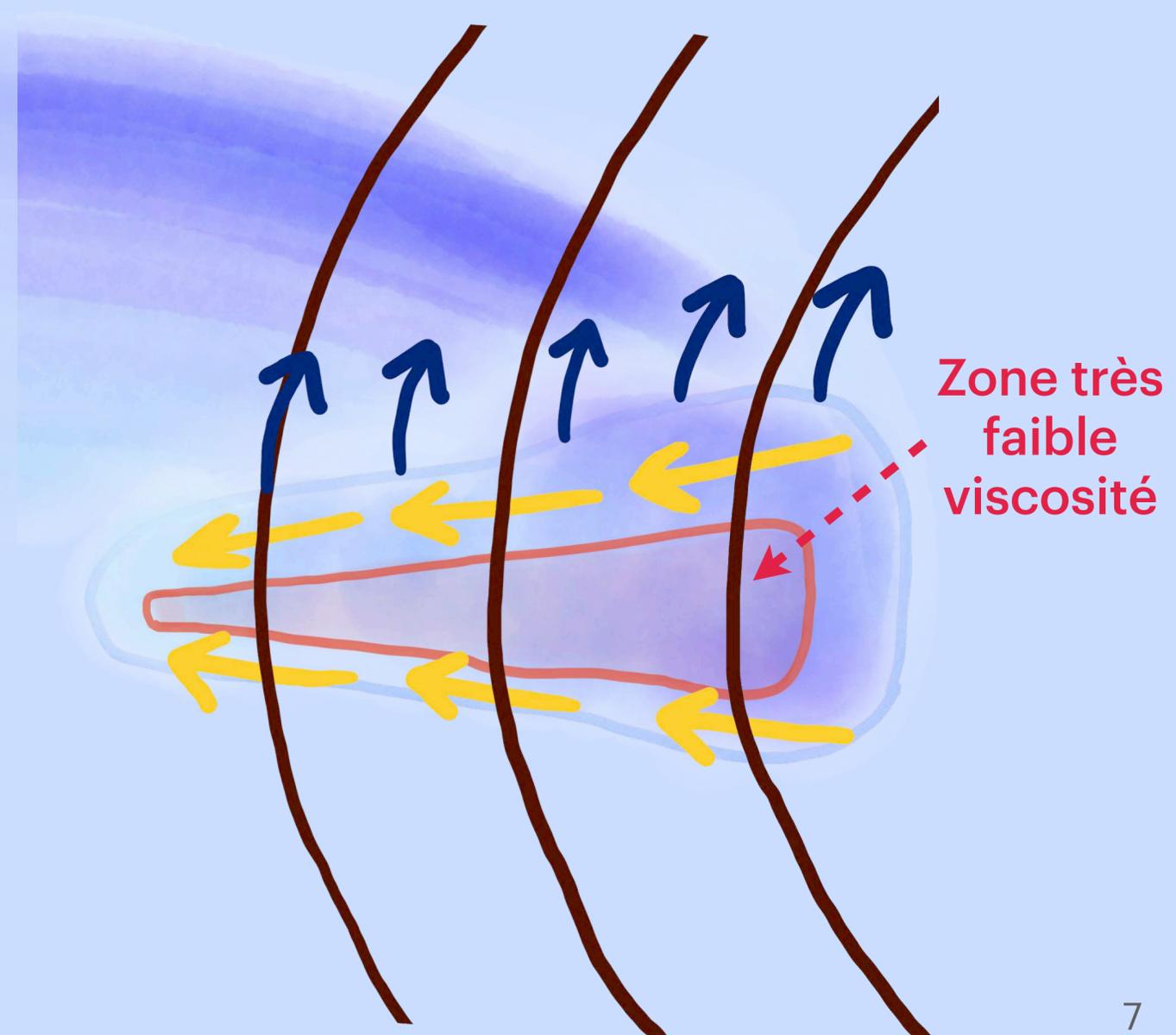
Pinte et al. 2016

DISQUE PROTOSOLAIRE À FAIBLE VISCOSITÉ

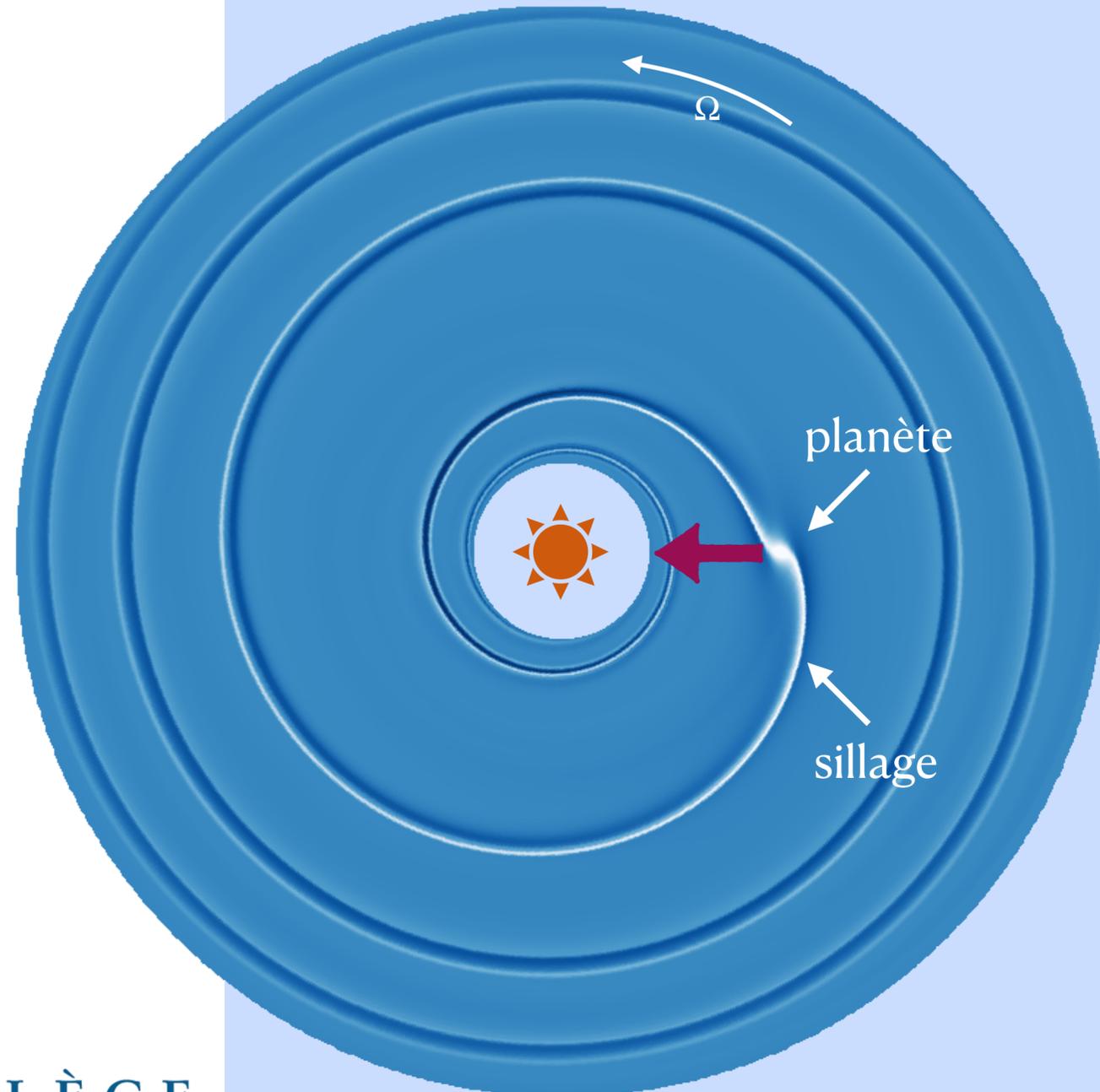
Modèle à haute viscosité



Nouveau modèle



MIGRATION PLANÉTAIRE & RÉSONANCES



perturbations de densité du gaz

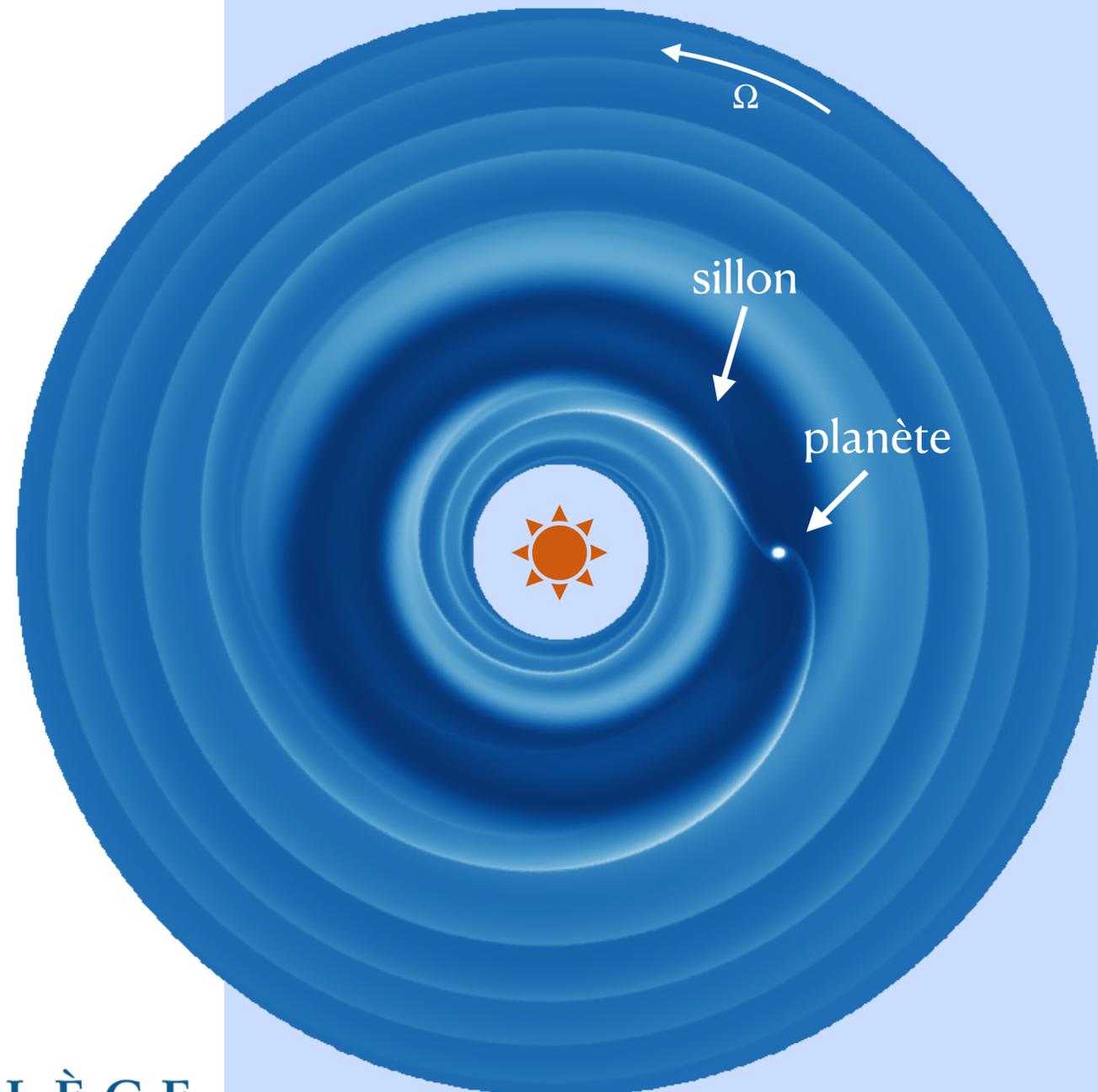
Planète peu massive

- Planète perturbe le gaz \rightarrow formation d'un sillage
- Surdensité de gaz \rightarrow couple sur la planète
- Couple \rightarrow changement du rayon orbital de la planète

\Rightarrow **MIGRATION PLANÉTAIRE**

- Equilibre des couples \Rightarrow **néгатif**
- Régime Type I: $\tau_I = f(M_p, H, \Sigma)$

MIGRATION PLANÉTAIRE & RÉSONANCES



perturbations de densité du gaz

Planète massive

- Plus massive, la planète ouvre un sillon
- Forme du sillon dépend de la masse de la planète, la viscosité et la pression*

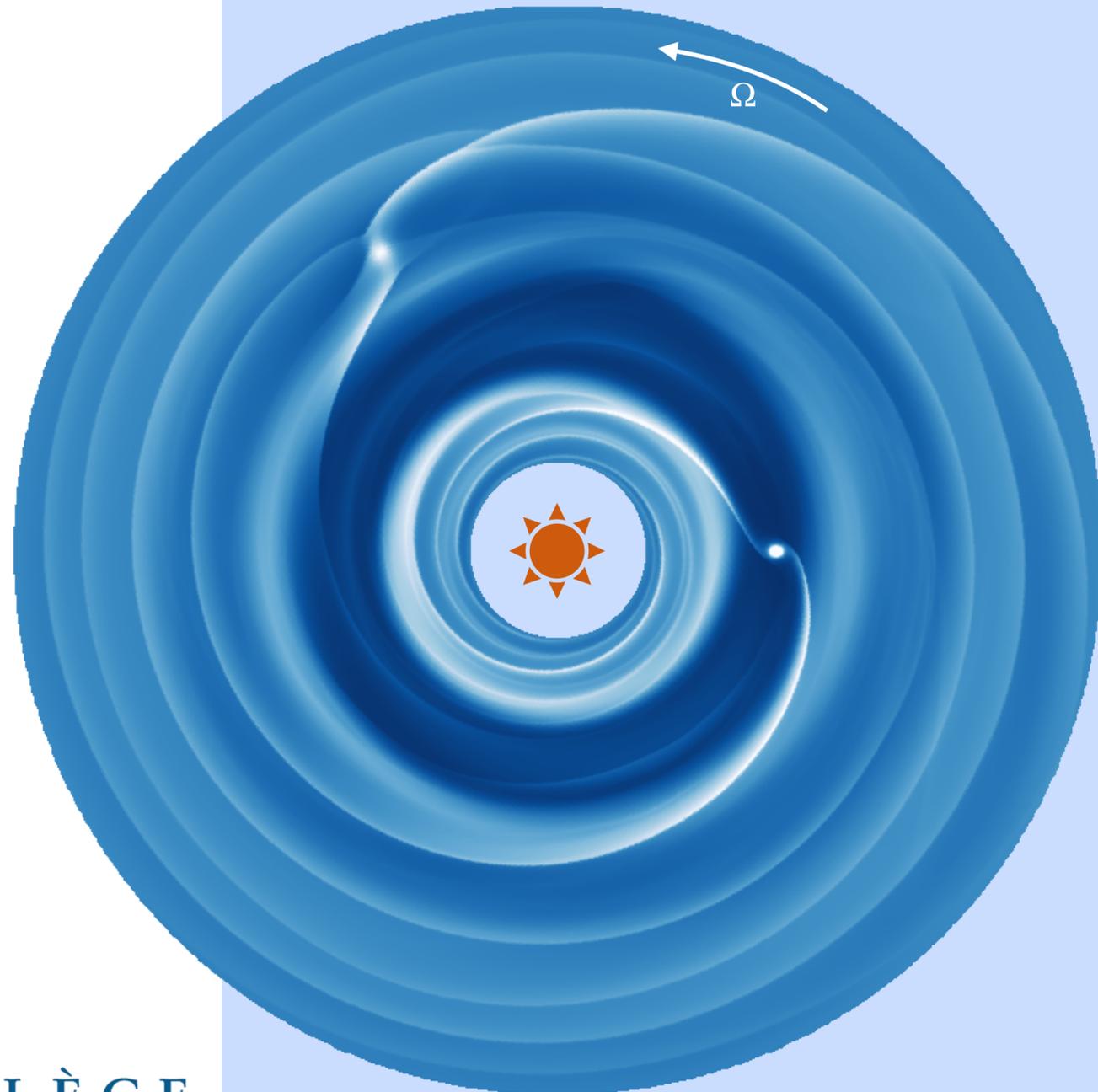
*Crida et al. 2006

$$\frac{h_p}{q^{1/3}} + \frac{50 \alpha h_p^2}{q} \lesssim 1, \quad \text{avec } q = M_p/M_\star$$

- Régime de migration différent — Type II dominé par la viscosité:

$$\tau_{II} = \frac{r_p^2}{\nu}$$

MIGRATION PLANÉTAIRE & RÉSONANCES

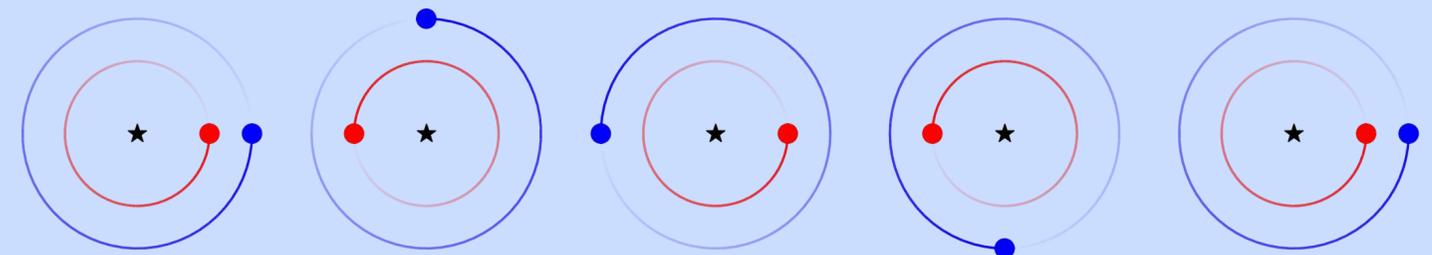


perturbations de densité du gaz

Dynamiques entre planètes

- Plusieurs planètes en migration → capture en résonance de moyen mouvement (MMR).

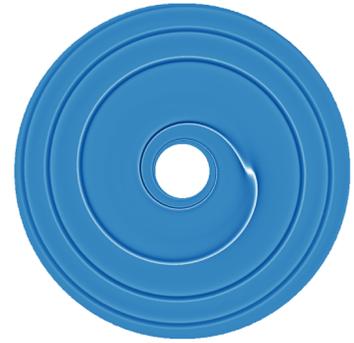
- Résonance $k+q:k$, si $\frac{\Omega_1}{\Omega_2} \simeq \frac{k+q}{k}$, avec $q, k \in \mathbb{N}$



2:1 MMR

- Résonances excitent les excentricités, tandis que le gaz les amorties

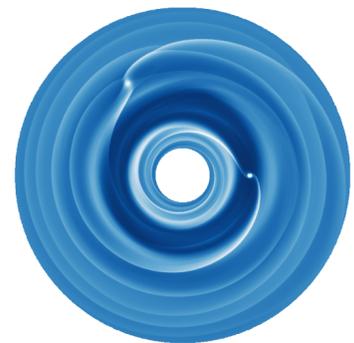
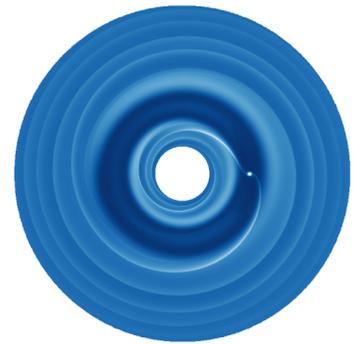
CONSTRUCTION DE CHAINES DE RÉSONANCES



Simulations hydrodynamiques

- Intègre la dynamique du gaz
- Permet d'étudier la complexité des interactions planète-disque
- Plus riches en phénomènes physiques (e.g. thermodynamique)
- Plus coûteux en calcul

e.g. Morbidelli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes 2007

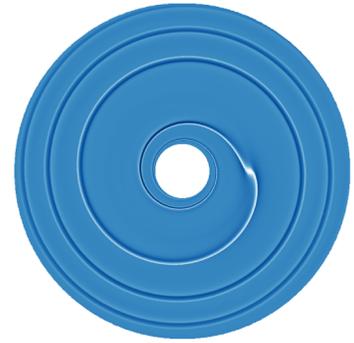


Simulations N-Corps avec prescription de migration

- Intègre les mouvements des planètes
- Migration "synthétique"
- Méthode simplifiée mais très rapide

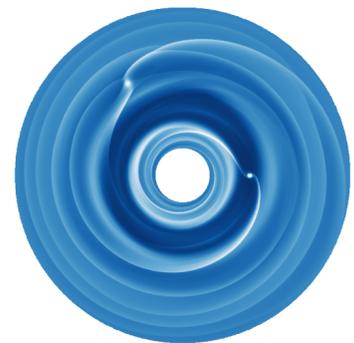
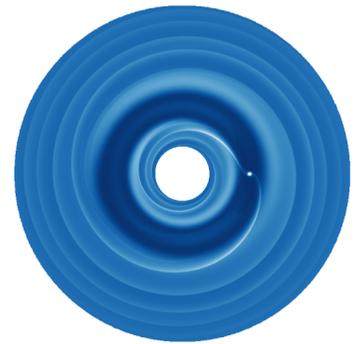
e.g. Nesvorny & Morbidelli 2012,
et beaucoup d'autres

CONSTRUCTION DE CHAINES DE RÉSONANCES



Simulations hydrodynamiques

- Intègre la dynamique du gaz
- Permet d'étudier la complexité des interactions planète-disque
- Plus riches en phénomènes physiques (e.g. thermodynamique)
- Plus coûteux en calcul



e.g. Morbidelli, Tsiganis, Crida, Levison et Gomes 2007

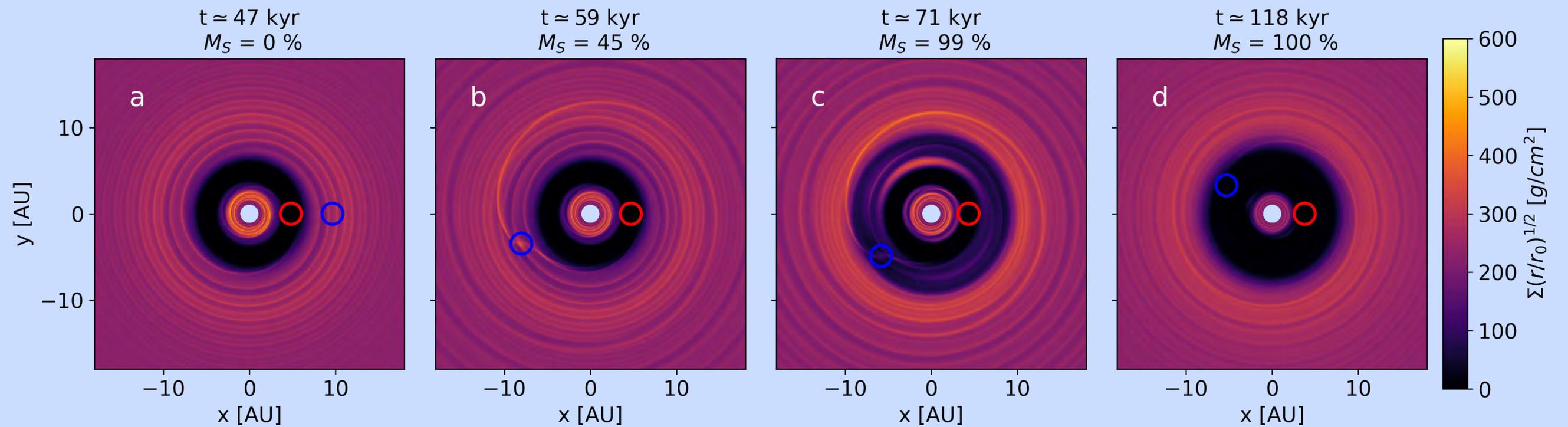
Simulations N-Corps avec prescription de migration

- Intègre les mouvements des planètes
- Migration "synthétique"
- Méthode simplifiée mais très rapide

e.g. Nesvorny & Morbidelli 2012,
et beaucoup d'autres

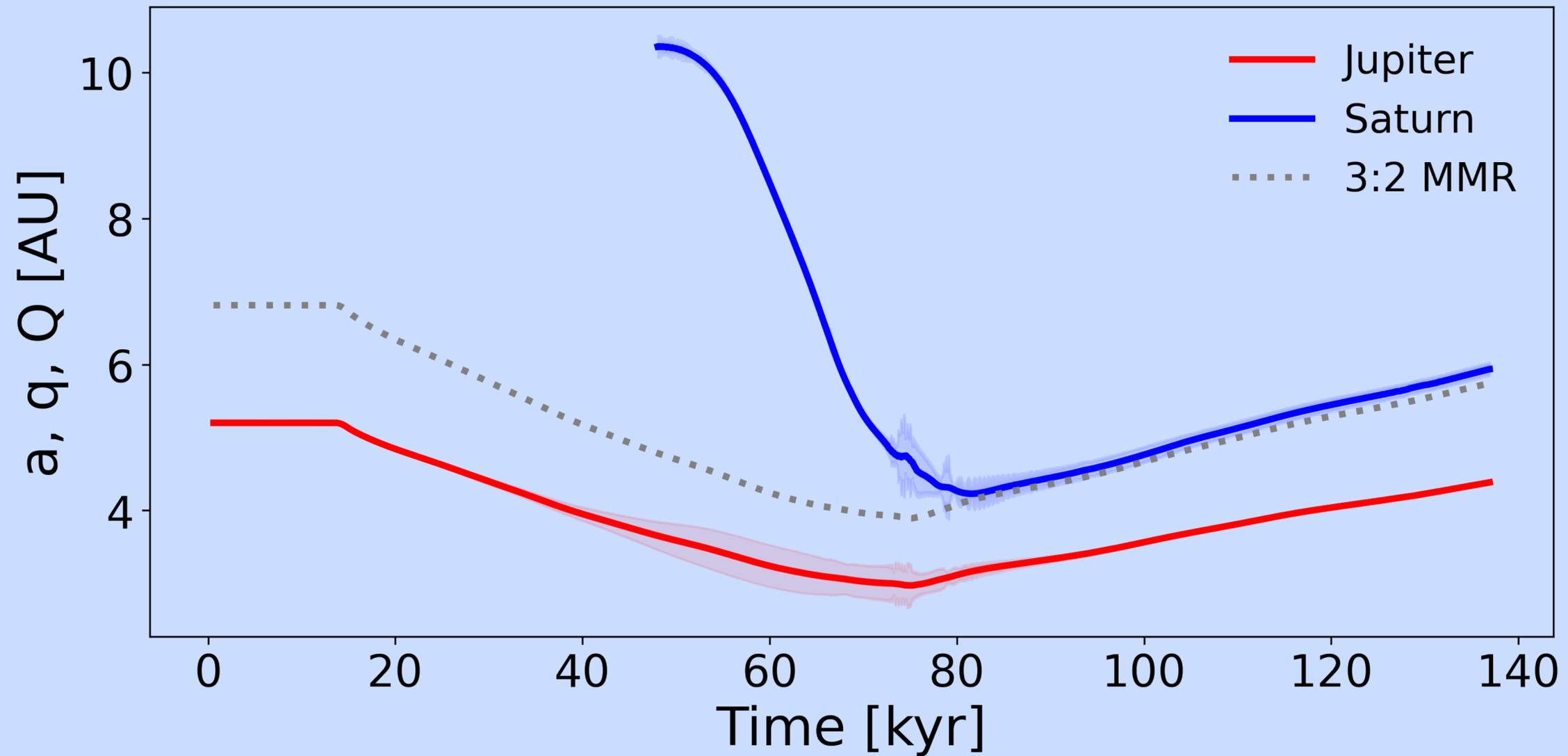
CONSTRUCTION DE CHAINES DE RÉSONANCES

Simulations hydrodynamiques



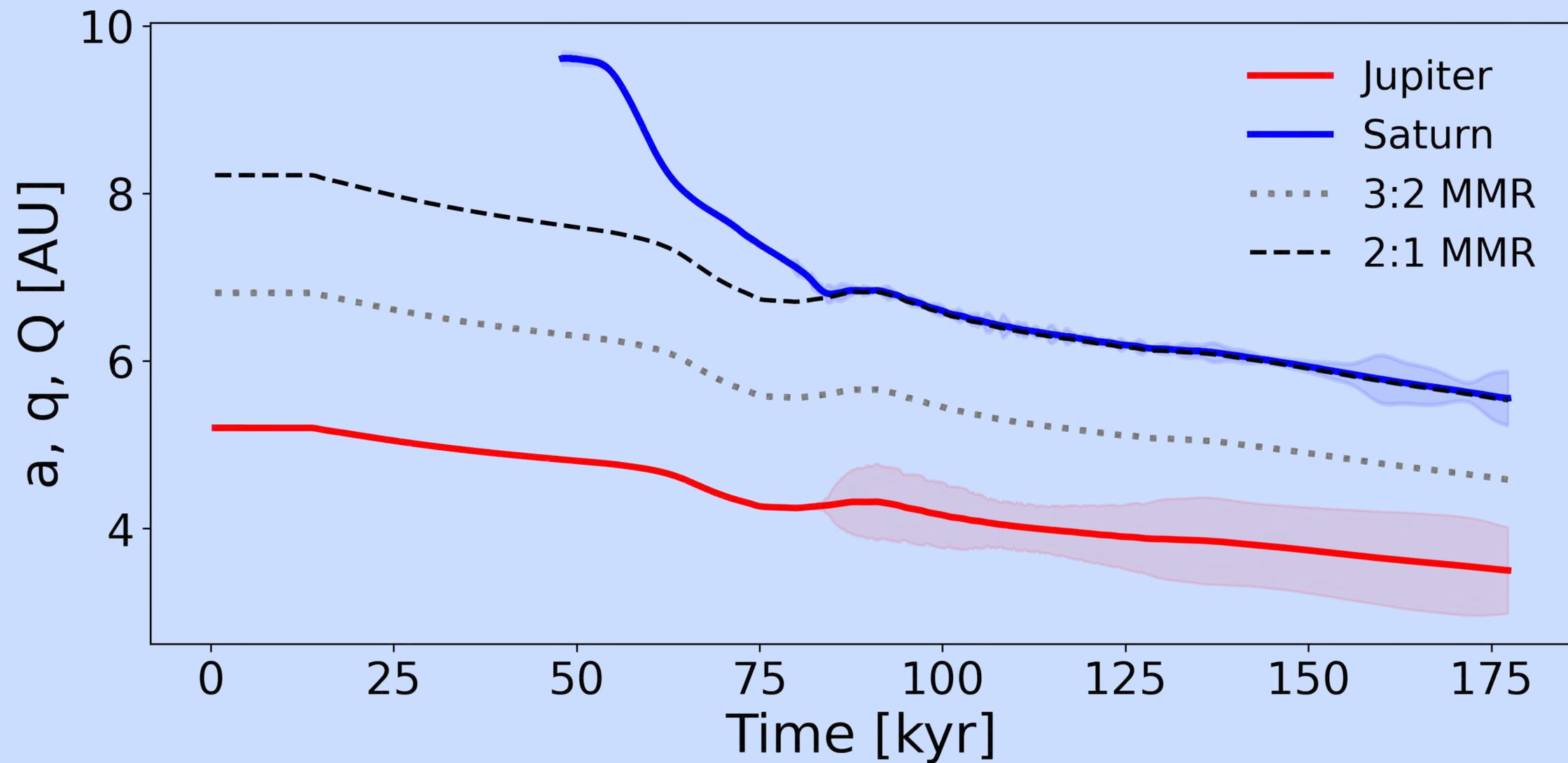
DYNAMIQUE DE JUPITER & SATURNE

Dans un disque à haute viscosité



DYNAMIQUE DE JUPITER & SATURNE

Dans un disque à faible viscosité



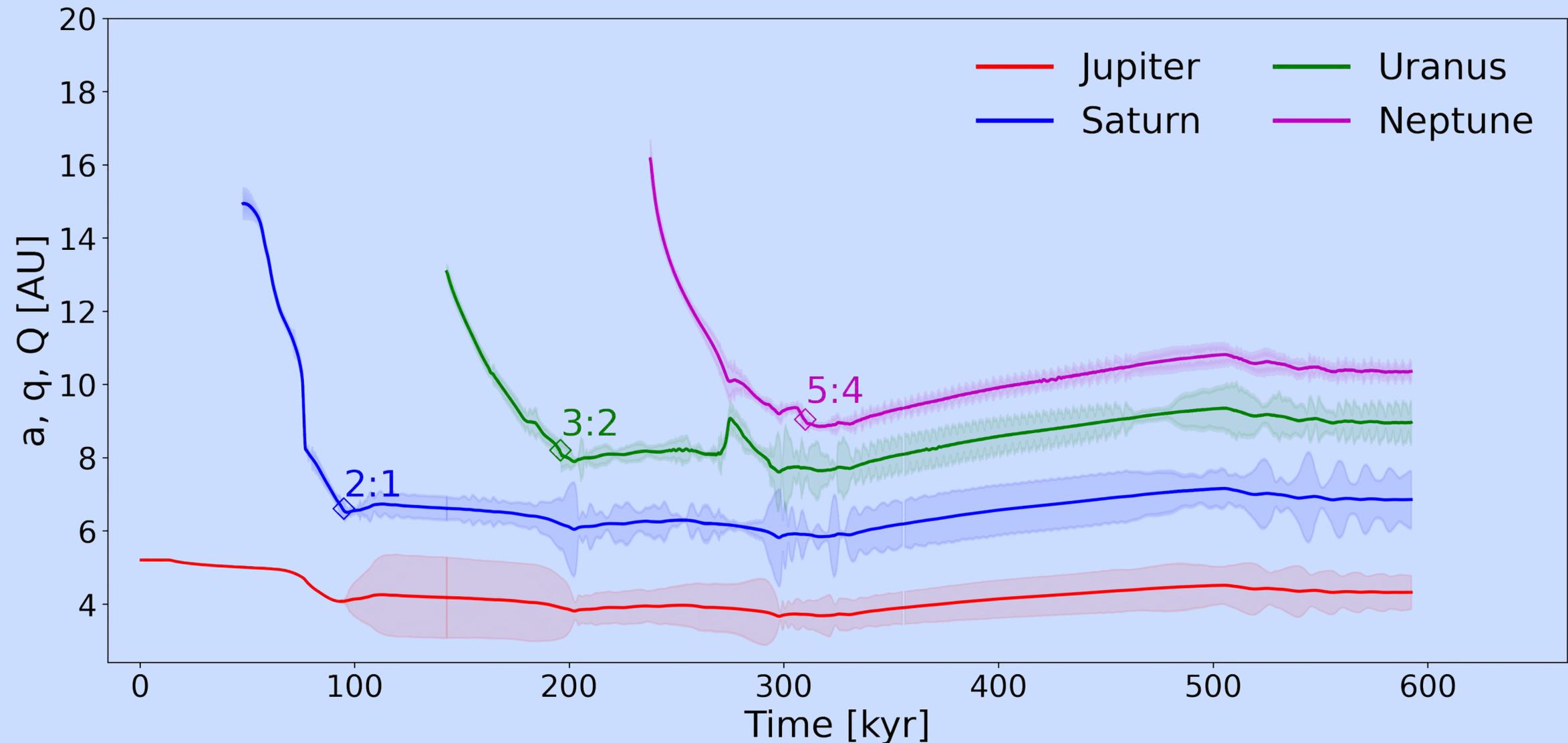
DYNAMIQUE DE JUPITER & SATURNE

Faible viscosité \Rightarrow 2:1 MMR et migration vers l'intérieur.

- * Scénario du Grand Tack: pas possible.
- * Il nous faut un moyen d'arrêter la migration vers l'intérieur.
- * Modèle de Nice: Impact sur les chaînes de résonances ?

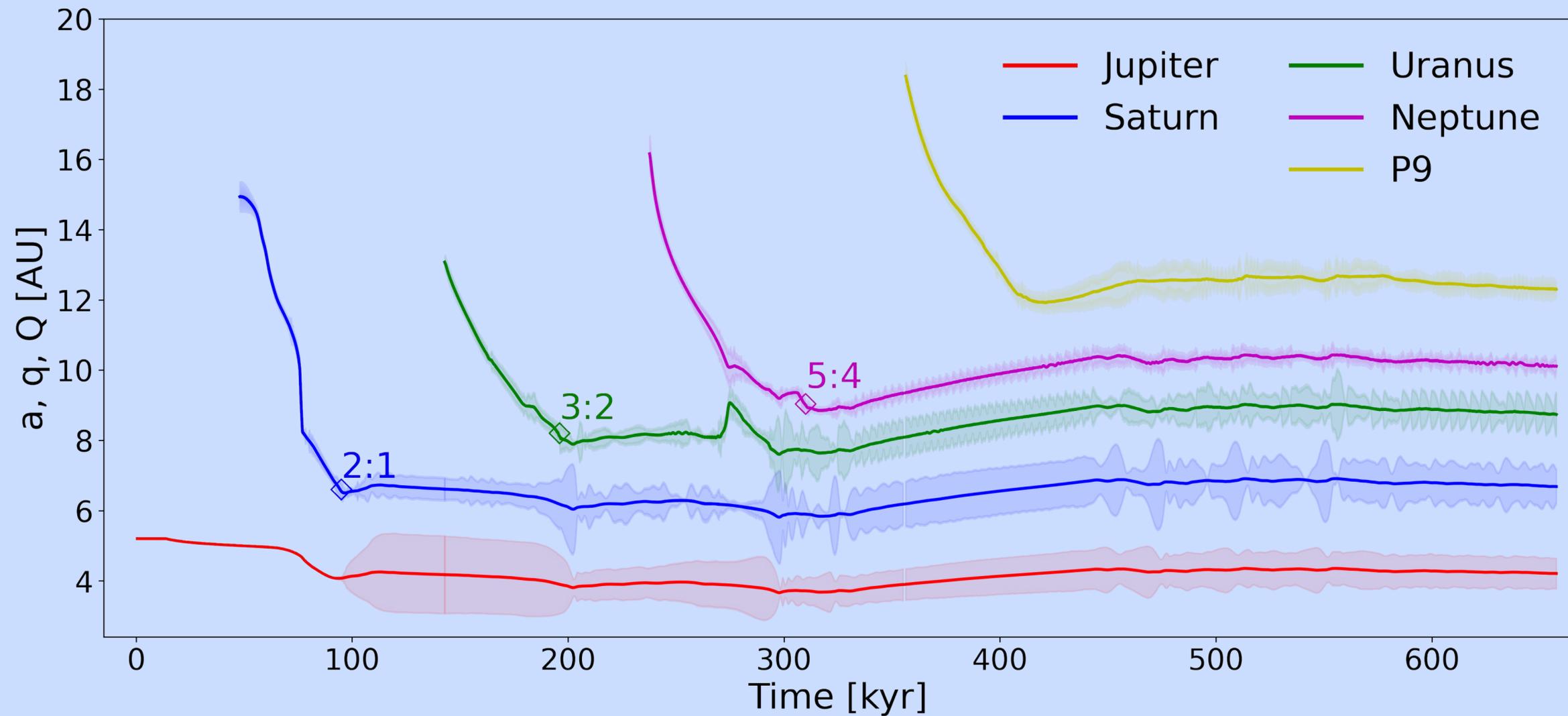
FORMATION DE CHAINES DE RÉSONANCES

Dans un disque froid (mince)



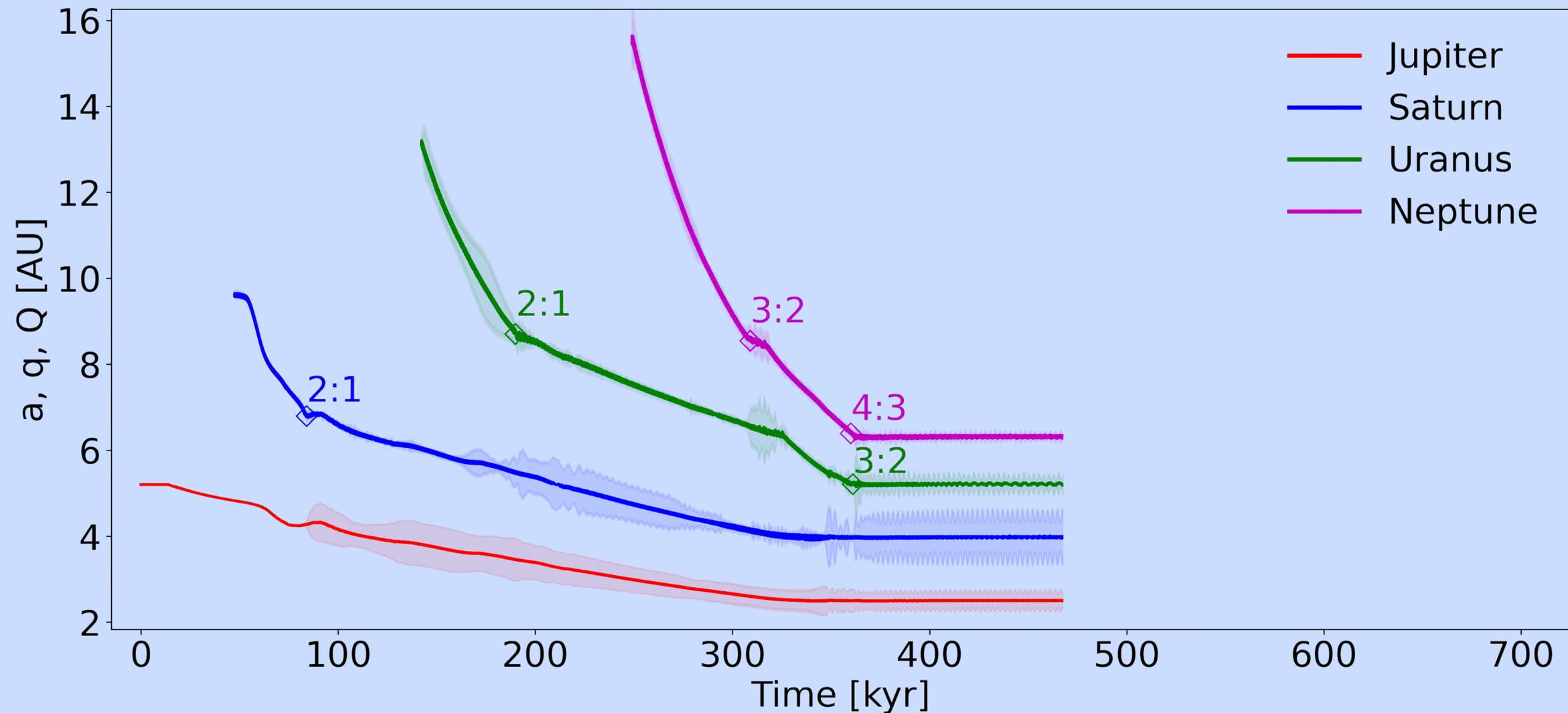
FORMATION DE CHAINES DE RÉSONANCES

Dans un disque froid (mince)



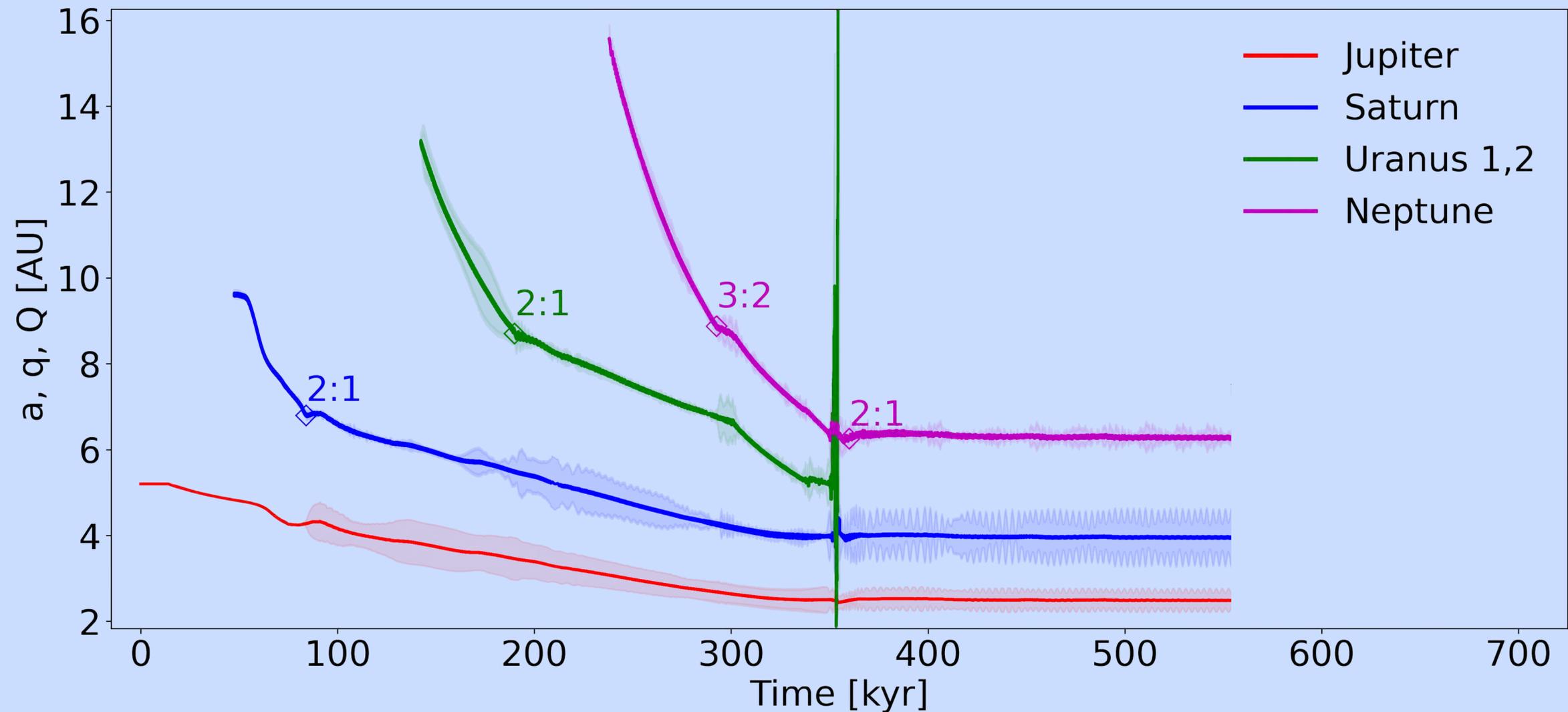
FORMATION DE CHAINES DE RÉSONANCES

Dans un disque chaud (épais)



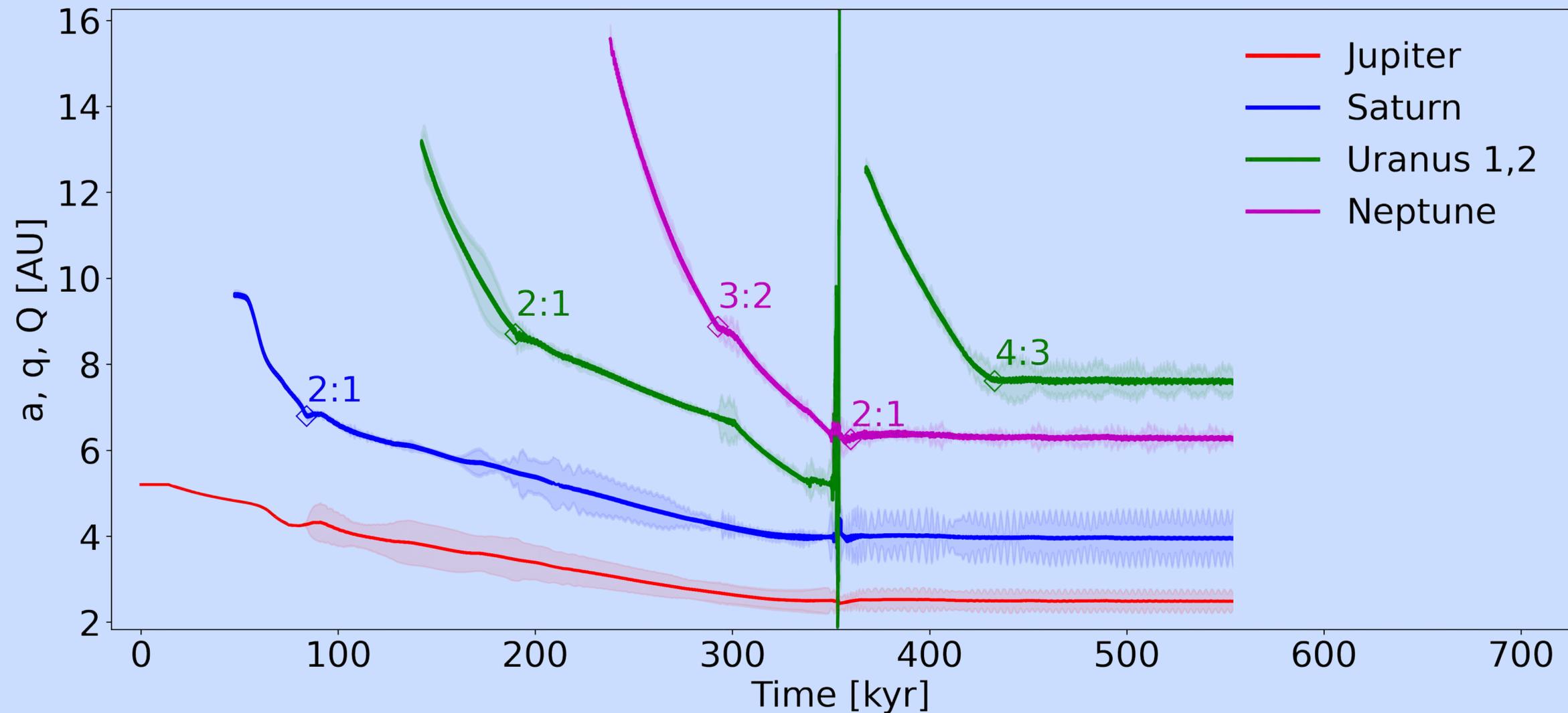
FORMATION DE CHAINES DE RÉSONANCES

Dans un disque chaud (épais)



FORMATION DE CHAINES DE RÉSONANCES

Dans un disque chaud (épais)



FORMATION DE CHAINES DE RÉSONANCES

h	Name	Planet order	Resonant chain
4 Planets			
0.05	N_4	J-S-U-N	(2:1, 3:2, 4:3)
0.05	$N_{bis}4$	J-S-N-U	(2:1, 2:1, 4:3)*
0.035	C_4	J-S-U-N	(2:1, 3:2, 5:4)
5 Planets			
0.05		J-S-U-N-U	unstable
0.05		J-S-U-N-U [†]	unstable
0.05		J-S-U-N-P9	unstable
0.05		J-S-N-U-U	unstable
0.05	$N_{bis}5$	J-S-N-U-U [†]	(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)
0.035		J-S-U-N-U	unstable
0.035		J-S-U-N-U [†]	unstable
0.035	C_5	J-S-U-N-P9	(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)
0.05		J-S-P9-U-N	unstable
0.035		J-S-P9-N-U	unstable

[†] Different introduction time.

* Stable after having ejected an ice giant.

Dans un disque à faible viscosité

- Profondeur et largeur du sillon jouent rôle important
→ Sillons larges = moins dissipations → planètes plus excentriques → systèmes instables

⇒ **Besoin de simulations hydrodynamique pour saisir la complexité de cette dynamique.**

- Simulations N-Corps avec prescription de migration → trop simplifié pour faible viscosité ?

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Obtenues à partir de simulations hydrodynamiques

Chaînes à 4 planètes: (2:1, 3:2, 4:3), (2:1, 2:1, 4:3), (2:1, 3:2, 5:4)

Chaînes à 5 planètes: (2:1, 3:2, 5:4, 4:3), (2:1, 2:1, 4:3, 5:4)

Nesvorny & Morbidelli 2012

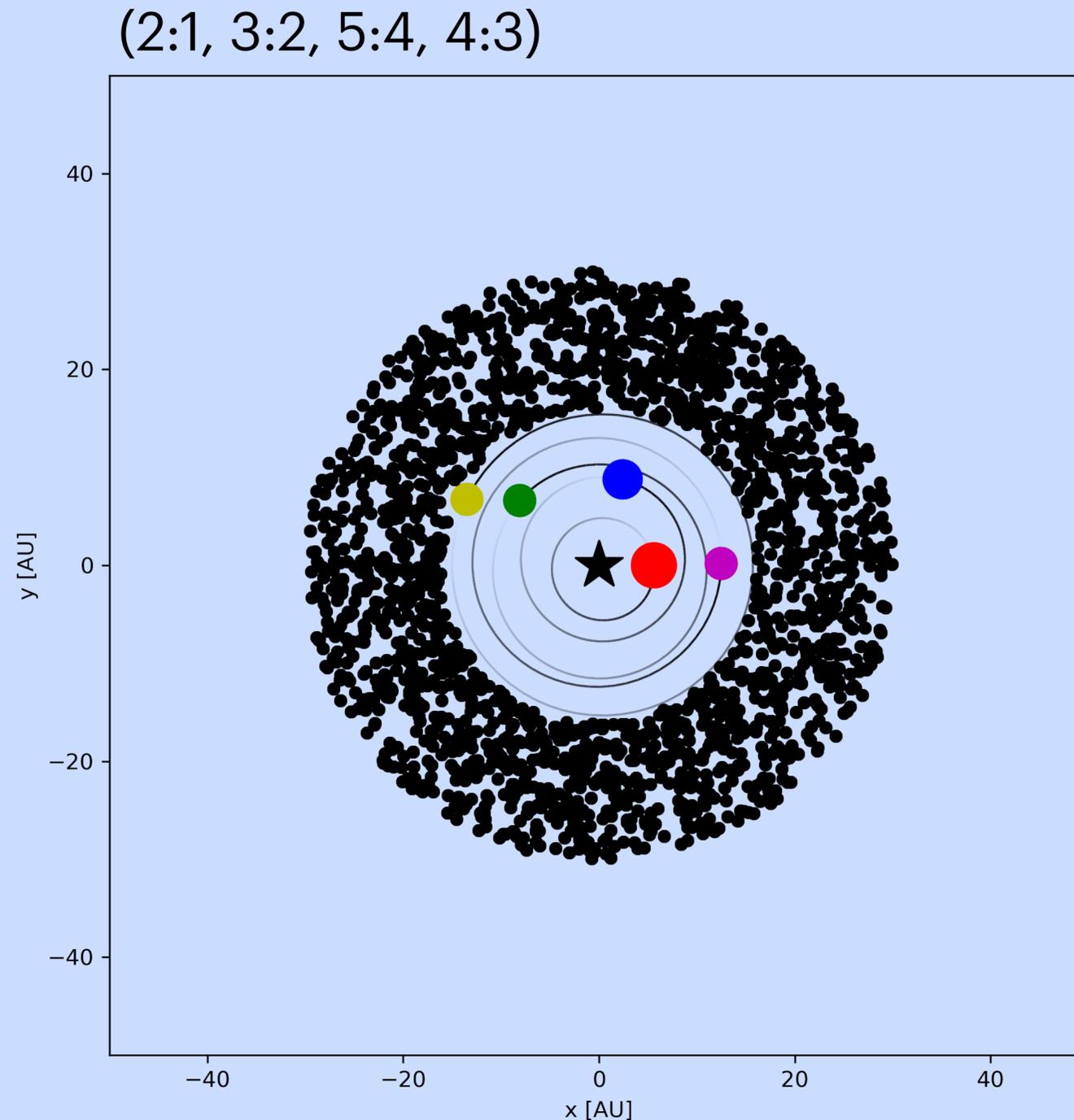
On considère les chaînes résonnantes à 5 planètes suivantes:
(3:2, 3:2, 4:3, 5:4), (3:2, 3:2, 3:2, 3:2), (3:2, 3:2, 4:3, 4:3), (3:2, 3:2,
2:1, 3:2), (3:2, 3:2, 2:1, 2:1), (2:1, 3:2, 3:2, 3:2), (2:1, 4:3, 3:2, 3:2)

Peuvent-elles être des conditions initiales du Modèle de Nice ?

Première étape: évaporation du disque de gaz.

Deuxième étape: reproduire les simulations du Modèle de Nice, avec étude statistique

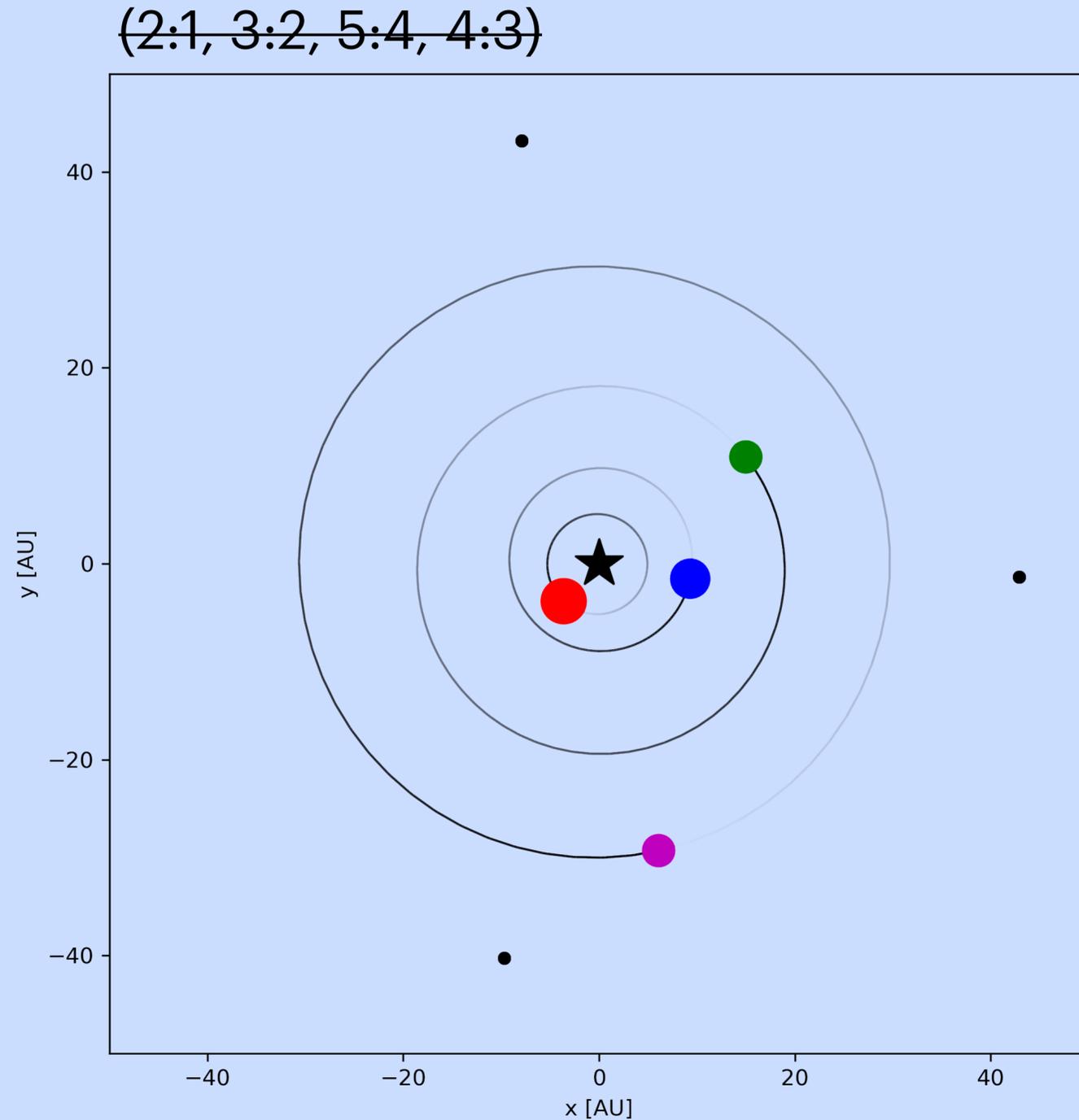
CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE



Simulations N-Corps

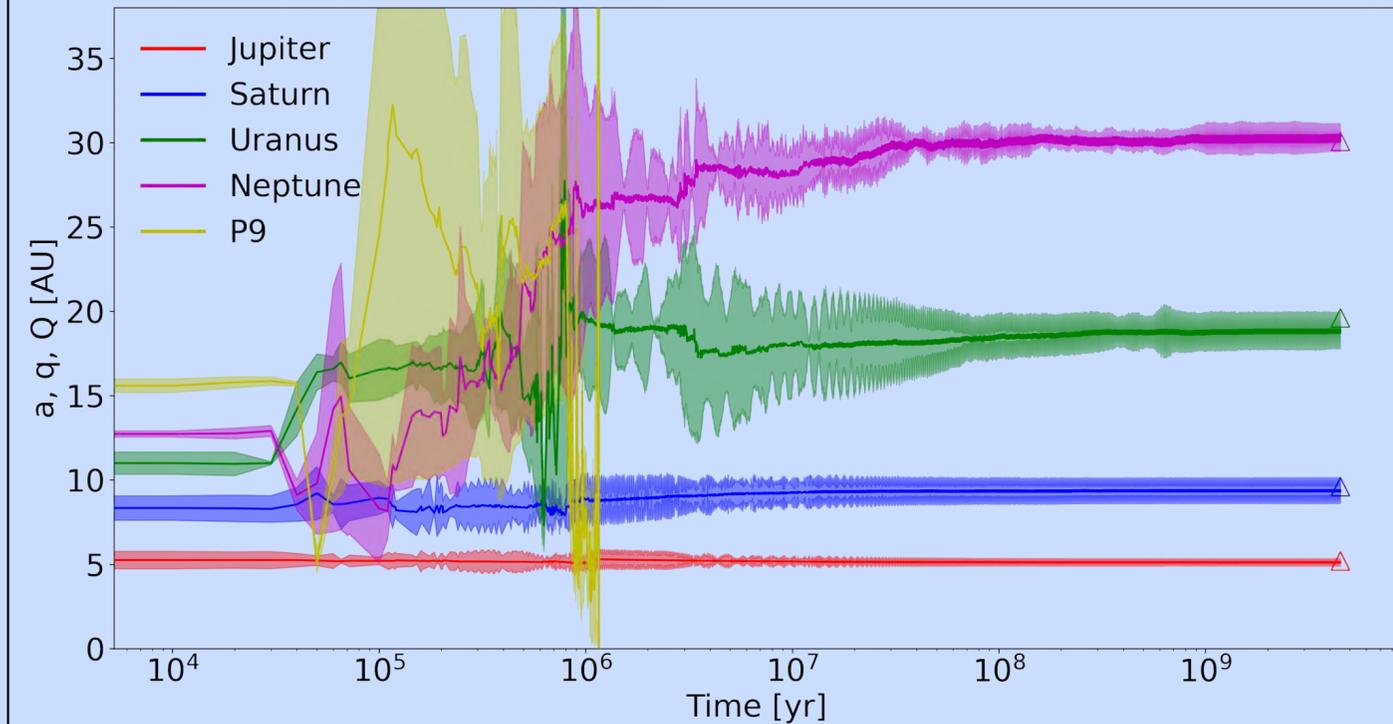
- Configuration des simulations hydro.
- Initialisation des planètes avec inclinaison $\neq 0$
- Disque de planétésimaux
 - 2000 objets
 - 0.5au de Neptune
 - Masse du disque $M_D = [30, 50] M_{\oplus}$
 - Initialisation aléatoire de e et i

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE



Simulations N-Corps

- Integration du système $\sim 10^9$ années.
- Object au-delà de $r > 1000$ au est retiré du système.

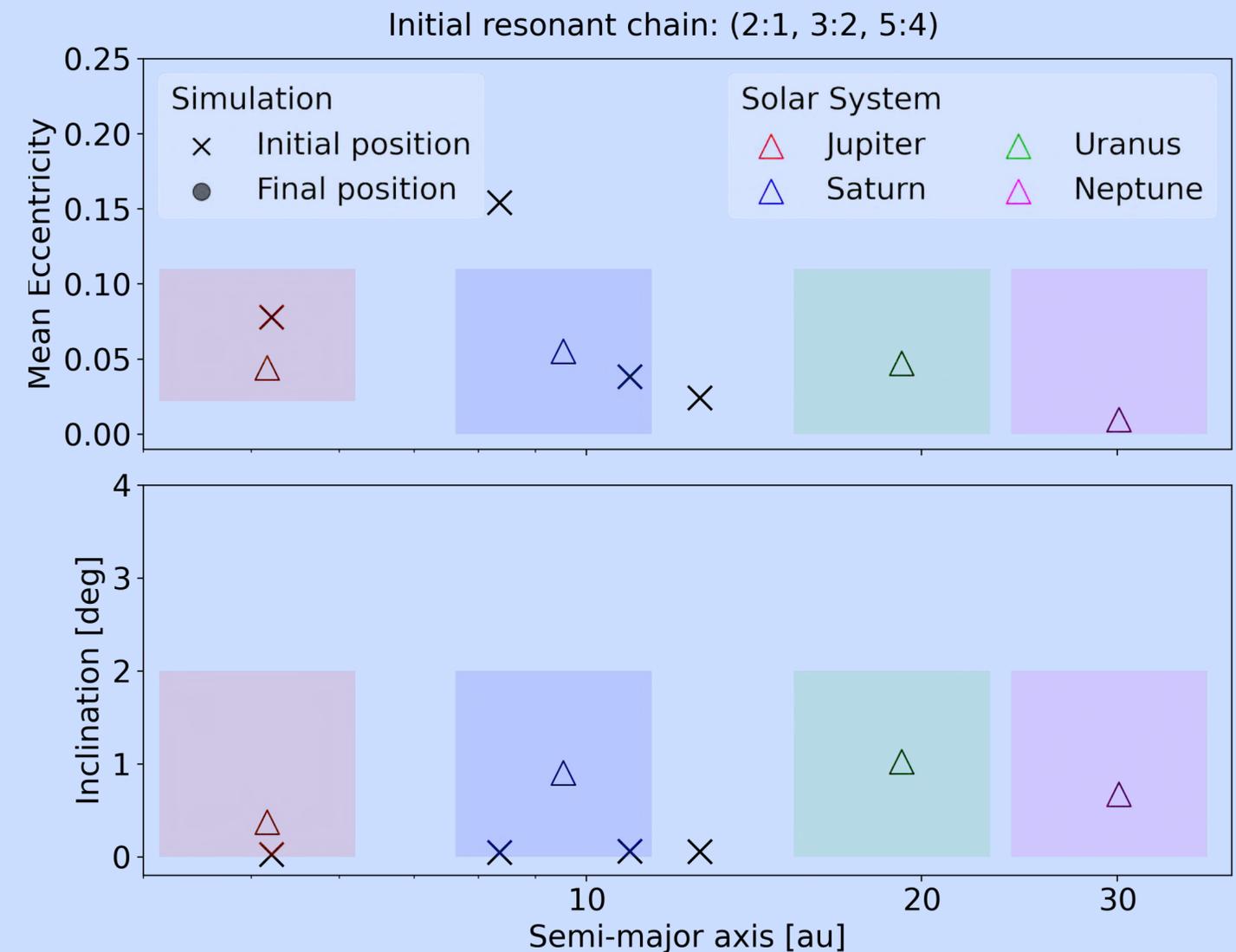


CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Contraintes du Système Solaire

Critères de Nesvorny & Morbidelli 2012

- **Crit. A:** 4 planètes et dans l'ordre,
- **Crit. B:** orbites proches des orbites d'aujourd'hui,
- **Crit. C:** $e_J > 0.022$, et Jupiter doit avoir une rencontre proche avec une autre planète,
- **Crit. D:** Rapport des périodes J-S doit évoluer "rapidement".



CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

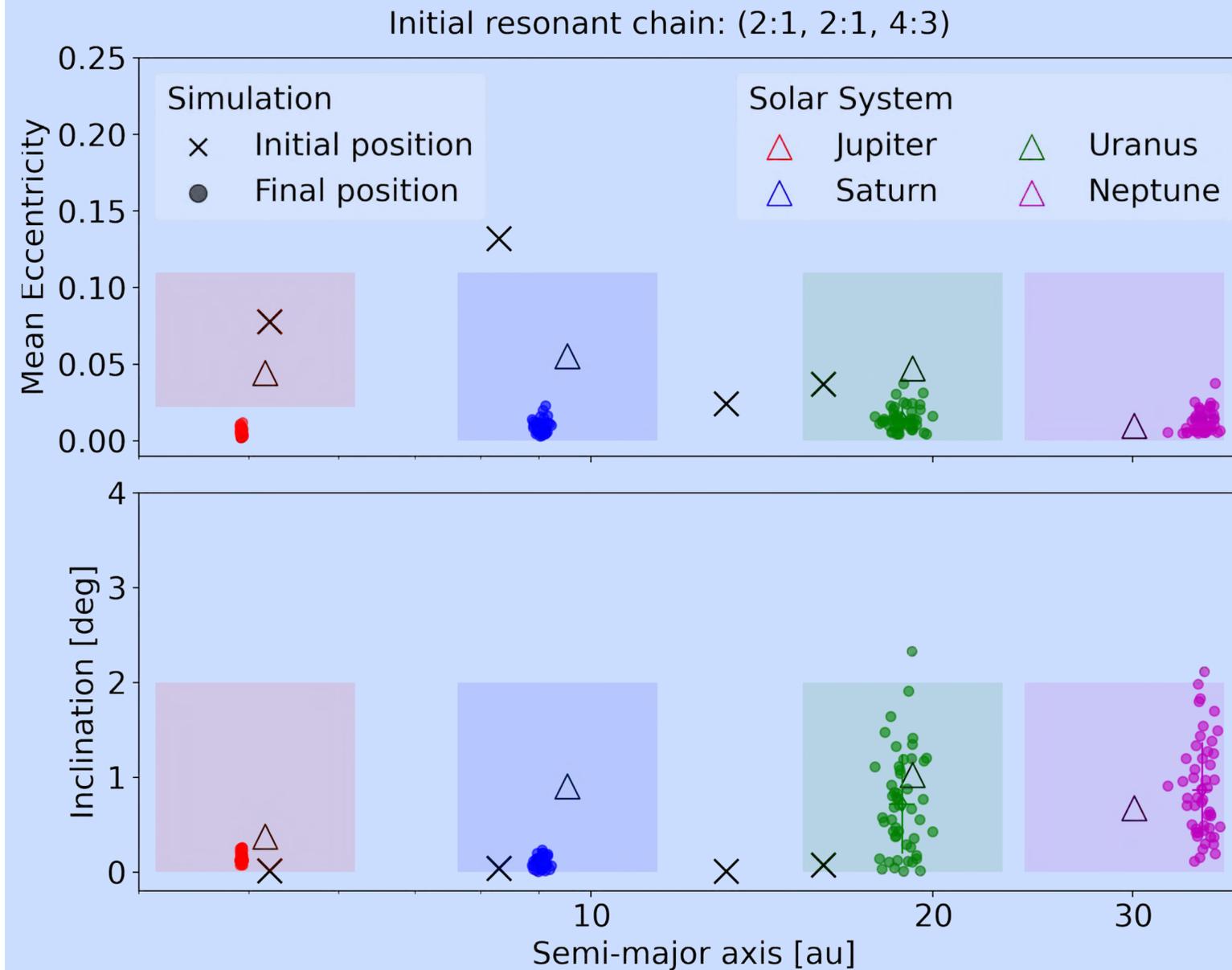
Resonant chain	Name	N_{sim}	M_D (M_{\oplus})	A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
Disque protosolaire froid ($h = 0.035$)								
(2:1, 3:2, 5:4)	C4	200	30	7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	
		200	50	25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1
(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)	C5	200	30	9	4	1 (1)	0; 0	
		200	50	21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5
Disque protosolaire chaud ($h = 0.05$)								
(2:1, 3:2, 4:3)	N4	50	30	98	1	0 (0)	0; 0	
		100	50	69	29	1 (2)	2; 10	1; 0
(2:1, 2:1, 4:3)	N _{bis} 4	50	30	100	100	0 (0)	0; 0	
		50	50	100	96	0 (0)	0; 70	
(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)	N _{bis} 5	100	30	19	10	0 (2)	3; 0	
		100	50	4	3	0 (0)	1; 1	

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Resonant chain	Name	N_{sim}	M_D (M_{\oplus})	A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
Disque protosolaire froid ($h = 0.035$)								
(2:1, 3:2, 5:4)	C4	200	30	7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	
		200	50	25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1
(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)	C5	200	30	9	4	1 (1)	0; 0	
		200	50	21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5
Disque protosolaire chaud ($h = 0.05$)								
(2:1, 3:2, 4:3)	N4	50	30	98	1	0 (0)	0; 0	
		100	50	69	29	1 (2)	2; 10	1; 0
(2:1, 2:1, 4:3)	$N_{\text{bis}4}$	50	30	100	100	0 (0)	0; 0	
		50	50	100	96	0 (0)	0; 70	
(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)	$N_{\text{bis}5}$	100	30	19	10	0 (2)	3; 0	
		100	50	4	3	0 (0)	1; 1	

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Disque protosolaire chaud

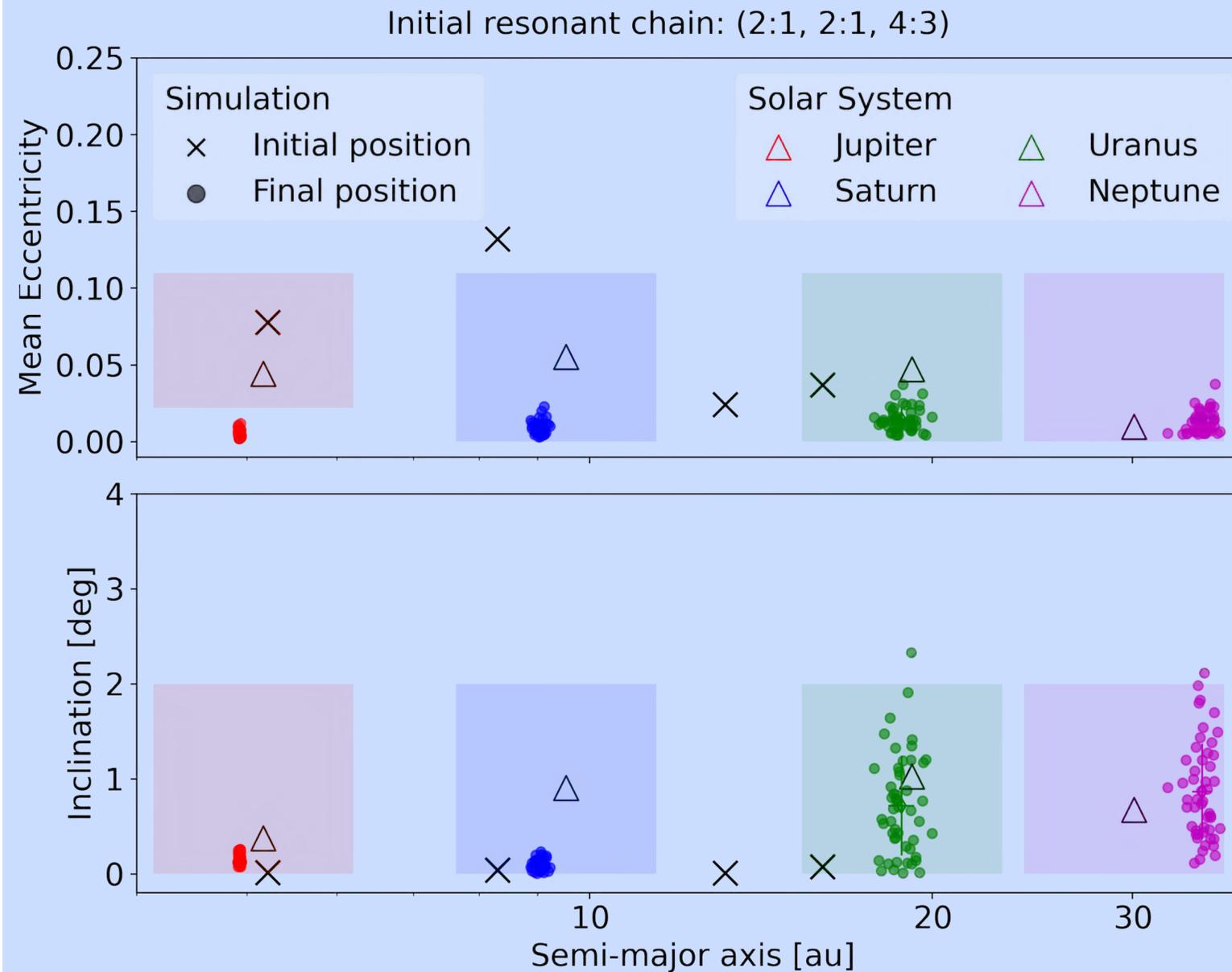


$$M_D = 50M_{\oplus}$$

A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
100	96	0 (0)	0; 70	

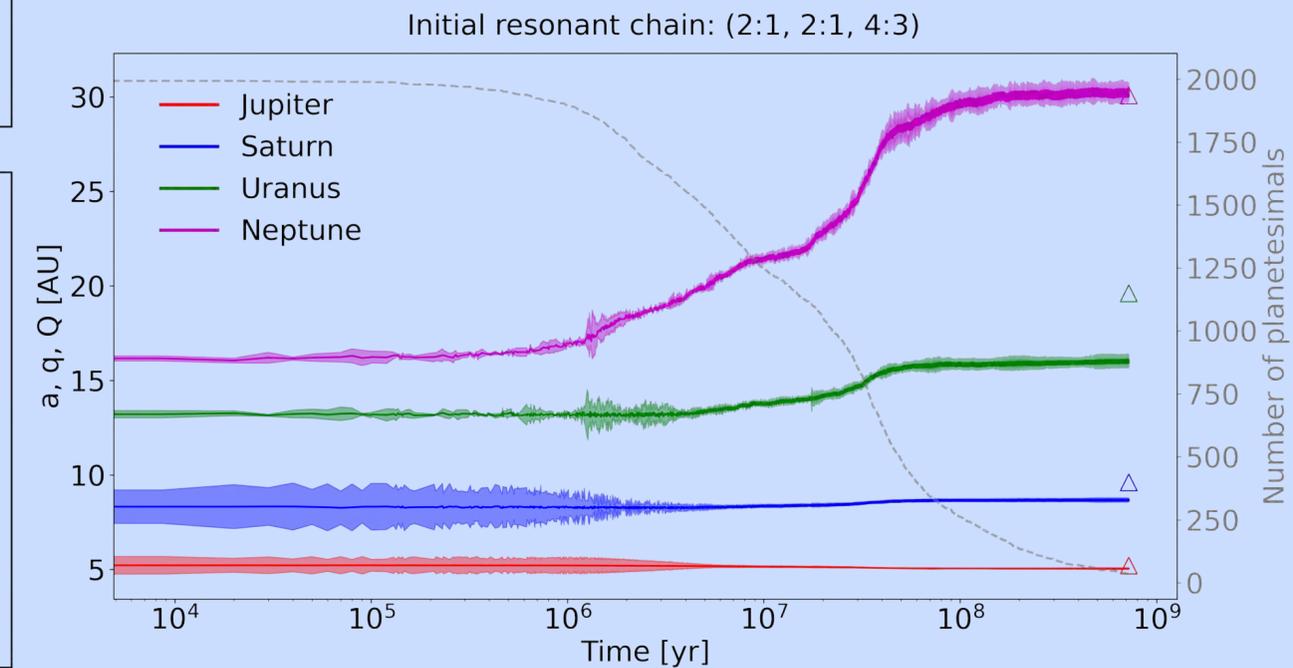
CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Disque protosolaire chaud



$$M_D = 50M_{\oplus}$$

A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
100	96	0 (0)	0; 70	



CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Resonant chain	Name	N_{sim}	M_D (M_{\oplus})	A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
Disque protosolaire froid ($h = 0.035$)								
(2:1, 3:2, 5:4)	C4	200	30	7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	
		200	50	25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1
(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)	C5	200	30	9	4	1 (1)	0; 0	
		200	50	21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5
Disque protosolaire chaud ($h = 0.05$)								
(2:1, 3:2, 4:3)	N4	50	30	98	1	0 (0)	0; 0	
		100	50	69	29	1 (2)	2; 10	1; 0
(2:1, 2:1, 4:3)	$N_{\text{bis}4}$	50	30	100	100	0 (0)	0; 0	
		50	50	100	96	0 (0)	0; 70	
(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)	$N_{\text{bis}5}$	100	30	19	10	0 (2)	3; 0	
		100	50	4	3	0 (0)	1; 1	

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

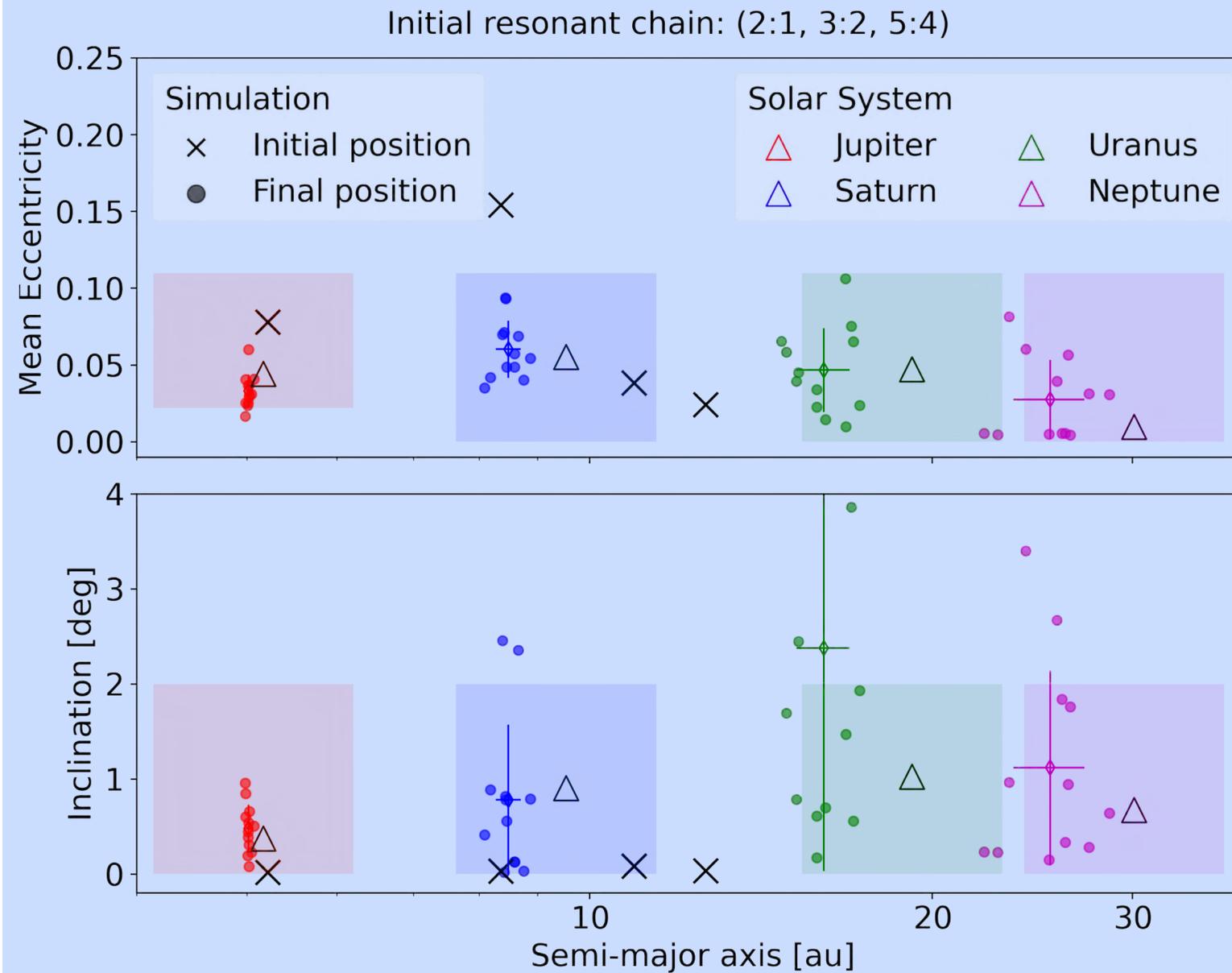
Resonant chain	Name	N_{sim}	M_D (M_{\oplus})	A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
Disque protosolaire froid ($h = 0.035$)								
(2:1, 3:2, 5:4)	C4	200	30	7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	
		200	50	25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1
(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)	C5	200	30	9	4	1 (1)	0; 0	
		200	50	21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5
Disque protosolaire chaud ($h = 0.05$)								
(2:1, 3:2, 4:3)	N4	50	30	98	1	0 (0)	0; 0	
		100	50	69	29	1 (2)	2; 10	1; 0
(2:1, 2:1, 4:3)	N _{bis} 4	50	30	100	100	0 (0)	0; 0	
		50	50	100	96	0 (0)	0; 70	
(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)	N _{bis} 5	100	30	19	10	0 (2)	3; 0	
		100	50	4	3	0 (0)	1; 1	

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Resonant chain	Name	N_{sim}	M_D (M_{\oplus})	A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
Disque protosolaire froid ($h = 0.035$)								
(2:1, 3:2, 5:4)	C4	200	30	7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	
		200	50	25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1
(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)	C5	200	30	9	4	1 (1)	0; 0	
		200	50	21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5
Disque protosolaire chaud ($h = 0.05$)								
(2:1, 3:2, 4:3)	N4	50	30	98	1	0 (0)	0; 0	
		100	50	69	29	1 (2)	2; 10	1; 0
(2:1, 2:1, 4:3)	N _{bis} 4	50	30	100	100	0 (0)	0; 0	
		50	50	100	96	0 (0)	0; 70	
(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)	N _{bis} 5	100	30	19	10	0 (2)	3; 0	
		100	50	4	3	0 (0)	1; 1	

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Disque protosolaire froid

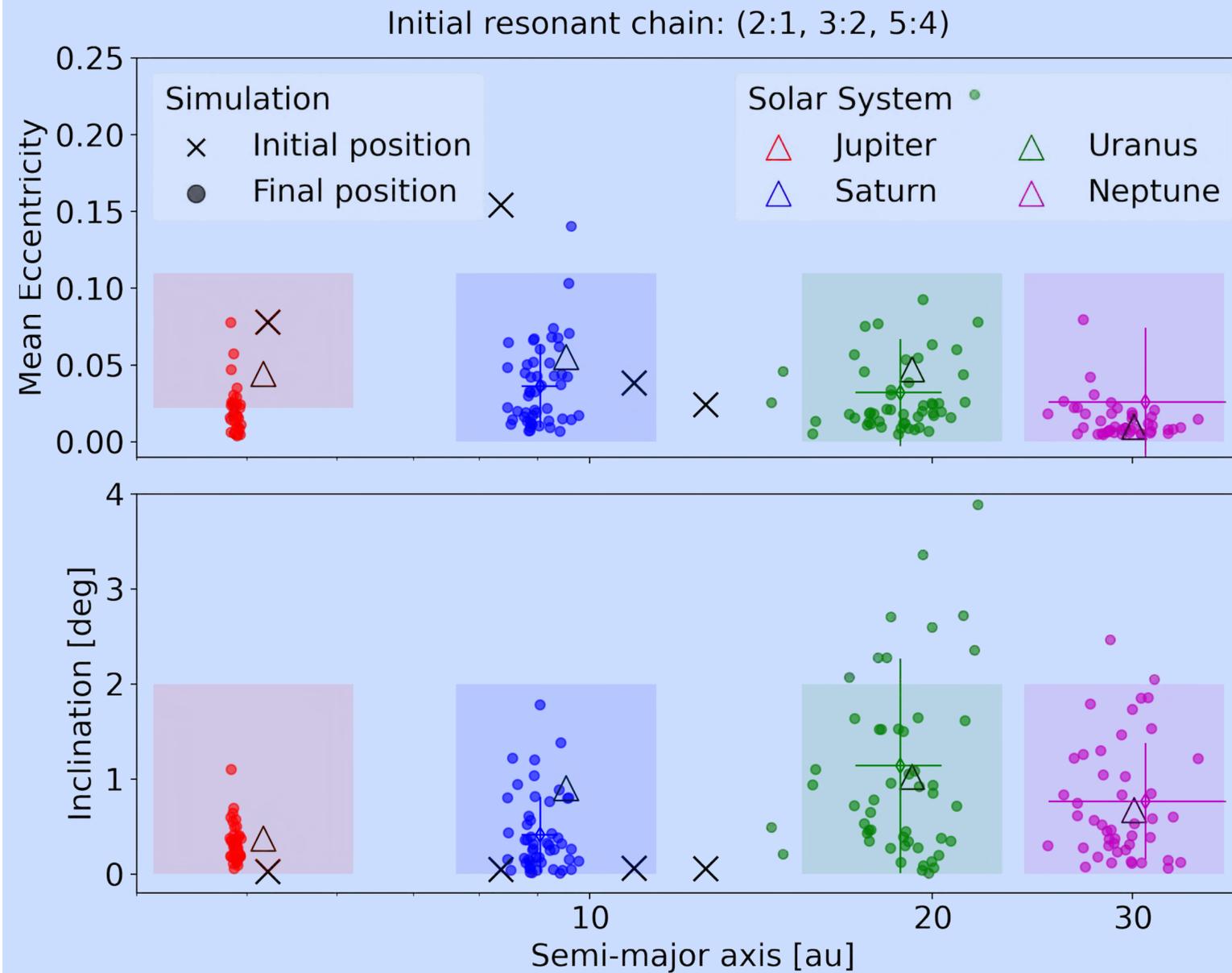


$$M_D = 30M_{\oplus}$$

A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Disque protosolaire froid

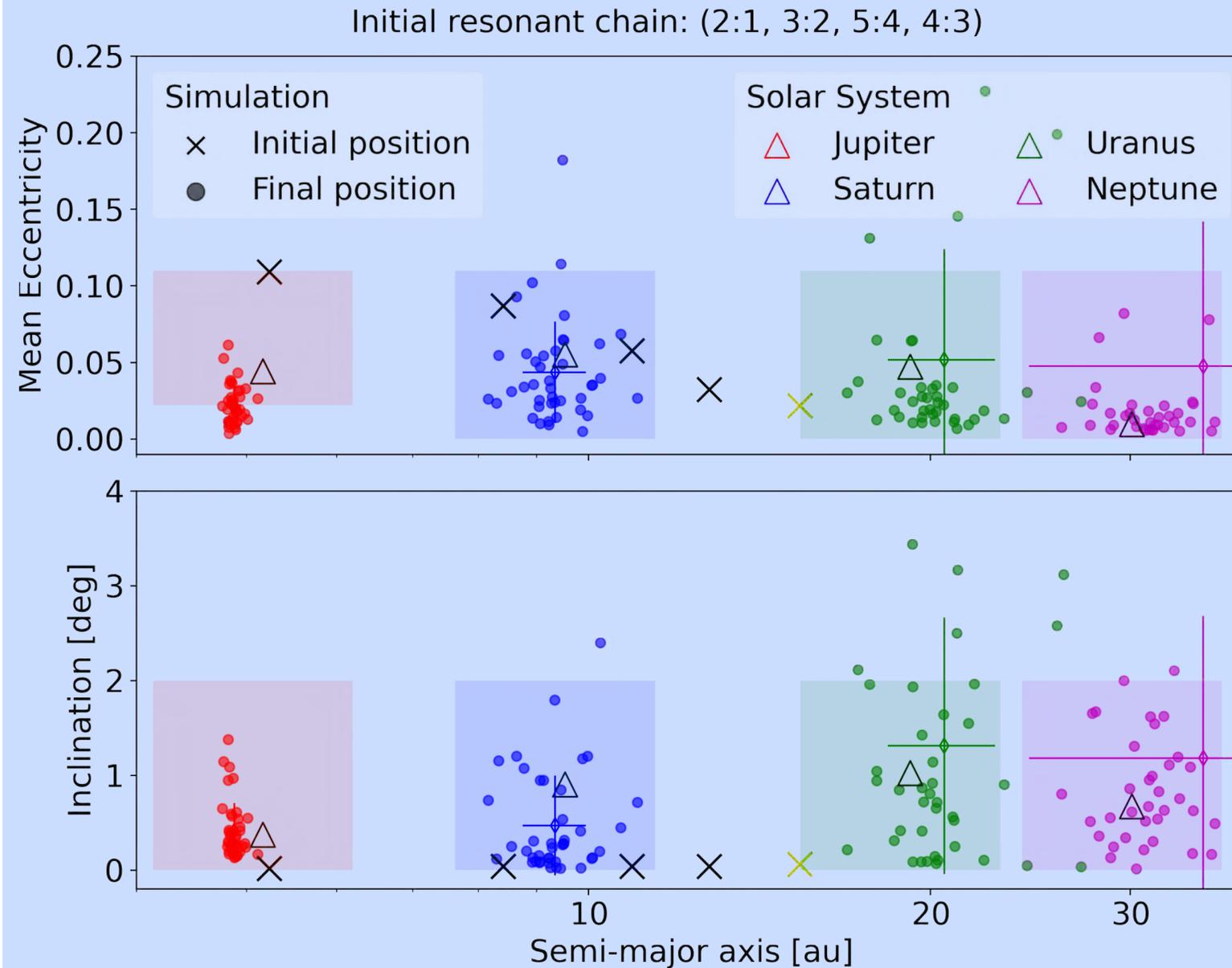


$$M_D = 50M_{\oplus}$$

A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Disque protosolaire froid



$$M_D = 50M_{\oplus}$$

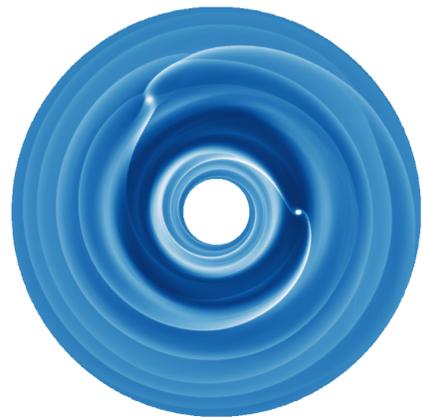
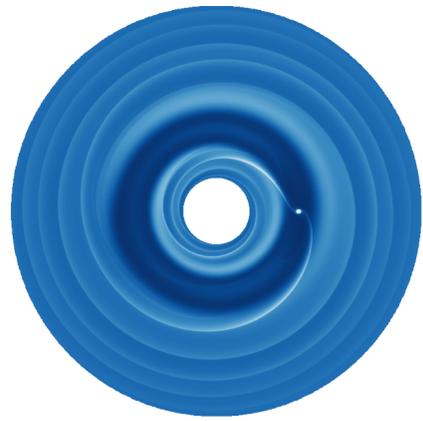
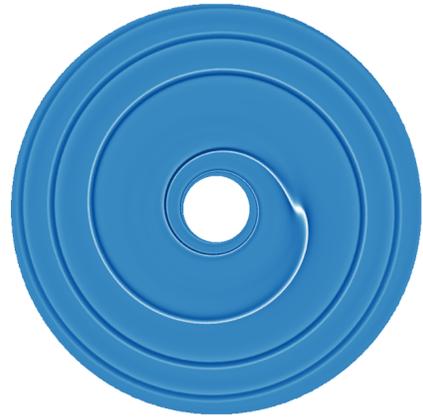
A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5

5 Planètes

CONSÉQUENCES SUR LE MODÈLE DE NICE

Resonant chain	Name	N_{sim}	M_D (M_{\oplus})	A (%)	B (%)	C (C*) (%)	D; D* (%)	CnD; CnD* (%)
Disque protosolaire froid ($h = 0.035$)								
(2:1, 3:2, 5:4)	C4	200	30	7	0.5	0.5 (0.5)	0; 0	
		200	50	25.5	18	1 (4)	3; 10	0; 1
(2:1, 3:2, 5:4, 4:3)	C5	200	30	9	4	1 (1)	0; 0	
		200	50	21	13.5	1.5 (3)	3; 4	0.5; 1.5
Disque protosolaire chaud ($h = 0.05$)								
(2:1, 3:2, 4:3)	N4	50	30	98	1	0 (0)	0; 0	
		100	50	69	29	1 (2)	2; 10	1; 0
(2:1, 2:1, 4:3)	$N_{\text{bis}4}$	50	30	100	100	0 (0)	0; 0	
		50	50	100	96	0 (0)	0; 70	
(2:1, 2:1, 4:3, 5:4)	$N_{\text{bis}5}$	100	30	19	10	0 (2)	3; 0	
		100	50	4	3	0 (0)	1; 1	

À RETENIR



- * Résonance 2:1 entre Jupiter & Saturne, migration vers l'intérieur.
 - * Scénario du Grand Tack pas possible.
- * Migration vers l'extérieur avec 4 planètes dans disque froid.
- * Formation de chaînes de résonances compliquée.

Le Système Solaire aurait-il pu se former dans un disque à faible viscosité ?

- * Si disque protosolaire était froid (mince)
- * Si le disque de planétésimaux était massif ($\sim 50M_{\oplus}$)

CONCLUSION

Le système solaire aurait-il pu se former dans un disque à faible viscosité ?

