

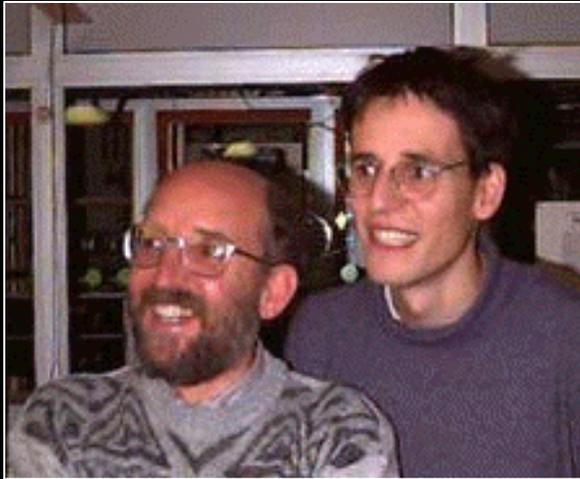
## Systeme solaire

- *Grande diversité : peu de choses en commun entre les diverses planètes telluriques, entre les planètes telluriques et les géantes gazeuses...*
- *Originalité, unité, uniformité :*
  1. *structurelle : 4 petites planètes rocheuses internes, 4 planètes géantes ou semi géantes externes, deux ceintures d'astéroïdes, le tout orbitant dans le même plan (à quelques degrés près)*
  2. *générique : même âge, même mode de formation : effondrement d'un nuage de gaz et de poussières avec formation d'un disque protoplanétaire suivi d'une séquence de processus imprimant leur marque à chaque étape,*
  3. *des mécanismes : les lois régissant la genèse et le fonctionnement du système étant invariantes dans l'espace et dans le temps*

modèle, prototype ?

*Diversité, universalité... 2<sup>ème</sup> partie*





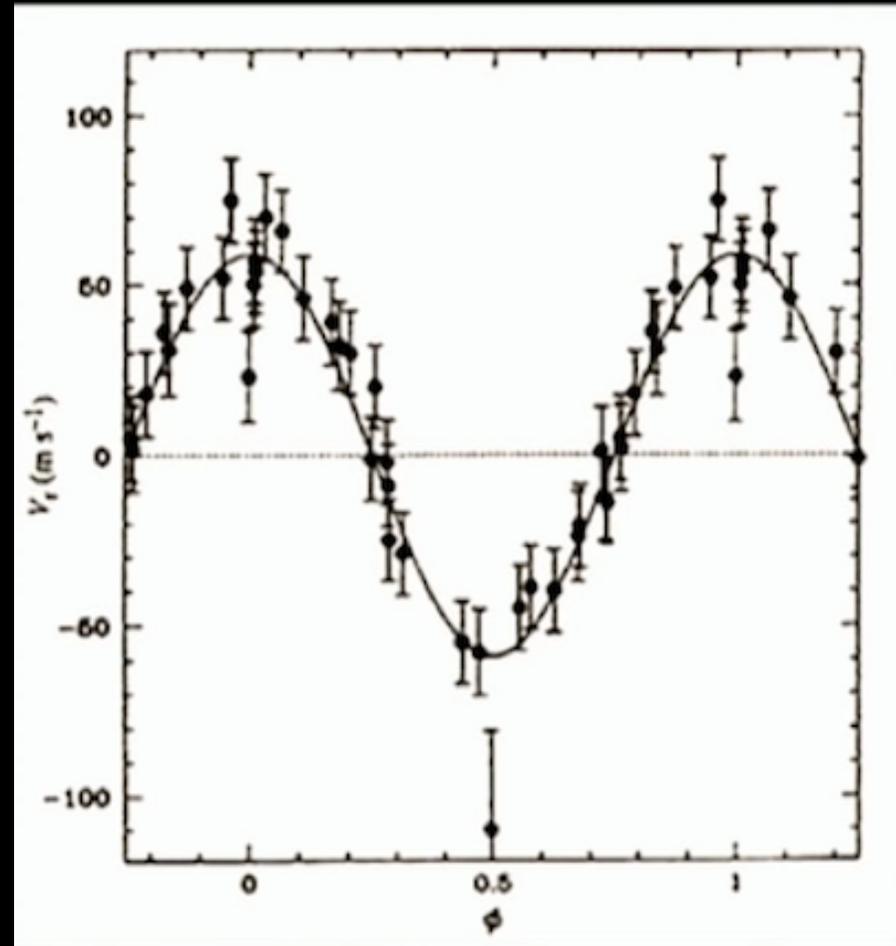
1995 M. Mayor et D. Queloz



Cassegrain 193 cm – O.H.P.

## 51 Pegasi b

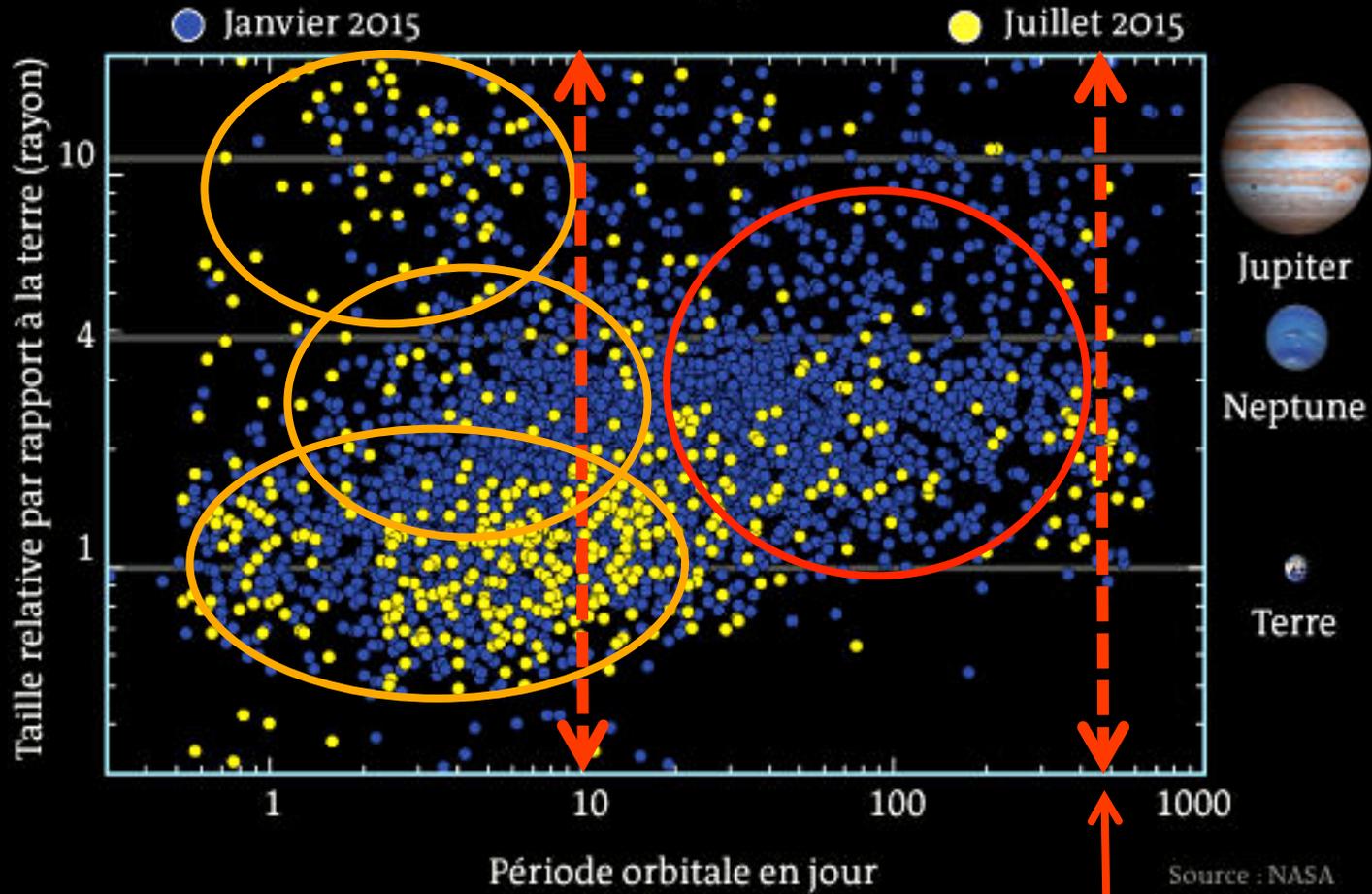
- *orbite autour de 51 Pegasi (naine jaune de masse solaire à environ 50 années lumière dans la constellation de Pégase)*
- *géante gazeuse, 0,46 +/- 0,06 masse et 1,9 +/- 0,3 rayon de Jupiter (inflated hot jupiter)*
- *à 0,05 UA soit 7,5 millions de km de son étoile (Mercure est à 58 - 59 millions de km du Soleil soit 0,387 UA )*
- *sa période orbitale est d'à peine plus de 4 jours*



*Vitesse radiale spectrographe ELODIE (Observatoire de Haute Provence en collaboration avec A. Baranne Observatoire de Marseille et M. Mayor de Genève)*

# Nouvelles planètes candidates de Kepler

Total : 4 696

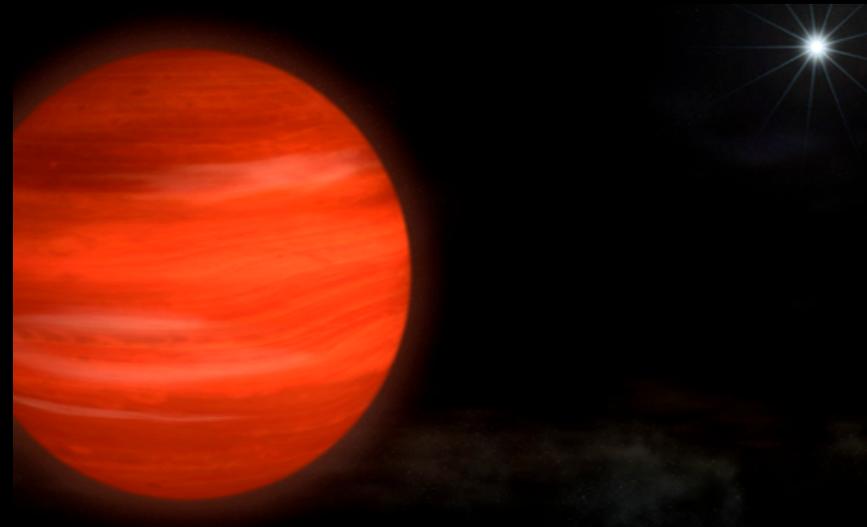


Source : NASA

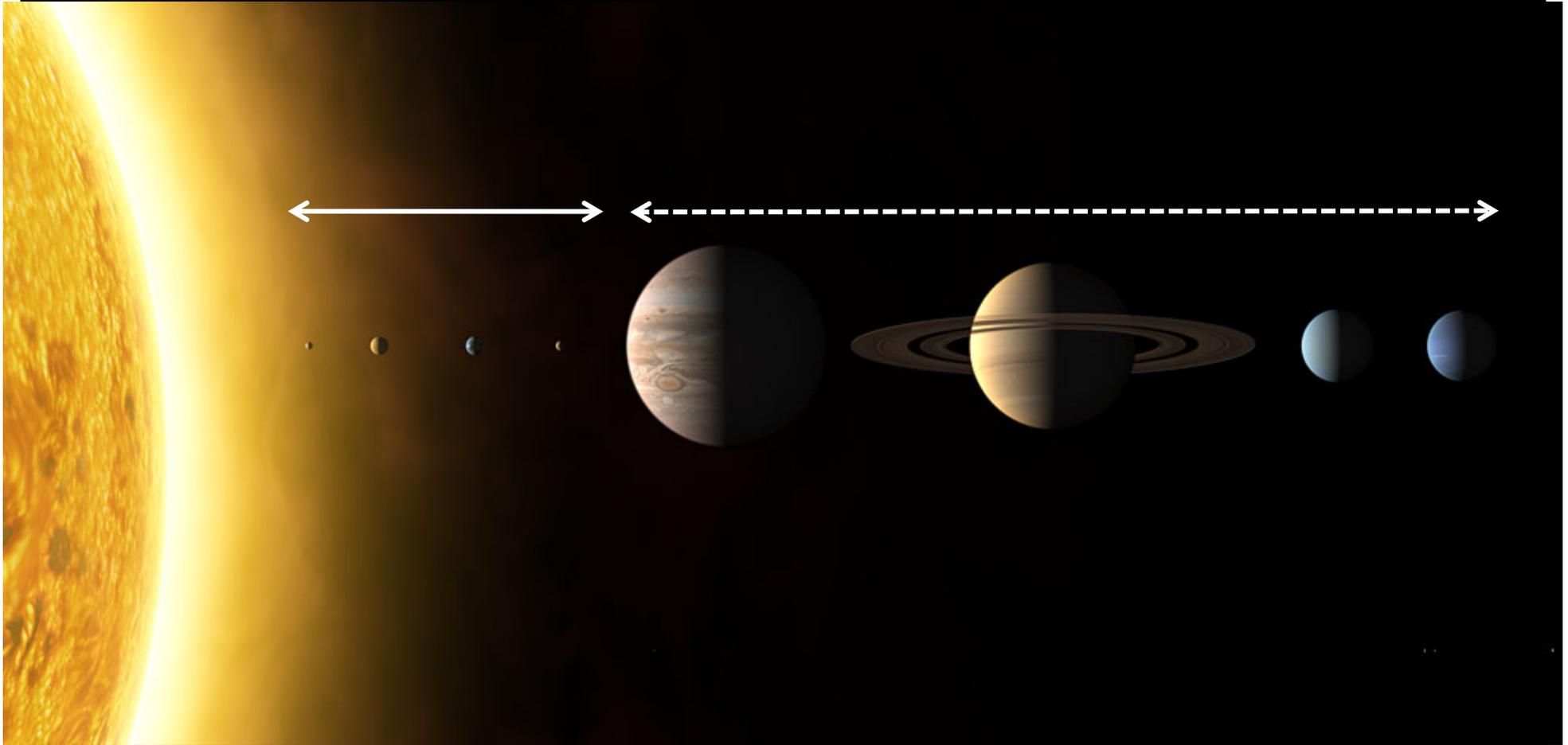
**Terre**



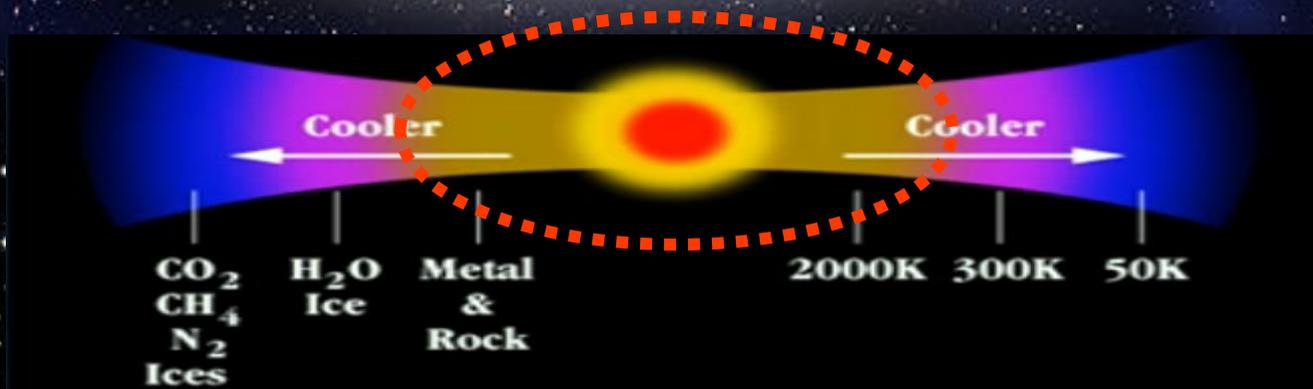
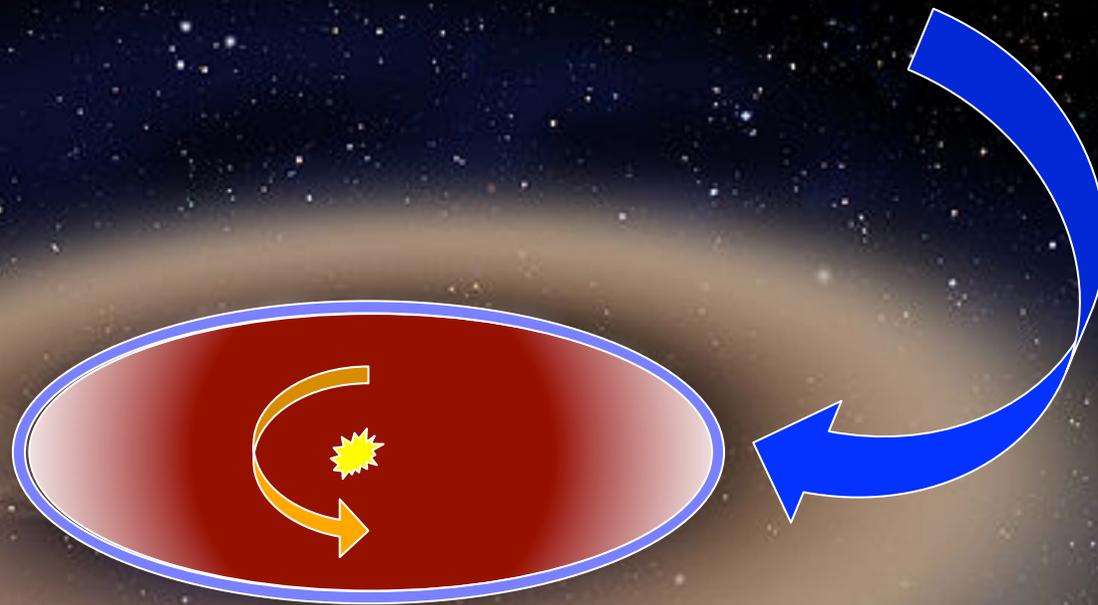
*CoRoT-3b : 4 jours  $\frac{1}{4}$ , 0,05 UA ,  
20 masses joviennes densité supérieure au platine*

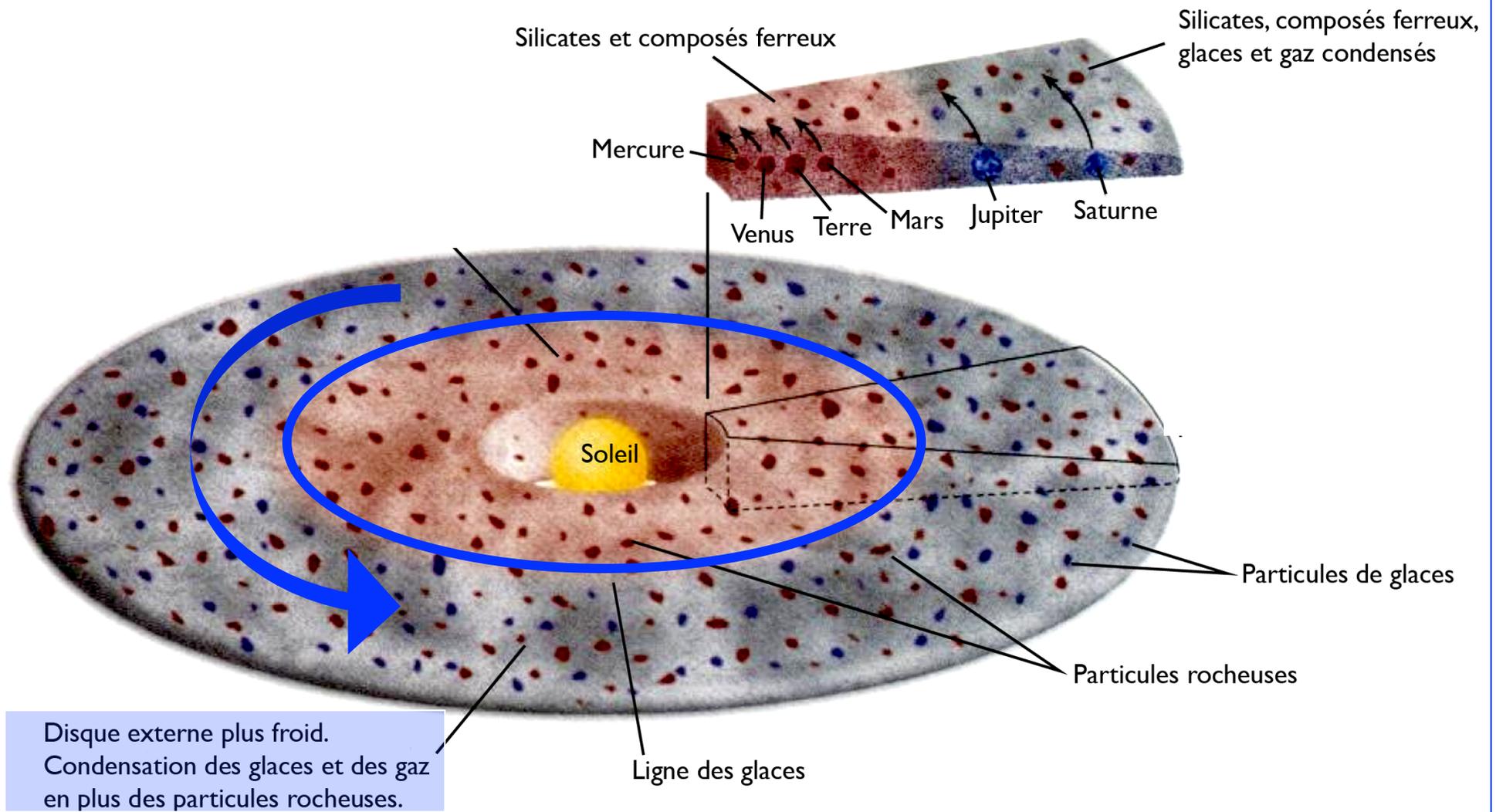


*Kappa Andromedae b : 55 UA  
12.8 masses joviennes*



le système solaire semble exception... comment l'expliquer ?

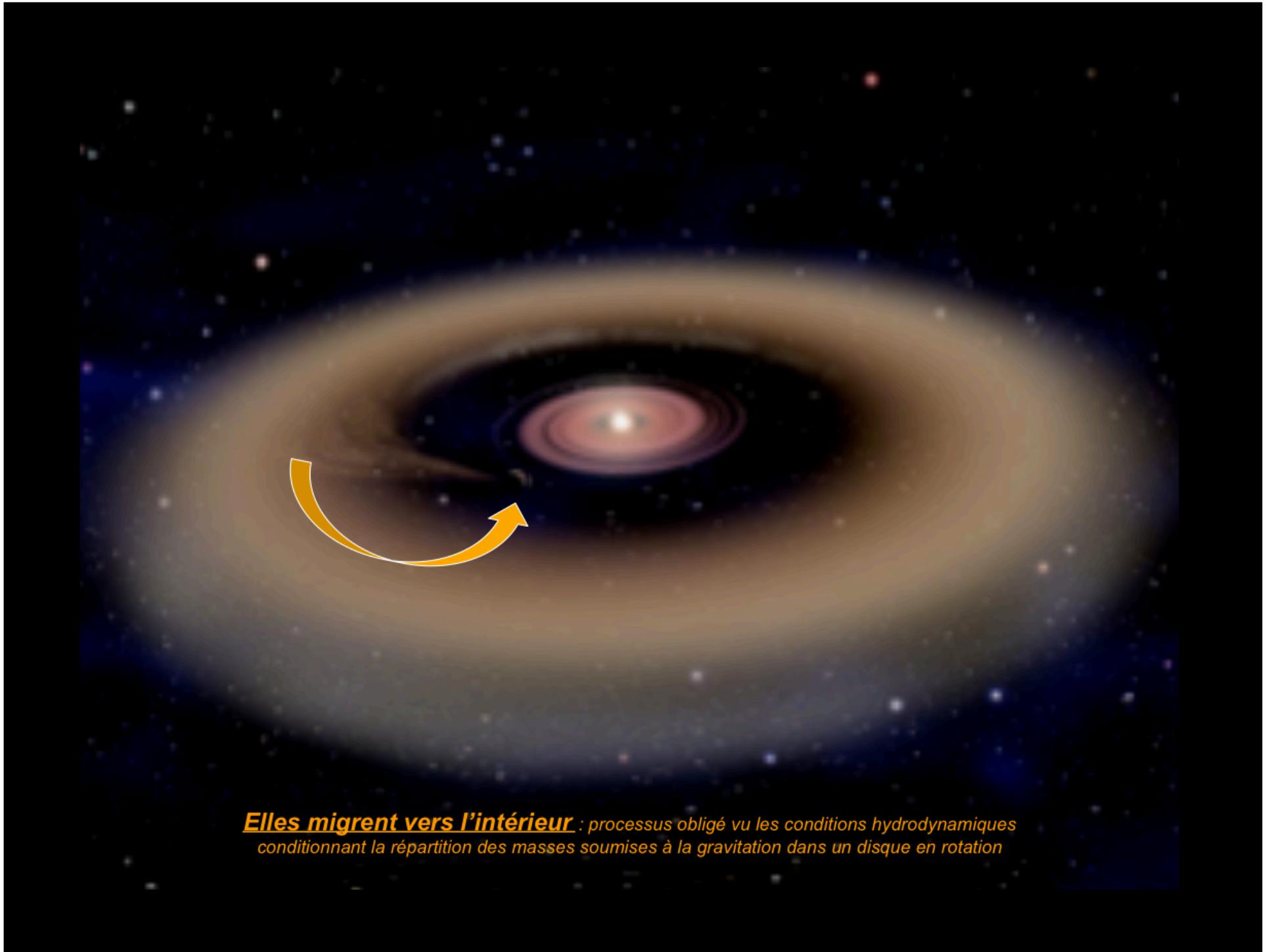




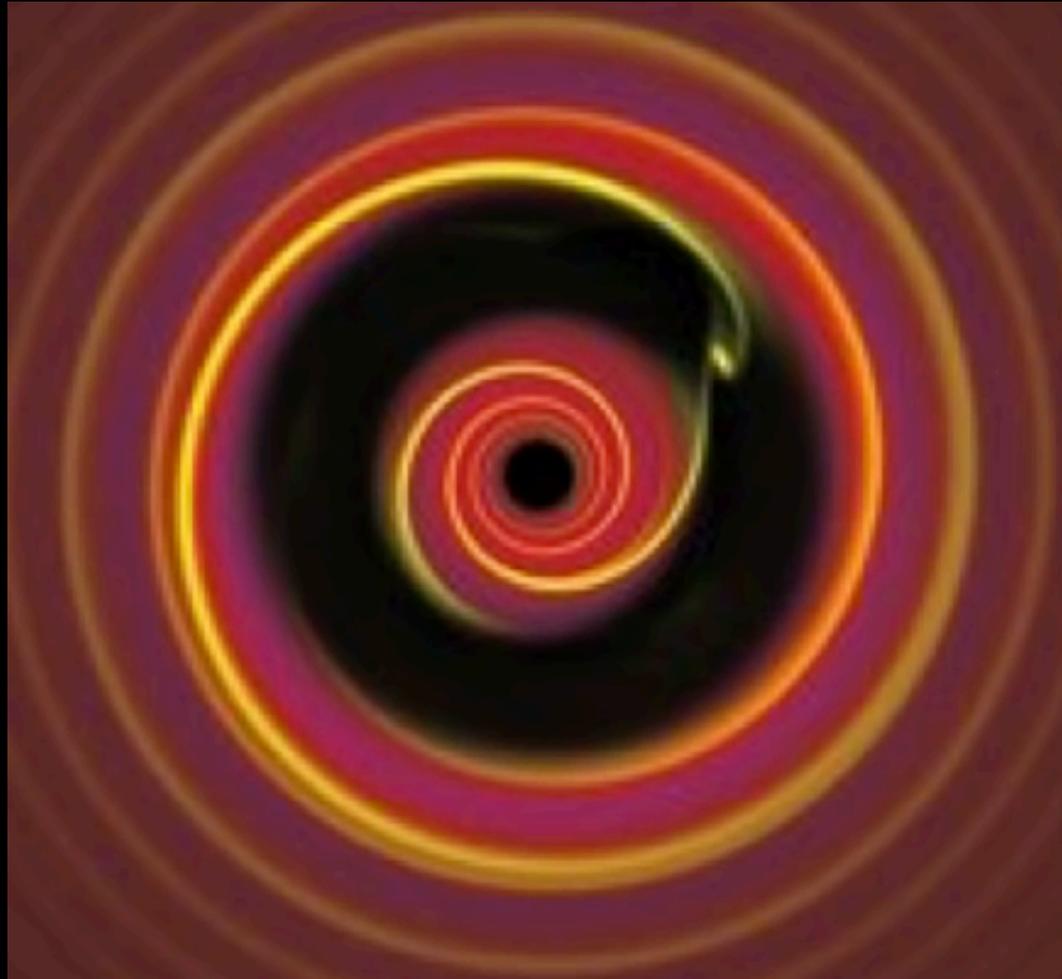
**Compartiment externe : lieu de formation des géantes gazeuses**

### En résumé :

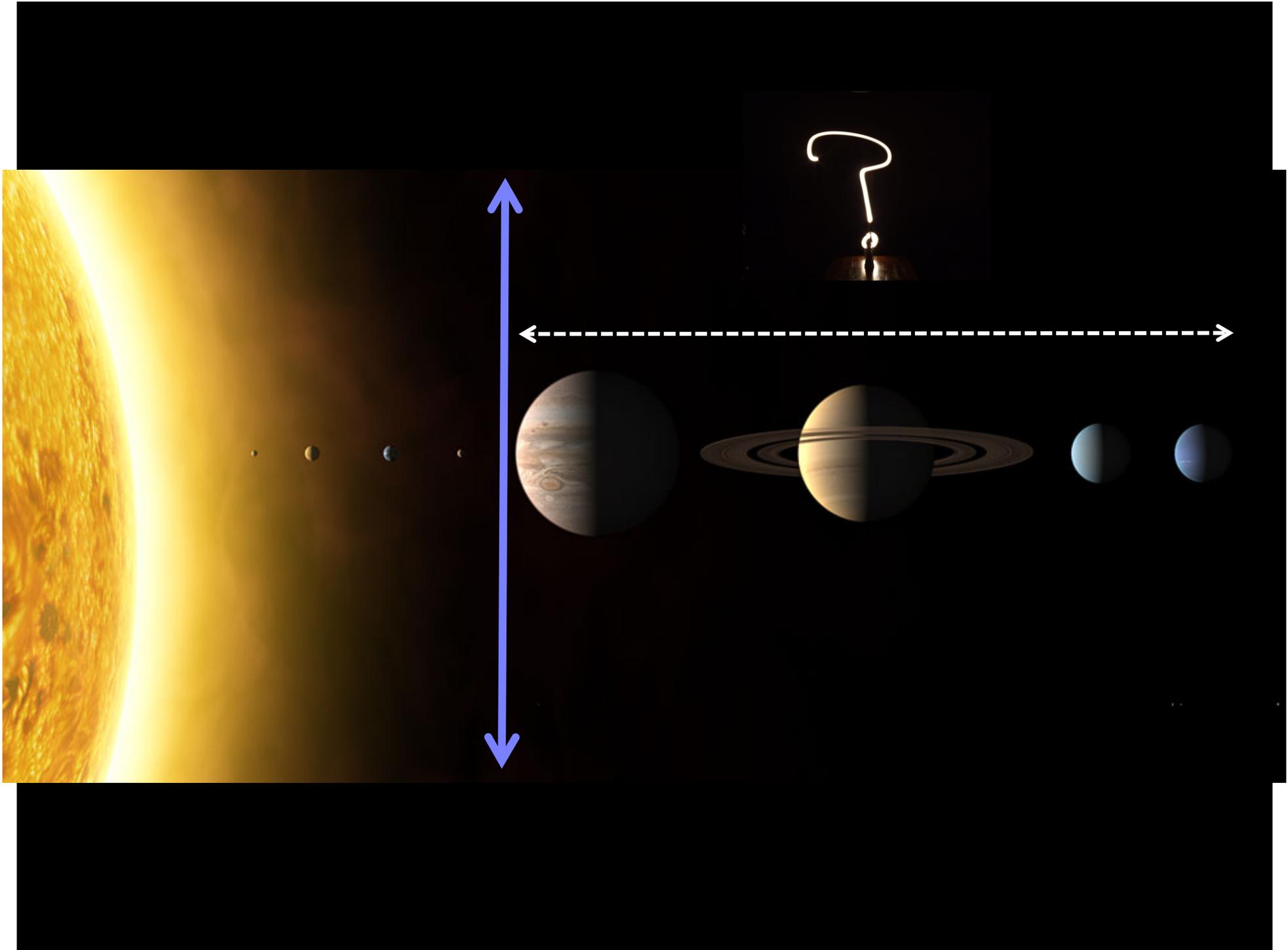
- *les planètes telluriques se forment lentement dans le compartiment interne,*
- *les géantes gazeuses se forment rapidement, dans le compartiment externe là où il y a de la glace en quantité pour participer à la constitution d'un noyau d'accrétion. Il est en effet plus facile d'accréter des boules de neige glacée mélangées à de la terre que des boules de sable desséché !*
- **Question** : *puisque les géantes gazeuses se forment en périphérie là où il y a de la glace comment se fait il que l'on puisse en trouver proche de leur étoile ?*

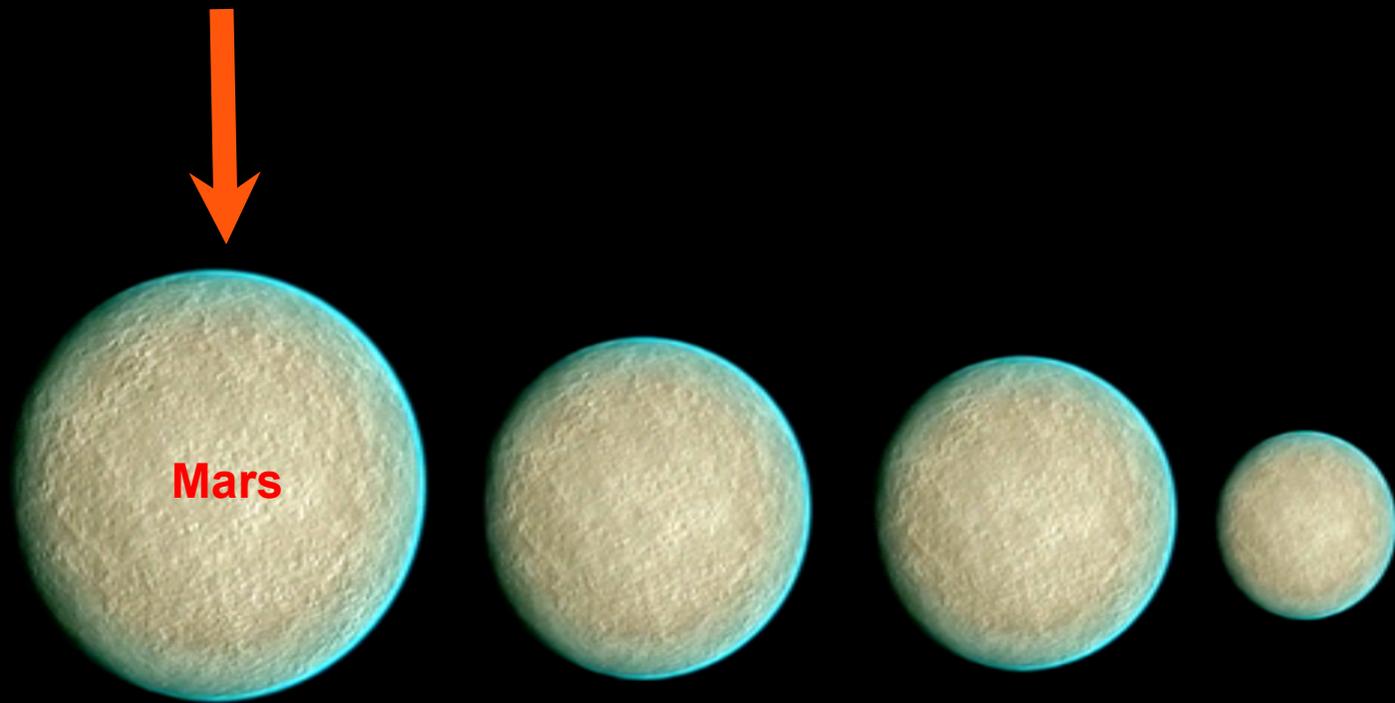


**Elles migrent vers l'intérieur** : processus obligé vu les conditions hydrodynamiques conditionnant la répartition des masses soumises à la gravitation dans un disque en rotation



**En migrant la géante gazeuse fait le ménage !**

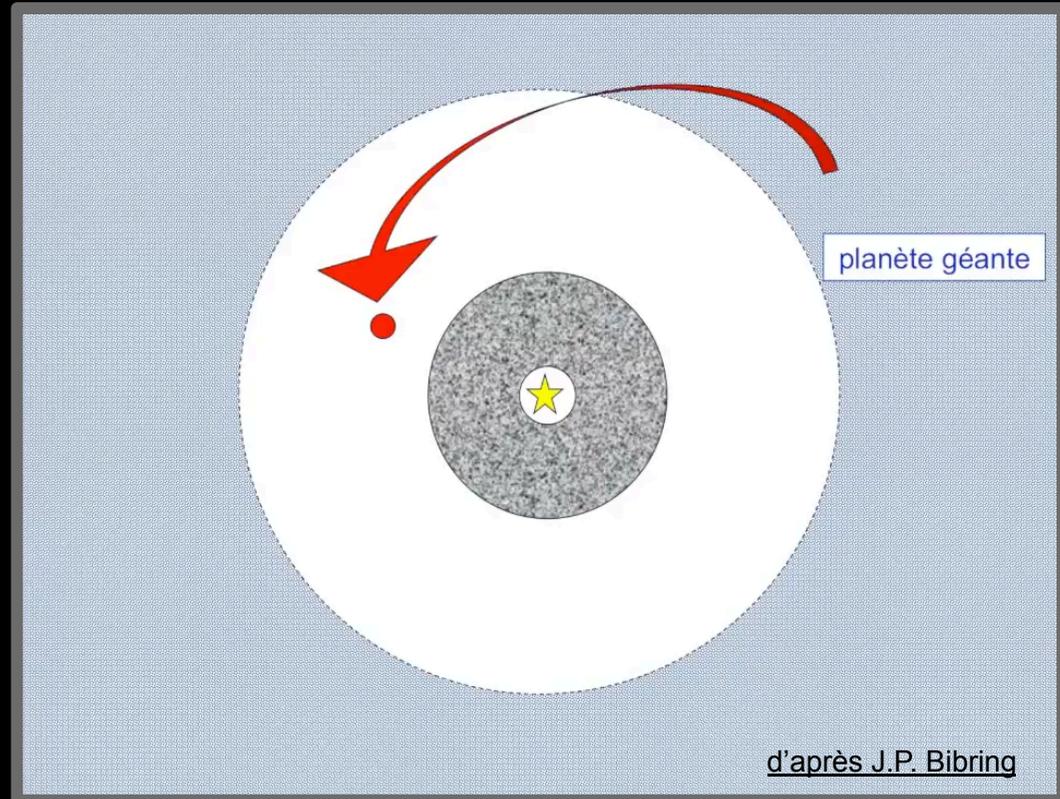




d'après J.P. Bibring



Alessandro Morbidelli



1. la planète Jupiter c'est formée au delà de la limite des glaces,
2. elle a migré vers l'intérieur accréant gaz, débris, poussières jusqu'à environ une U.A. ; ce processus eut lieu avant la formation des planètes telluriques
3. si Jupiter avait poursuivi son périple s'approchant du Soleil faute de matériaux à accréter, les planètes rocheuses n'auraient pu se former



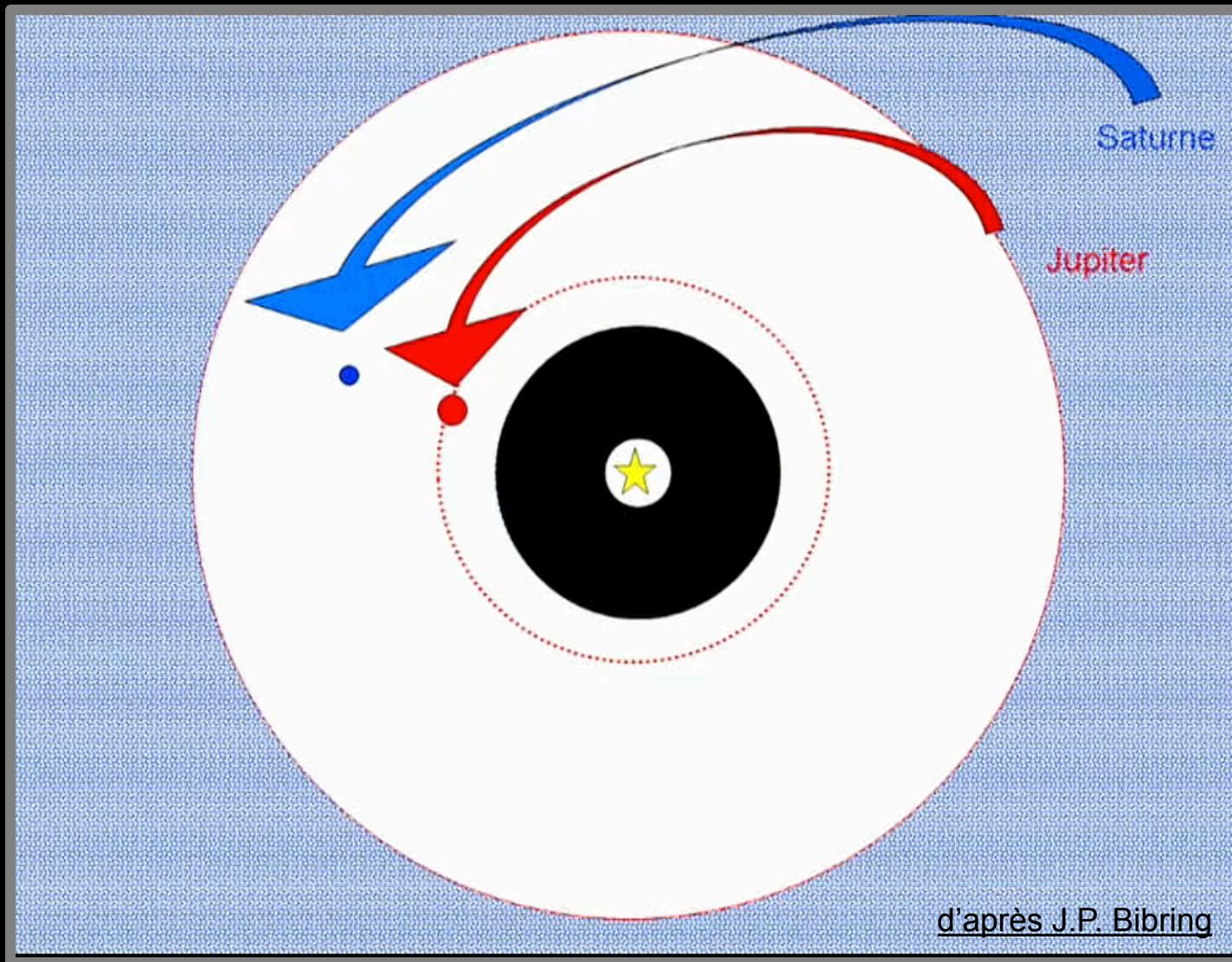
d'après J.P. Bibring

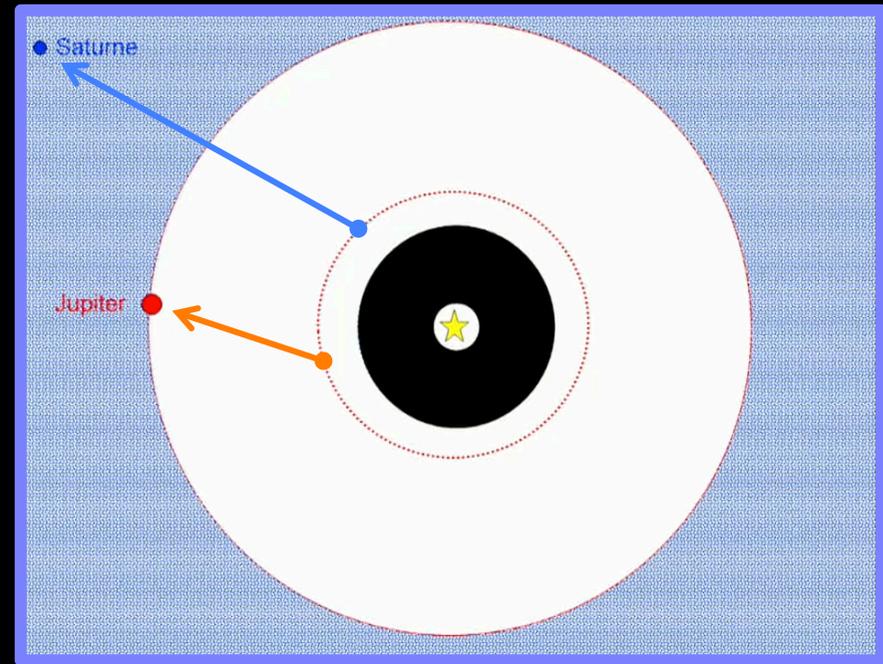
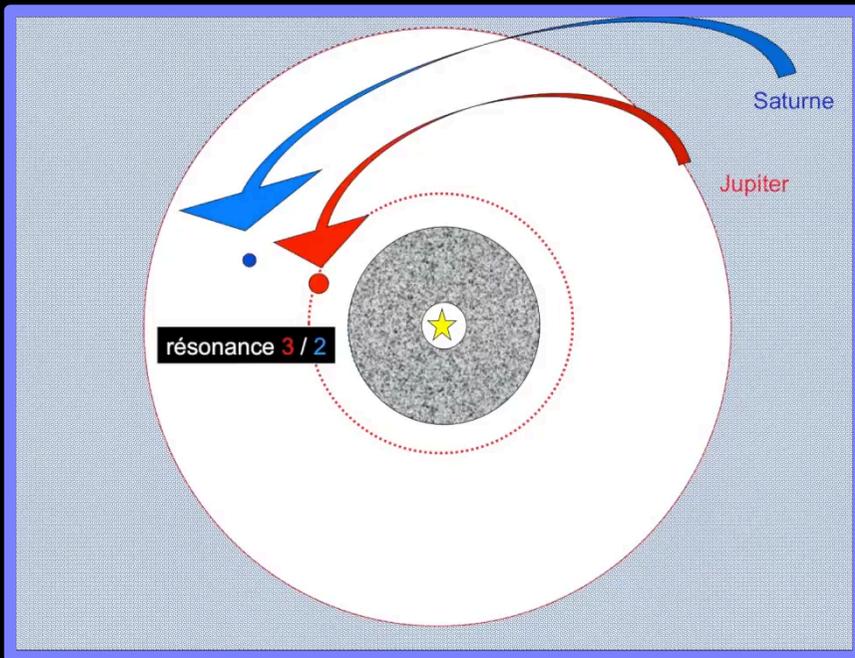
En migrant Jupiter a nettoyé le disque des matériaux nécessaires à la formation d'une planète rocheuse, Ne disposant plus de matériel en quantité suffisante pour se former comme les simulations le laissaient prévoir, Mars vit sa masse réduite au dixième de masse terrestre.



d'après J.P. Bibring

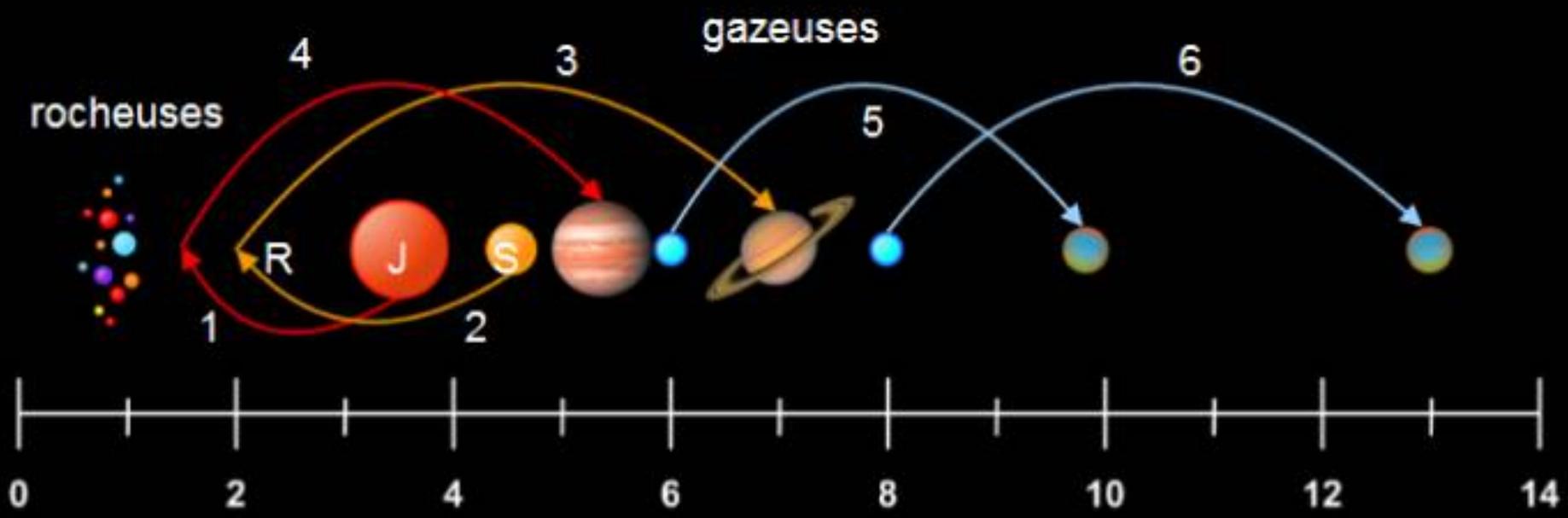
En migrant Jupiter a nettoyé le disque des matériaux nécessaires à la formation d'une planète rocheuse, Ne disposant plus de matériel en quantité suffisante pour se former comme les simulations le laissaient prévoir, Mars vit sa masse réduite au dixième de masse terrestre.





Comment se fait il que Jupiter et Saturne  
se trouvent au delà de 5 U.A. ?

d'après J.P. Bibring





grand bombardement tardif



grand bombardement tardif

## **Que retenir ?**

1. *le système solaire : un prototype, un modèle quant à son organisation, quant à son mode de formation ? ... à priori il n'en est rien, aucun système exoplanétaire de type solaire n'ayant été identifié jusqu'à présent.*
2. *nombreux sont les systèmes extra solaires avec des Jupiter chauds très proches de leur étoile, des super terres et des Neptunes à moins d'une unité astronomique,*
3. *les géantes formées au delà de la ligne des glaces ont tendance à migrer précocement vers l'intérieur, elles peuvent toutefois reprendre leur place, voire être éjectées du fait d'interactions, de résonnances... **migration et instabilité étant une des caractéristiques évolutives des systèmes planétaires.***

## **biais observationnel**

***Il est plus facile d'observer de grosses planètes orbitant tout près de leur étoile que des planètes dont la période orbitale peut excéder le siècle...***

Showing 3533 planets / 2650 planetary systems / 595 multiple planet systems

All fields

Show  entries

Planet Search

Show / hide columns

Planet	Mass ( $M_{\text{Jup}}$ )	Radius ( $R_{\text{Jup}}$ )	Period (day)	<i>a</i> (AU)	<i>e</i>	<i>i</i> (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
Kepler-1647 (AB) b	1.52	1.06	1107.5923	2.7205	0.0581	90.0972	—	2015	2016-10-14
HD 189733 b	1.142	1.138	2.21857312	0.03142	0.0041	85.51	0.001628	2005	2016-10-08
GJ 667 C c	0.012	—	28.14	0.125	0.02	—	0.018289	2011	2016-10-08
HR 2562 b	30	—	—	20.3	—	—	—	2016	2016-10-06
K2-39	0.158	0.73	4.60543	0.062	0	80	—	2016	2016-10-02
Kepler-21 b	0.016	0.1462	2.78578	0.0427172	0.02	83.2	0.000394	2011	2016-09-27
OGLE-2007-BLG-349(AB) b	0.25	—	—	2.59	—	—	—	2016	2016-09-22
HD 175370 b	4.6	—	349.5	0.98	0.22	—	—	2016	2016-09-21
Qatar-5 b	4.32	1.107	2.8792319	0.04127	—	88.74	—	2016	2016-09-18
Qatar-4 b	5.85	1.552	1.8053949	0.02861	—	88.82	—	2016	2016-09-18
Qatar-3 b	4.31	1.096	2.5079204	0.03783	—	86.8	—	2016	2016-09-18
KELT-8 b	0.874	1.86	3.24406	0.04571	0.035	82.65	—	2015	2016-09-16
WASP-17 b	0.486	1.991	3.735438	0.0515	0.028	86.83	—	2009	2016-09-14
HAT-P-65 b	0.527	1.89	2.6054552	0.03951	0.3	84.2	—	2016	2016-09-12
GJ 163 c	0.02285	—	25.645	0.1254	0.094	—	—	2012	2016-09-12
HAT-P-66 b	0.783	1.59	2.972086	0.04363	0	86.2	—	2016	2016-09-12
38 Vir b	4.51	4.51	825.9	1.82	0.03	—	—	2016	2016-09-10
V2051 Oph b	7.3	—	—	9	0.37	—	—	2015	2016-09-07
EPIC 211969807 b	—	0.17	1.97419	—	0.18	88	—	2016	2016-09-07
EPIC 211913977 b	—	0.18	14.677286	—	0.1	89.4	—	2016	2016-09-07
EPIC 211916756 b	—	0.33	10.135091	—	0.16	89.4	—	2016	2016-09-07
EPIC 212803289 b	0.97	1.29	18.249	0.159	0.19	87.7	—	2016	2016-09-07
EPIC 211822797 b	—	0.2	21.169619	—	0.18	89.5	—	2016	2016-09-07
EPIC 211970147 b	—	0.12	9.915615	—	0.1	89	—	2016	2016-09-07
EPIC 211990866 b	—	0.31	1.673916	—	0.24	85.1	—	2016	2016-09-07
HD 110014 c	3.1	—	130	0.64	0.44	—	—	2015	2016-09-03
HD 110014 b	10.7	—	882.6	2.31	0.26	—	0.023778	2009	2016-09-03
HD 164509 b	0.48	—	282.4	0.875	0.26	—	0.016827	2011	2016-09-03

Detected by imaging

"imaging" IN detection

Filter

Showing 72 planets / 67 planetary systems / 3 multiple planet systems

All fields

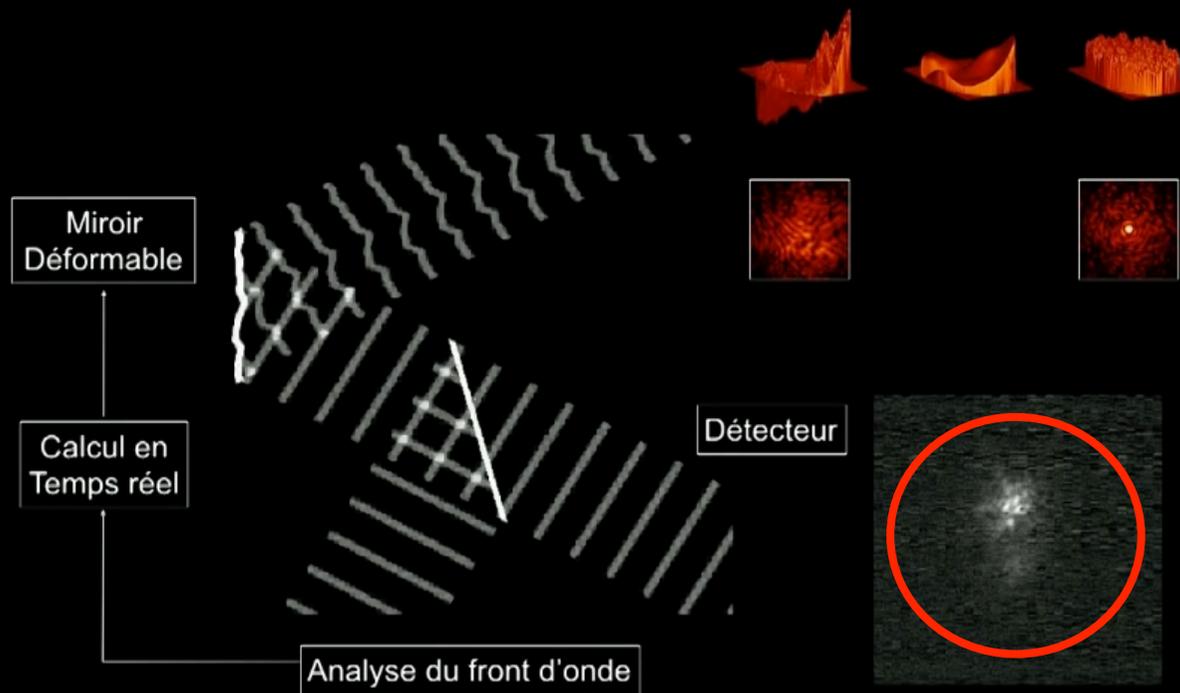
Show 100 entries

Planet Search

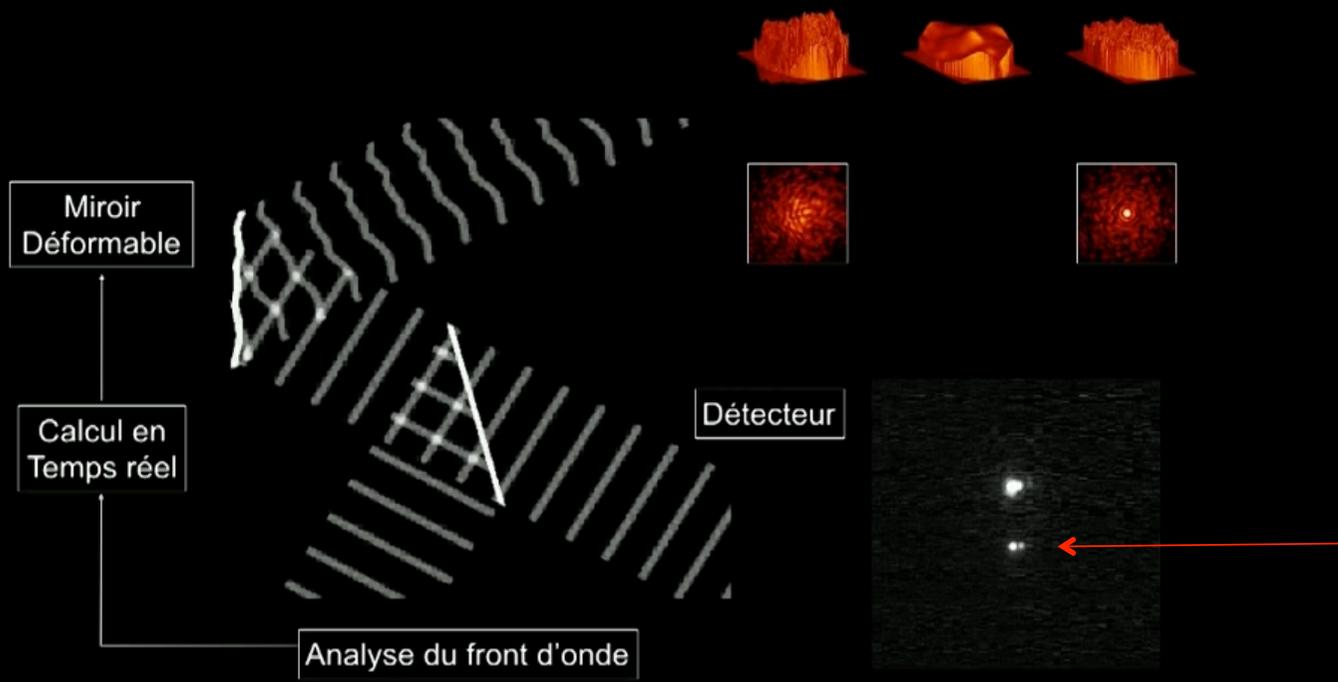
Show / hide columns

Planet	Mass ( $M_{\text{Jup}}$ )	Radius ( $R_{\text{Jup}}$ )	Period (day)	<i>a</i> (AU)	<i>e</i>	<i>i</i> (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
HR 2562 b	30	—	—	20.3	—	—	—	2016	2016-10-06
HD 1160 b	79	—	—	80	—	—	0.772947	2012	2016-08-22
VHS 1256-1257 b	11.2	—	—	102	—	—	—	2015	2016-07-25
HD 131399A b	4	—	—	80	0.35	—	—	2016	2016-07-12
HD 95086 b	4.4	—	—	61.7	0.2	153	—	2013	2016-06-22
HR 3549 b	45	—	—	80	—	—	—	2015	2016-06-22
CVSO 30 c	4.7	1.63	—	662	—	—	—	2016	2016-06-12
WISE 0855-0714	6	—	—	—	—	—	—	2014	2016-06-02
kappa And b	14	1.2	—	55	—	—	—	2013	2016-05-17
HR 7329	35	—	—	—	—	—	—	2000	2016-05-16
HII 1348 b	59	—	—	138	—	—	—	2012	2016-05-16
11 Oph b	21	—	730000	243	—	—	1.675862	2007	2016-02-26
Kepler-70 c	0.0021	0.078	0.34289	0.0076	—	—	0.000006	2011	2016-02-24
Kepler-70 b	0.014	0.068	0.2401	0.006	—	—	0.000005	2011	2016-02-24
TWA 5 A (AB) b	25	—	—	86	0.45	—	—	2009	2016-02-23
Ross 458 (AB) c	11.3	1.07	—	1168	—	—	10.245614	2010	2016-02-23
WD 0806-661 B b	8	—	—	2500	—	—	130.208333	2011	2016-02-23
2M J2126-81 b	13.3	—	—	6900	—	—	—	2016	2016-02-23
2M 0219-39 b	13.9	1.44	—	156	—	—	—	2015	2016-02-23
2M 0103-55 (AB) b	13	—	—	84	—	—	—	2013	2016-02-23
2M 1207-39 b	4	—	—	46	—	—	0.877863	2004	2016-02-23
2M 0441+23 b	7.5	—	—	15	—	—	0.107143	2010	2016-02-23

## réduction du biais observationnel : Optique adaptative

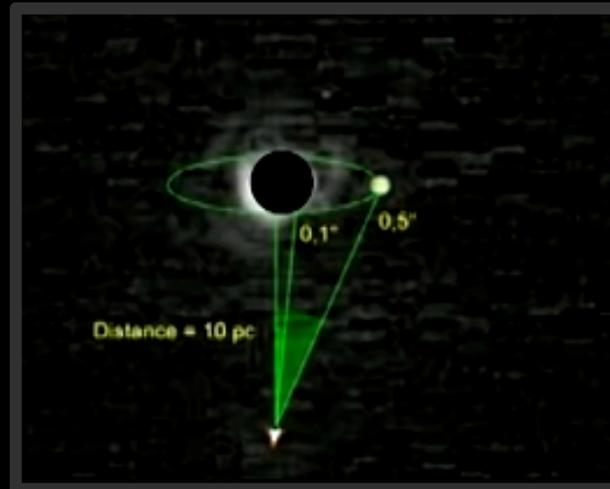


Anne-Marie Lagrange CNRS Grenoble  
Conférence les mardis de l'espace des sciences Rennes



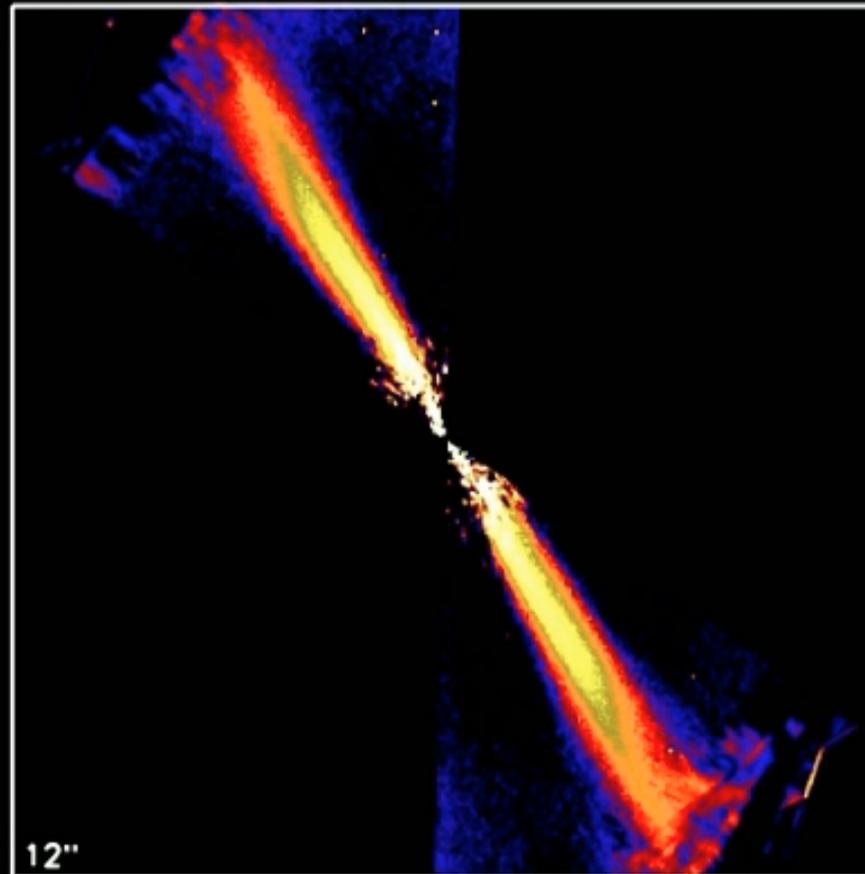
Anne-Marie Lagrange CNRS Grenoble  
Conférence les mardis de l'espace des sciences Rennes

## Optique adaptative - coronographie



Anne-Marie Lagrange CNRS Grenoble  
Conférence les mardis de l'espace des sciences Rennes

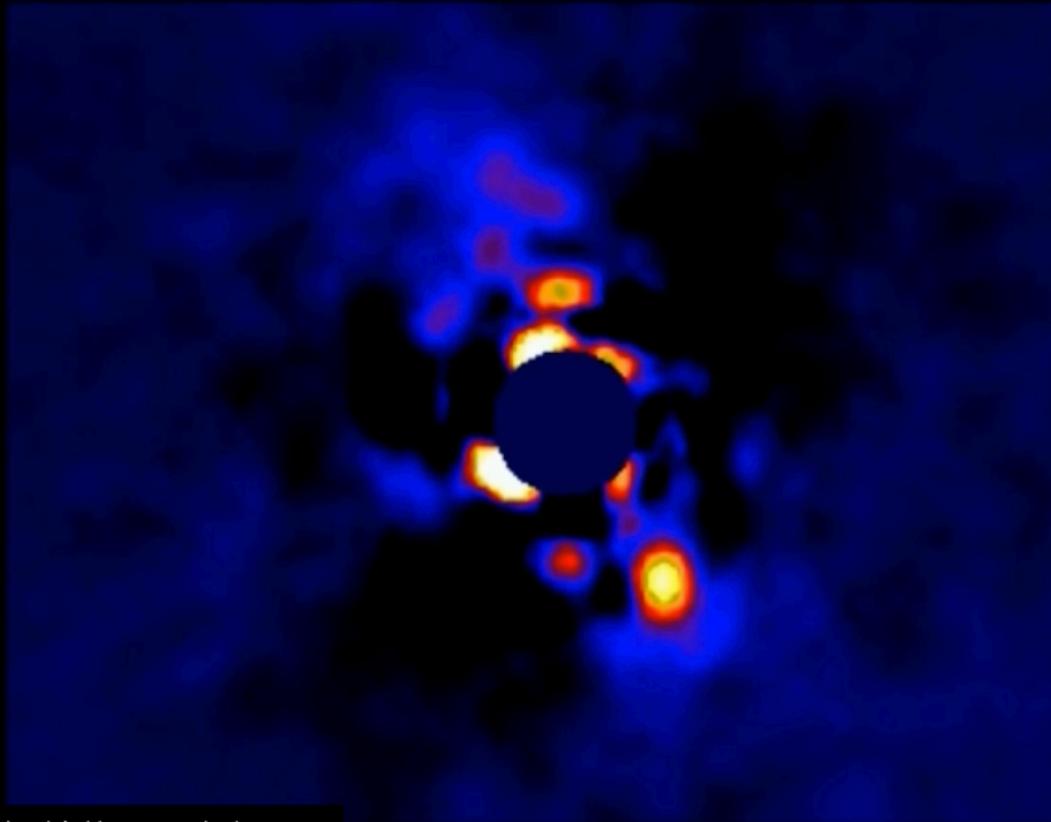
imagerie directe : recherche d'exoplanètes à période orbitale longue



disque protoplanétaire  
entourant béta Pictoris  
étoile blanche située à 63 AL

Optique adaptative système NACO – VLT Chili  
Anne-Marie Lagrange CNRS Grenoble

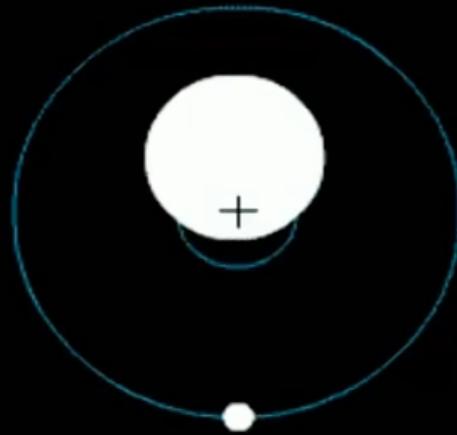
espace  
des sciences



béta Pictoris b : 4 à 11 masses joviennes  
rayon estimé 65 % supérieur à celui de  
Jupiter, orbitant à 8 – 9 U.A. période  
évaluée entre 17 et 21 ans.

Optique adaptative système NACO – VLT Chili  
Anne-Marie Lagrange CNRS Grenoble

**Astrométrie** : mesure des infimes oscillations du mouvement apparent d'une étoile suite à l'influence gravitationnelle d'une planète en orbite.



© Skymarvel

GAIA, lancé en 2013



© ESA

A 10 pc :

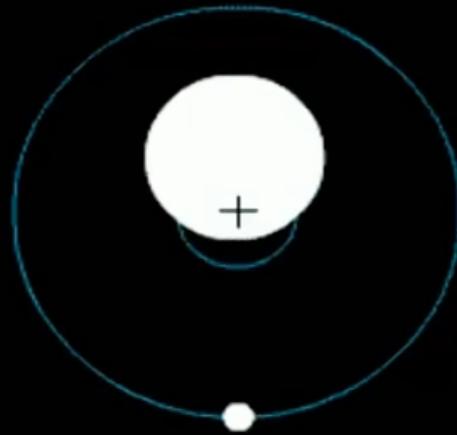
Jupiter: 2 mas en 12 ans

Terre: 2  $\mu$ as en 1 an

mas = milli seconde d'arc

Anne-Marie Lagrange CNRS Grenoble  
les mardis de l'espace des sciences Rennes

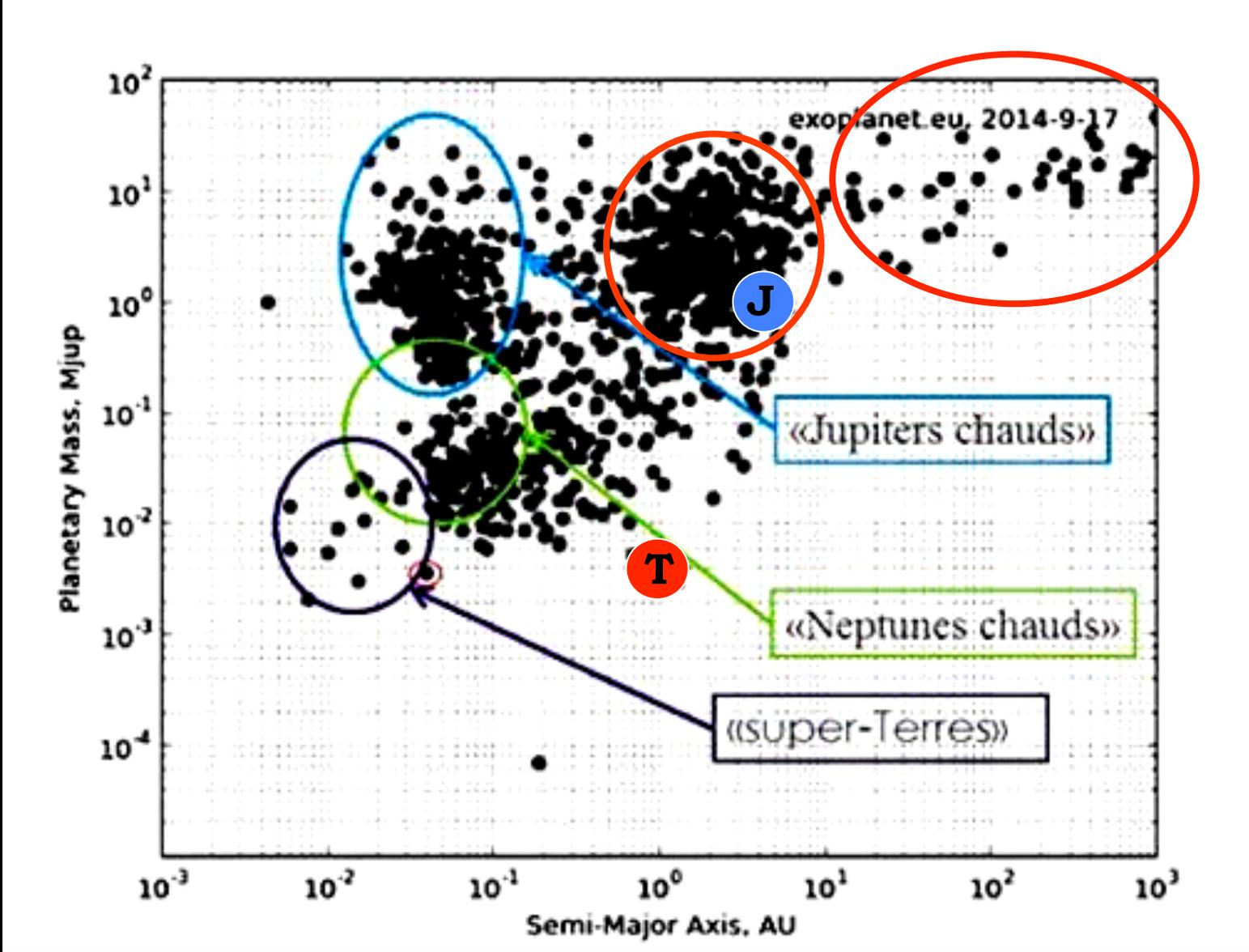
**Astrométrie** : mesure des infimes oscillations du mouvement apparent d'une étoile suite à l'influence gravitationnelle d'une planète en orbite.

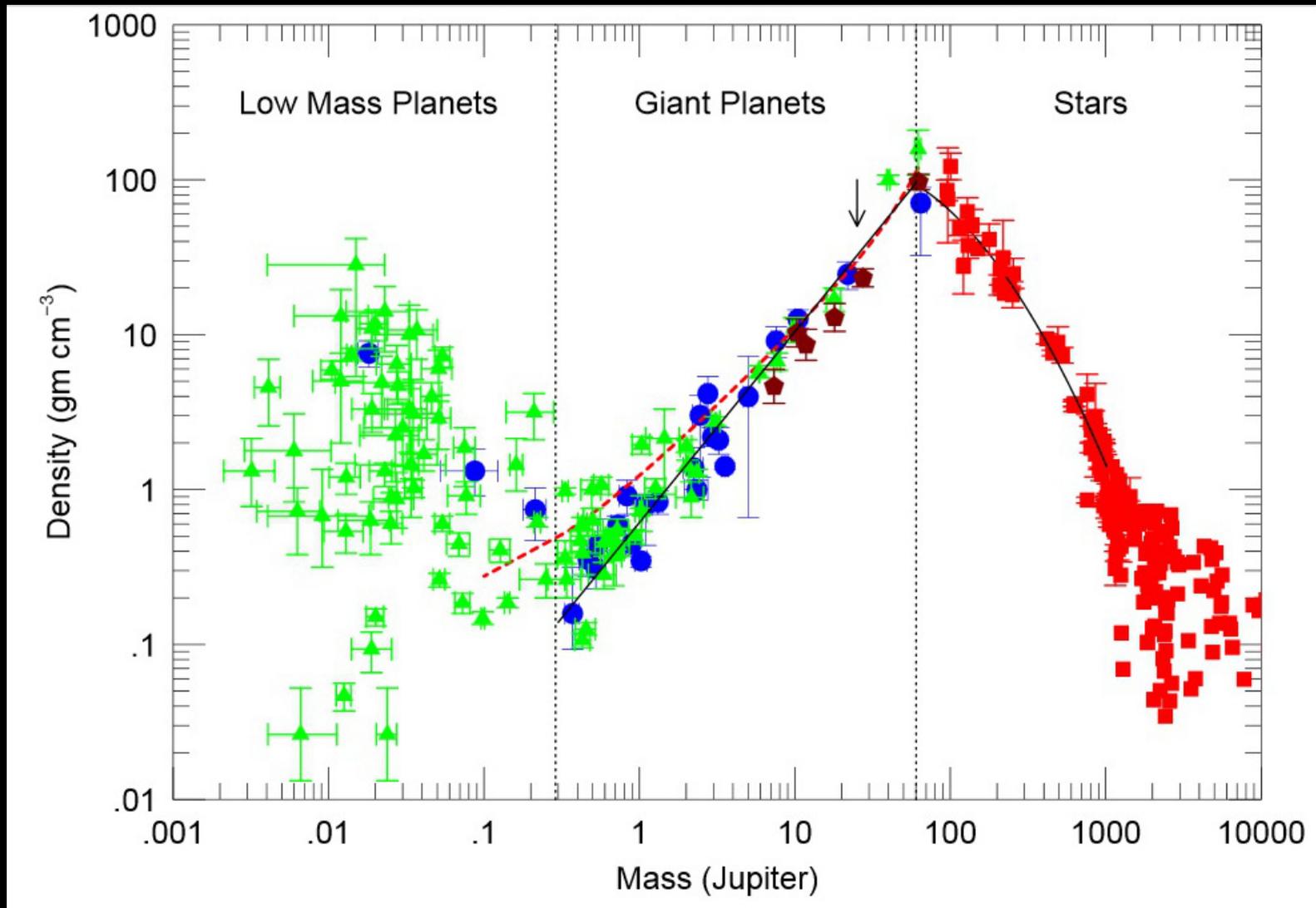


GAIA, lancé en 2013



L'amplitude étant fonction du produit de la masse de la planète par sa distance à l'étoile,  
**l'astrométrie devrait favoriser la détection des Jupiters froids**

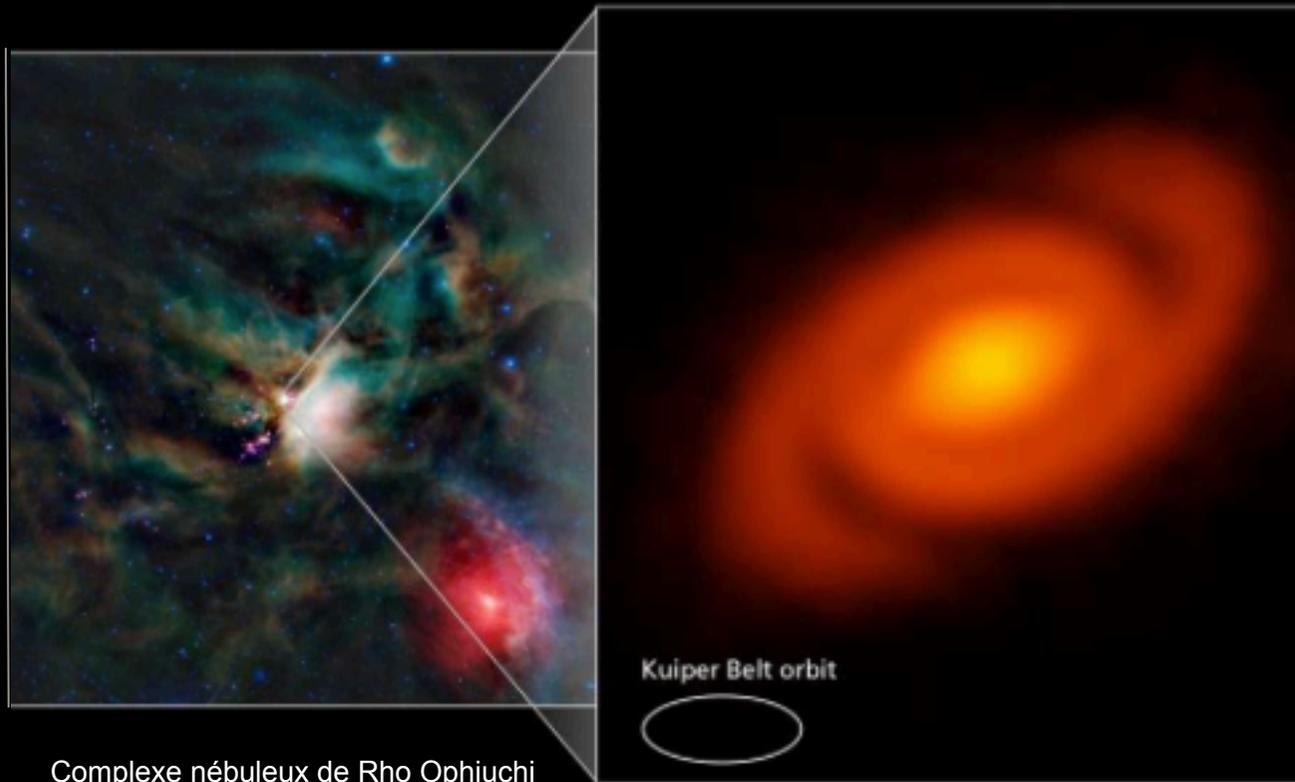




Artie P. Hatzes & Heike Rauer

## densité vs masse

en rouge : les étoiles  
 en vert les planètes découvertes par Kepler  
 en marron à partir d'observatoires terrestres  
 en bleu les planètes découvertes par CoRoT

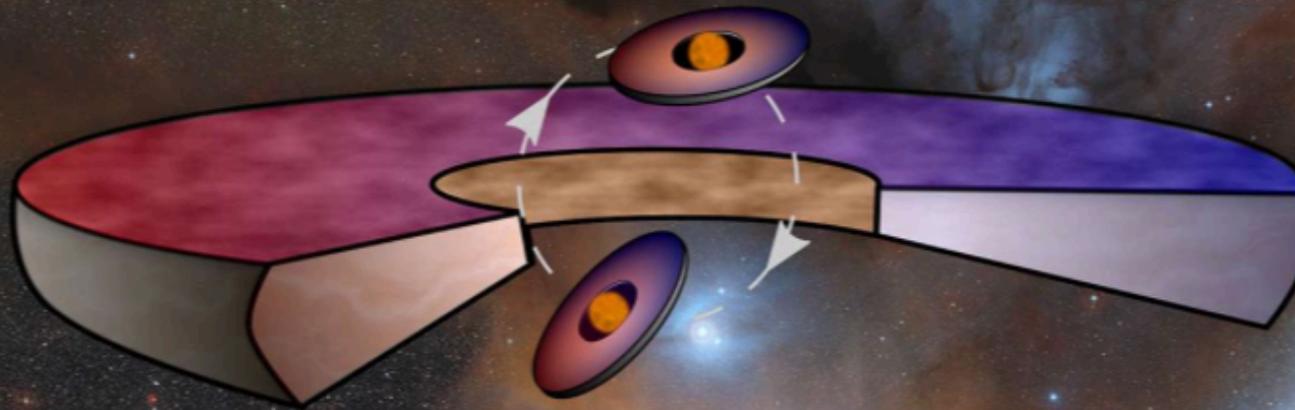


Complexe nébuleux de Rho Ophiuchi  
Radiotélescope ALMA

bras spiraux nuage protoplanétaire

NASA, Spitzer, Caltech, JPL, Harvard University, Y.Arizona, B Saxton (NRAO,AUI, NSF) ;  
Alam (ESO, NAJO, NRAO), Pérez (MPIfR)

# IRS 43



-shifted gas

-shifted gas

orientation

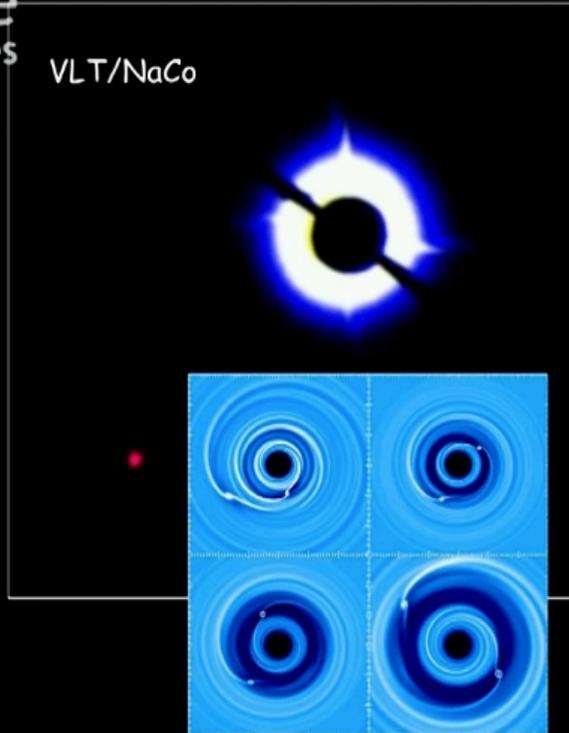


Size

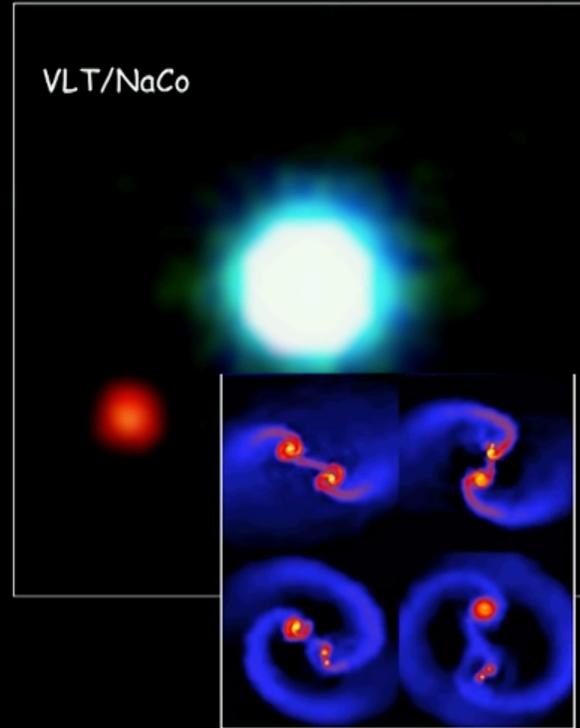
Background image credit: ESO/Digitized Sky Survey 2 / Davide De Meroni

© Christian Brinch/NBI

Le schéma précédent a été déduit des observations faites dans le domaine des micro-ondes par le radiotélescope Alma. Elles sont représentées ici avec le même code de couleur pour les molécules présentes dans les disques (disk) dont les orientations sont représentées par des segments de droite avec tirets. En bas à gauche, notre Système solaire donne l'échelle. © Christian Brinch, NBI, KU



Cameron (1970'), Boss (1998)



Bates (2012)

## Plusieurs processus de formation

## Pour faire la synthèse...

*Le système solaire n'est sûrement pas un modèle, un prototype ; il y a une grande diversité dans les systèmes planétaires :*

- *des **planètes** gazeuses Jupiter chaudes souvent « gonflées », des Neptunes chauds, des exo-terres et super terres **très très proches de leur étoile à moins d'un dixième d'UA***
- *des planètes de la taille de Neptune ou des super terres ayant pour beaucoup d'entre elles des périodes orbitales un à moins d'une année terrestre, se trouvant **à moins d'une unité astronomique de leur étoile,***
- *des géantes gazeuses de type jovien situées **entre une et cinq UA**, cela n'est pas trop surprenant*
- *mais également des géantes froides **à plus de 30 UA** ; cela on le sait depuis que l'on dispose d'une visualisation directe d'exoplanètes dont la période orbitale extrêmement longue, plusieurs siècles terrestres, n'autorise pas la détection par des méthodes indirectes (pour mémoire Neptune situé à 30 UA environ du Soleil a une période de révolution proche de 165 ans).*
- *enfin **des planètes « exotiques »** : planètes océan, de carbone, métalliques, avec des orbites rétrogrades, désaxées par rapport au plan de écliptique de leur étoile, beaucoup plus elliptiques (de type cométaire) que dans le système solaire, orbitant parfois même autour de deux étoiles,*

*nous avons aussi appris :*

- que la densité des géantes de 0,3 à 60 masses joviennes augmente d'une manière linéaire au prorata de leur masse alors que celle des étoiles diminue, tandis qu'à de moins de 0,3 masse jovienne, la relation densité masse n'est pas établie,
- qu'à partir d'un certain seuil situé autour de 80 masses joviennes il est difficile et probablement quelque peu artificiel de distinguer une planète géante très dense d'une naine brune,
- Pour couronner le tout : certaines observations pourraient nous conduire à reconsidérer le mode de formation de certains systèmes planétaires,

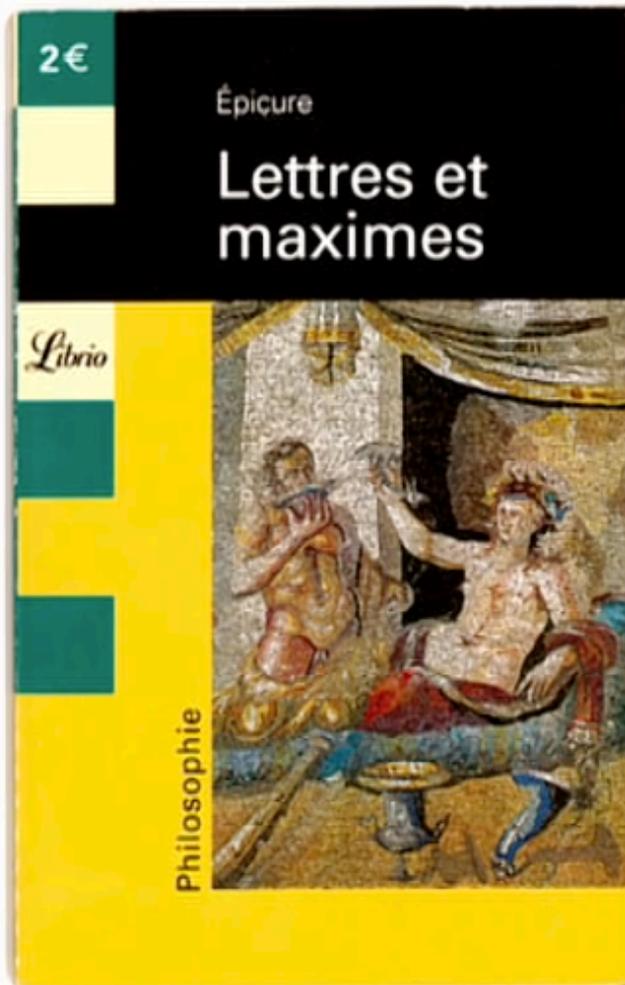
*il nous reste beaucoup à apprendre !*

## Il y eut des visionnaires ...

« Vous n'êtes pas sans savoir que par Univers, la plupart des Astronomes signifient une sphère ayant son centre au centre de la Terre.... Toutefois, Aristarque de Samos a publié des écrits sur les hypothèses astronomiques. Les présuppositions qu'on trouve dans ses écrits suggèrent un univers beaucoup plus grand que celui mentionné plus haut. Il commence en fait avec l'hypothèse que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles. Quant à la Terre, elle se déplace autour du Soleil sur la circonférence d'un cercle ayant son centre dans le Soleil »

Archimède préface du traité l'Arénaire.

**Du géocentrisme à l'héliocentrisme, à l'universalité des mondes  
quel chemin parcouru !**



## Lettre à Hérodoté

Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents. En effet puisque les atomes sont en nombre infini, comme nous l'avons dit tout à l'heure, il y en a partout, leur mouvement les portant même jusque dans les lieux les plus éloignés. Et d'autre part, toujours en vertu de cette infinité en nombre, la quantité d'atomes propres à servir d'éléments, ou, autrement dit, de causes, à un monde, ne peut être épuisée par la constitution d'un monde unique, ni par celle d'un nombre fini de mondes, qu'il s'agisse d'ailleurs de tous les mondes semblables au nôtre ou de tous les mondes différents. Il n'y a donc rien qui empêche l'existence d'une infinité de mondes.

Athènes, - 305 av JC

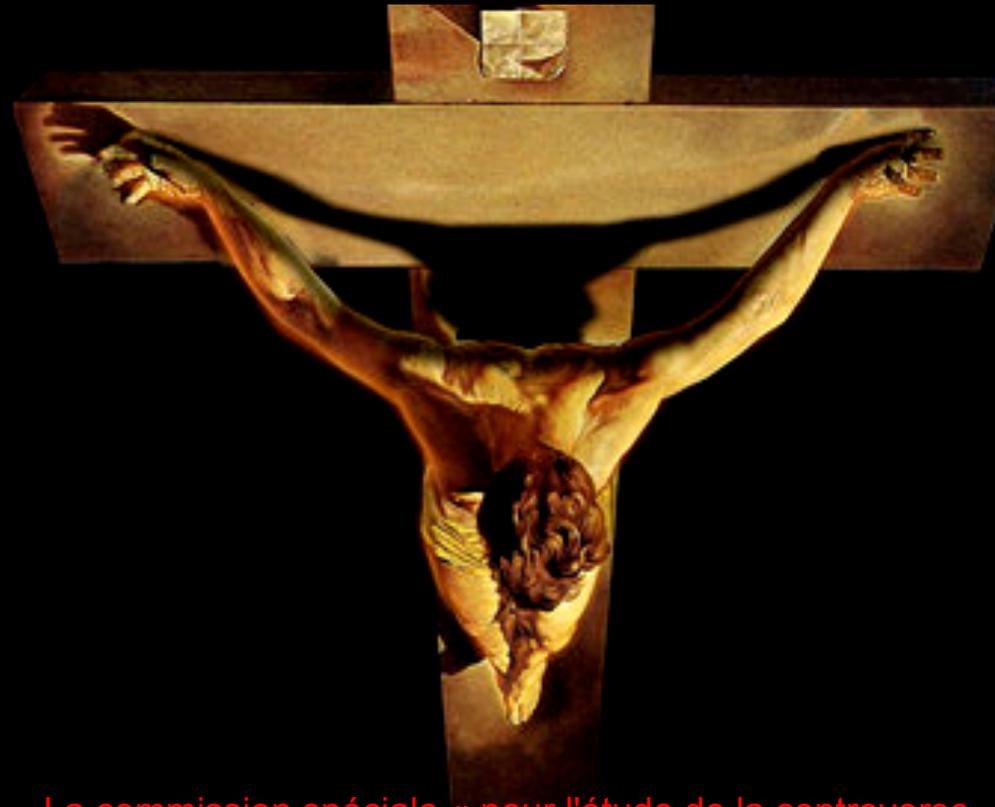


*« il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept "terres" que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche »*

*« C'est à l'intellect qu'il appartient de juger et de rendre compte des choses que le temps et l'espace éloignent de nous. »*

*L'Infini, l'Univers et les Mondes, 1584*





La commission spéciale « pour l'étude de la controverse ptoléméo-copernicienne » instituée le 3 juillet 1981 par Jean-Paul II, finit par revenir sur la condamnation de Galilée...

Elle réaffirma que « La condamnation pour hérésie de Bruno, indépendamment du jugement qu'on veuille porter sur la peine capitale qui lui fut imposée, se présentait comme pleinement motivée, le copernicisme de Bruno ne prêtant aucun intérêts aux raisons scientifiques





Le Cardinal Poupard Président du Conseil pontifical pour la culture déclarait à Rome en 2000 « L'action de l'Eglise contre Giordano Bruno est un de ces contre témoignages dont, aujourd'hui, l'Eglise se repent, demandant le pardon du Seigneur et des frères.

La « purification de la mémoire », signe essentiel du Grand Jubilé, concerne aussi ce moment sombre de la vie de l'Eglise et nous incite, avec humilité et courage, à prononcer un jugement moral sur les attitudes historiques non conformes à l'Evangile qui ont marqué négativement le chemin de l'Eglise au cours de ces deux millénaires.



A black and white photograph of a starry night sky, featuring numerous stars of varying brightness and sizes, some appearing as soft, glowing clouds. The text "Diversité, universalité..." is centered in the middle of the image in a white, italicized, sans-serif font.

*Diversité, universalité...*



**L'univers est vivant !**