

Astrophysique

9 – La formation des planètes



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

Résumé du chapitre précédent

- Il était un petit nuage... moléculaire

- densité $n = 100$ à $100\,000$ atomes/cm³
- température $T = 10$ à 20 K
- \Leftrightarrow pression $P = n k T$

- Équilibre pression – gravitation ?

→ masse < masse de Jeans

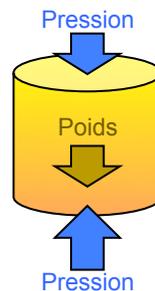
$$\rightarrow M_{\text{Jeans}} = T^{3/2}/n^{1/2}$$

- → Contraction du nuage

- d'abord $T \sim$ constante
- → n augmente → M_{Jeans} diminue
- → fragmentation du nuage

- puis le nuage devient opaque

- → T augmente [adiabatique]
- → M_{Jeans} augmente
- → taille minimale des fragments



- Échelle de temps de la contraction

$$t = 1/\sqrt{n}$$

- → les zones plus denses se condensent plus vite que les zones moins denses

- → augmentation du contraste de densité

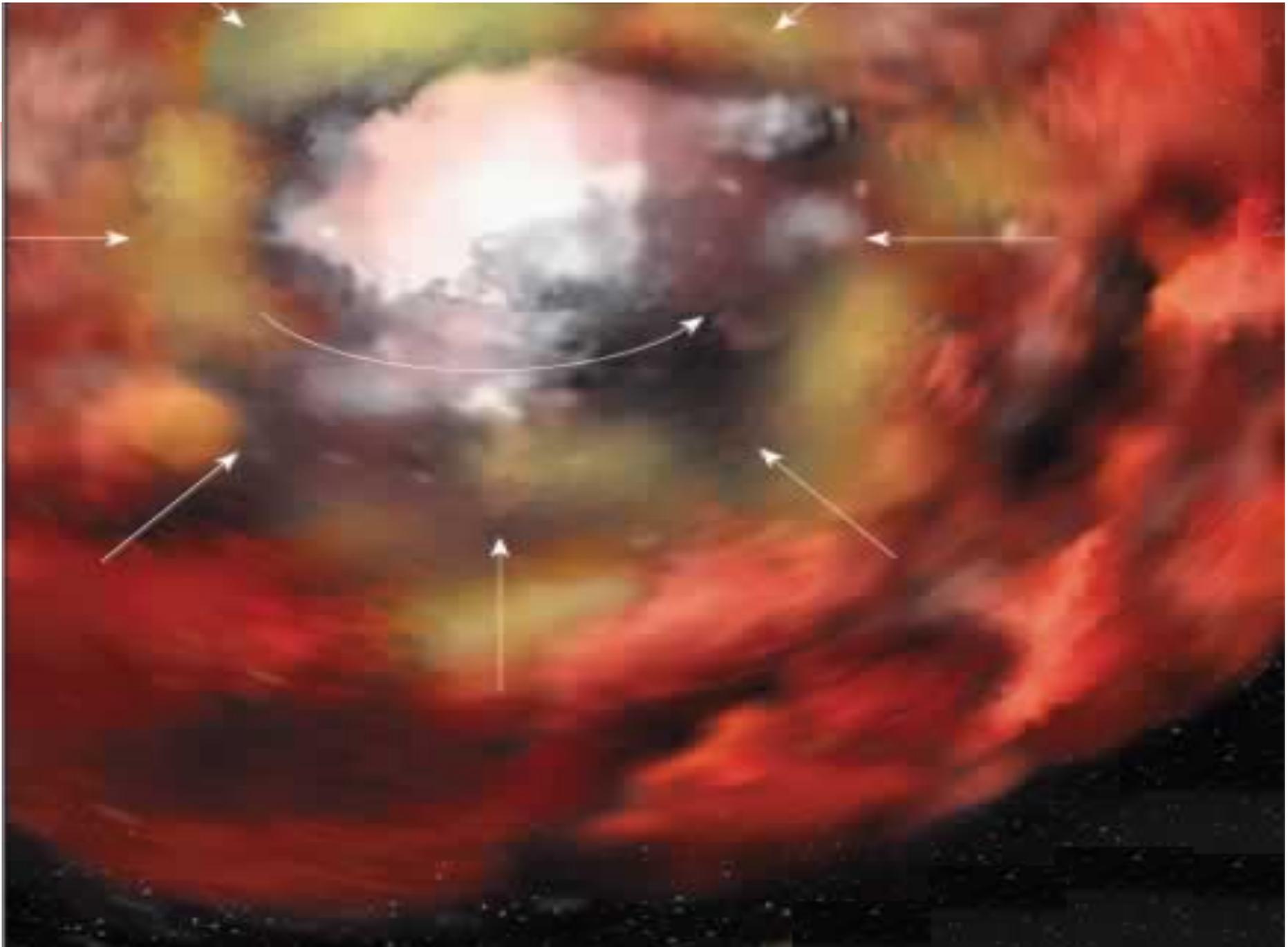
- → cœur

- de plus en plus dense
- et de plus en plus chaud

- et enveloppe « tombant » sur le cœur

- Ce qui reste « en arrière » forme un disque protoplanétaire

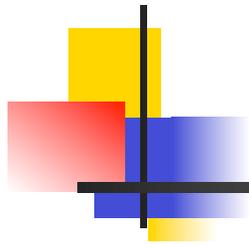
ou non...



5 janvier 2011

Alain Bouquet – Astrophysique 9 – Formation des planètes

3



LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

Composition du nuage protosolaire

- Hydrogène et hélium gazeux 98% $T_{\text{fusion}} \sim 1 \text{ K}$
- Glaces 1,4% $T_{\text{fusion}} \sim 150 \text{ K}$
 eau H_2O
 méthane CH_4
 ammoniac NH_3
 monoxyde et dioxyde de carbone CO et CO_2

- Pierres, rocs... silicates 0,4% $T_{\text{fusion}} \sim 1000 \text{ K}$

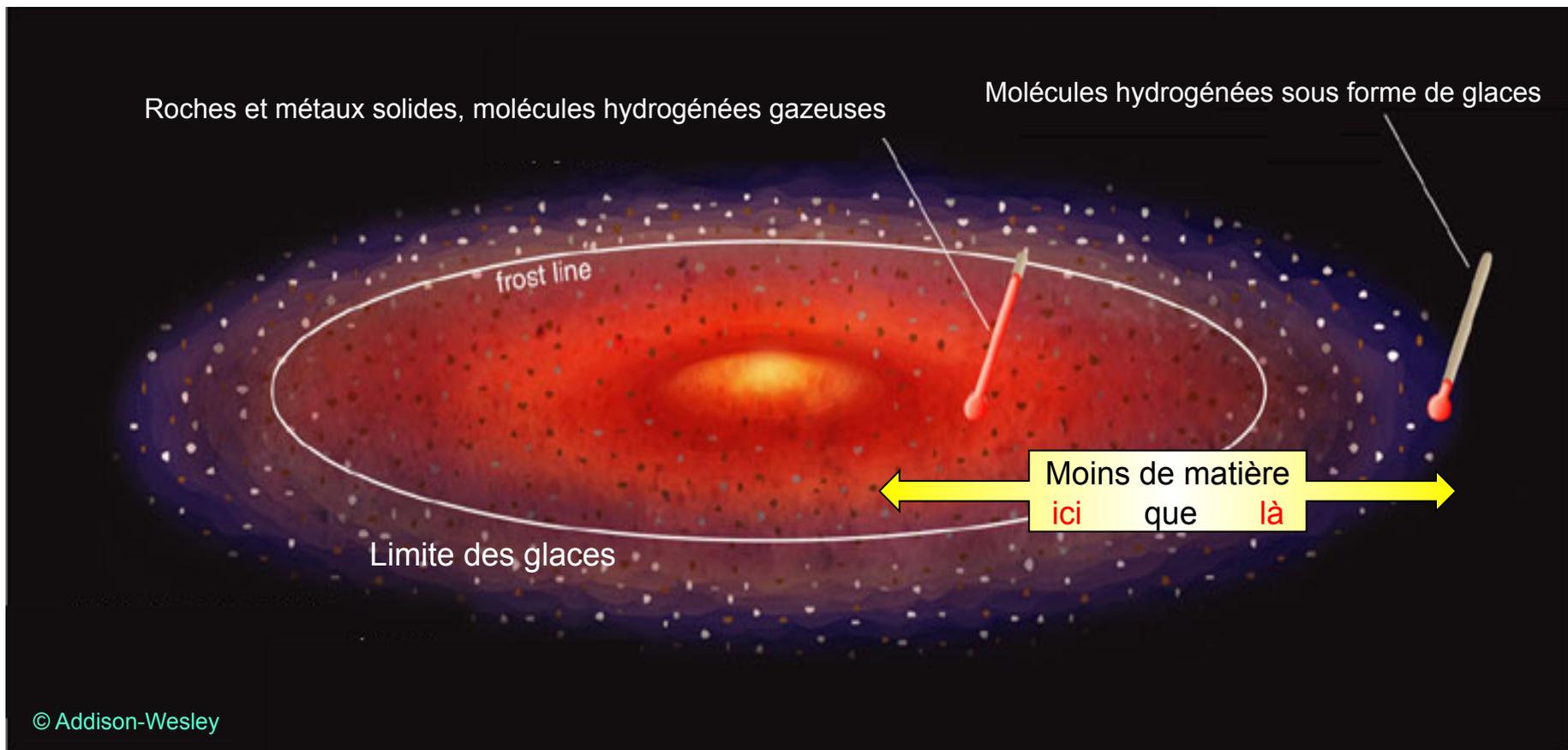
- Métaux [fer, nickel, aluminium...] 0,2% $T_{\text{fusion}} \sim 1500 \text{ K}$


Distance D du (proto) Soleil \Leftrightarrow température d'équilibre $T = T_{\odot} [R_{\odot}/2D]^{1/2}$

- $D = 1 \text{ UA} \Leftrightarrow T = 280 \text{ K}$ Jupiter : $D = 5,2 \text{ UA} \Leftrightarrow T = 120 \text{ K}$ **aujourd'hui !**

Région des glaces, région des roches

- Distance \leftrightarrow température ($T = 1/\sqrt{D}$) \rightarrow limite des glaces (*frost line* ou *snow line*)



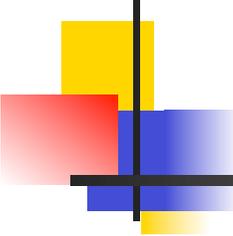
Le disque: une histoire de moment angulaire

- Le Soleil contient
 - plus de 99% de la masse totale du système solaire
 - mais moins de 3% du moment angulaire total
- Moment angulaire (ou cinétique)
$$L = M D \times V = M D^2 \times \omega$$
- Le moment angulaire est conservé
→ si D diminue, ω augmente
- Inévitablement, le nuage protosolaire tourne sur lui-même
- Contraction → accélération de la rotation

- Un exemple simple de conservation du moment angulaire



- Mais pourquoi un disque plutôt qu'une sphère compacte ?

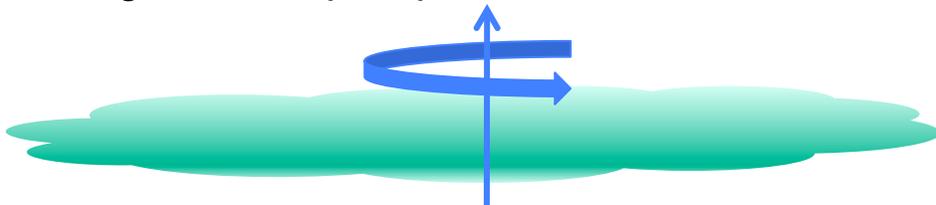


Conservation du moment angulaire: Natalia Kanounnikova



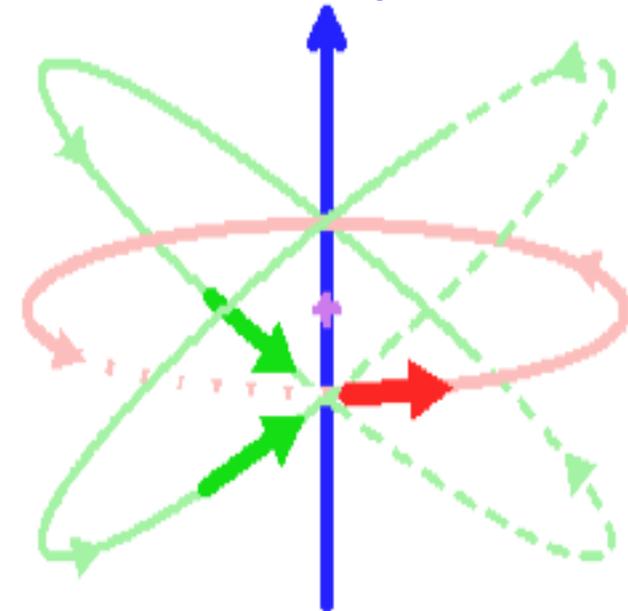
Vers un disque : une conséquence des collisions

- Moment angulaire
 - → direction privilégiée, celle du moment angulaire
 - plus d'objets tournant dans un sens que dans l'autre
- Collisions plus fréquentes entre objets de vitesses «verticales» opposées et de vitesses «horizontales» de même sens
 - les vitesses « verticales » se compensent
 - les vitesses « horizontales » s'additionnent
- → la rotation d'ensemble est préservée, mais le nuage devient plus plat



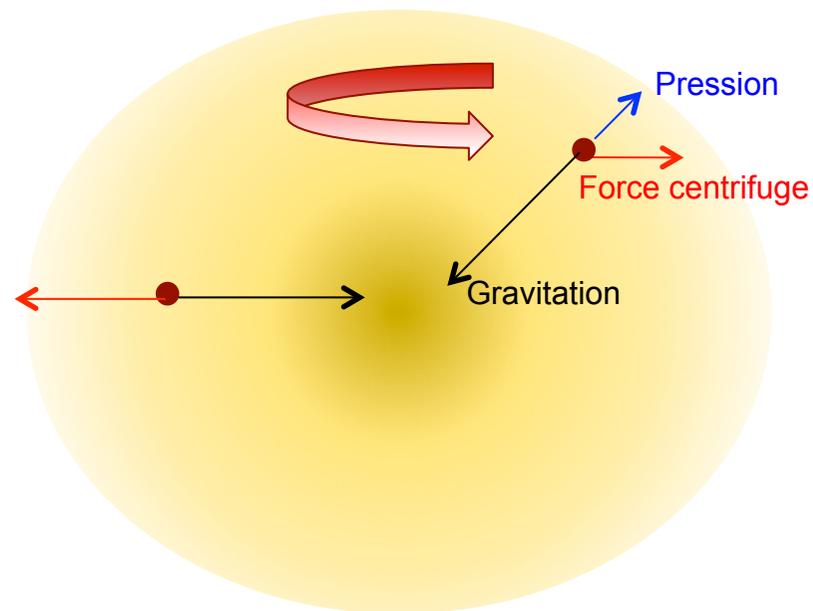
- → disque protoplanétaire **orthogonal** au moment angulaire

Moment angulaire



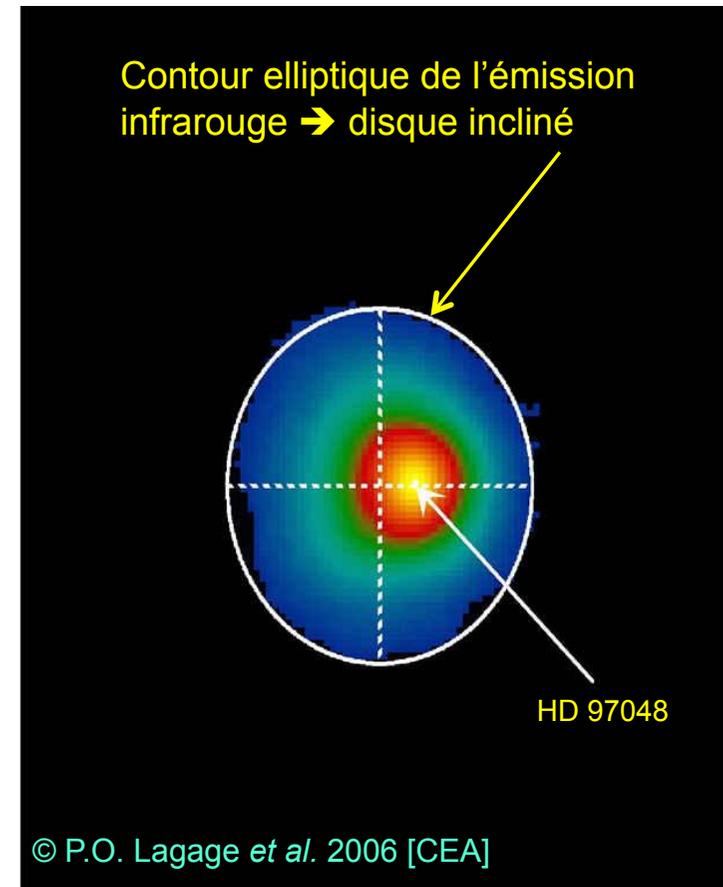
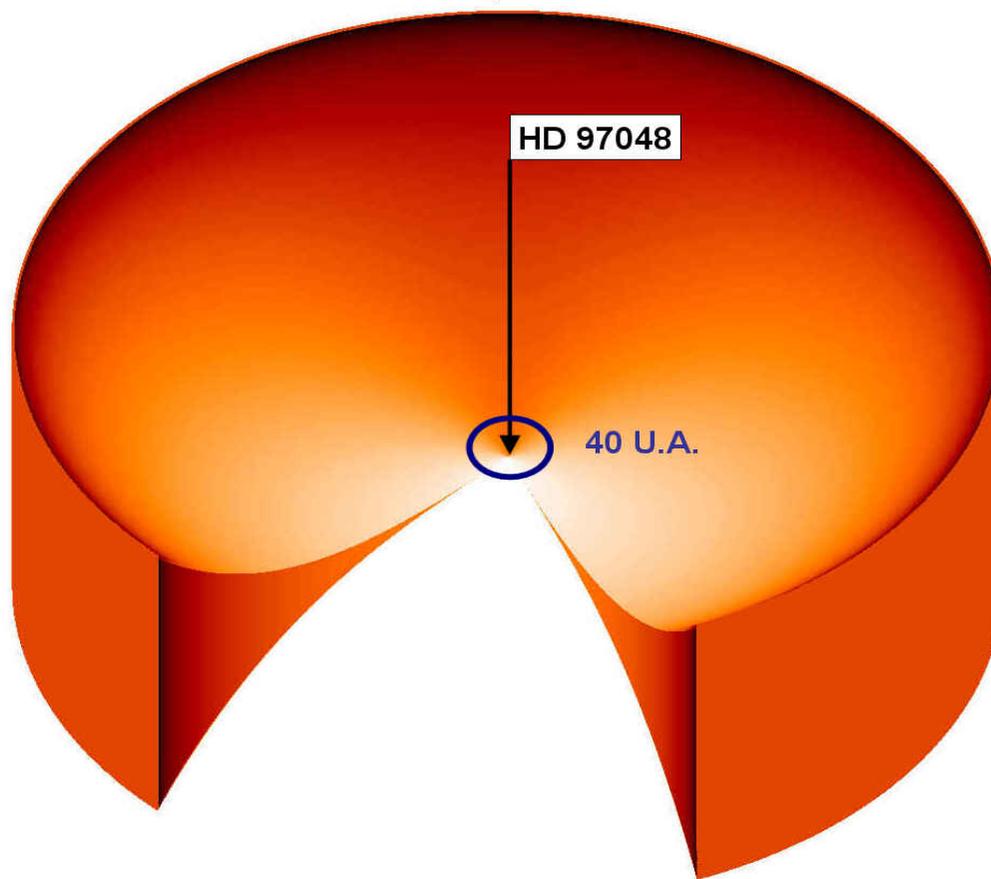
Disque

- Lors de la contraction
 - la densité n augmente donc la pression $P = nkT$
 - la température T augmente donc la pression $P = nkT$
 - → la pression commence à équilibrer la gravitation
- Rotation → **force centrifuge** s'ajoutant à la **pression**
- → la chute vers le cœur est d'autant plus ralentie que l'on est dans le plan équatorial
- → aplatissement → disque



Disques protoplanétaires

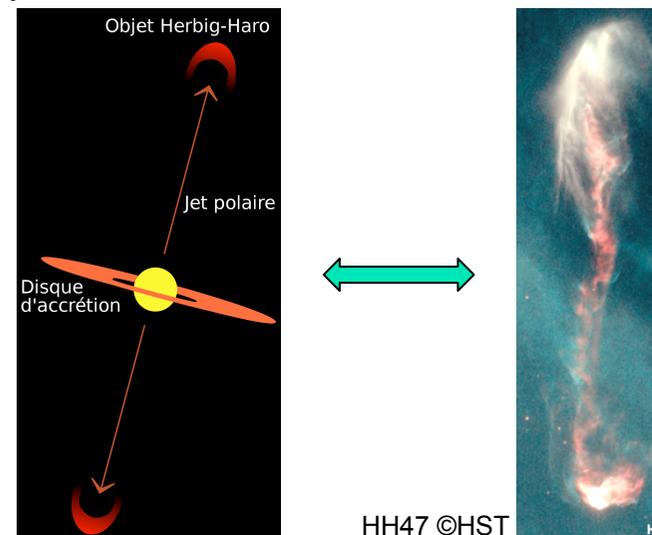
- Étoile HD 97048 vue en infrarouge (8,6 μm) par VISIR au VLT (ESO)



Moment angulaire et magnétisme

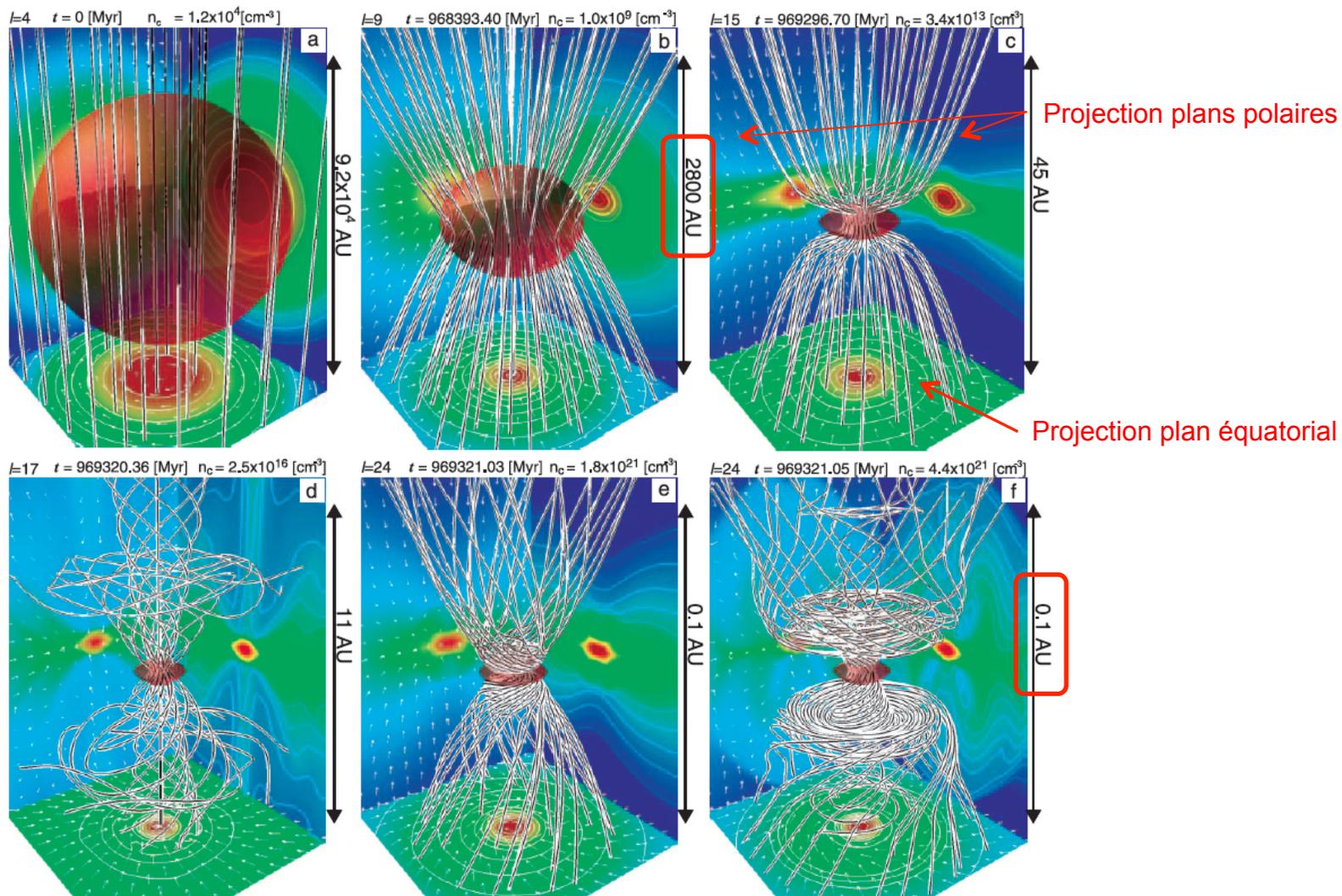
- Contraction → augmentation de la température
- Température > 1000 K → ionisation des atomes
- Particules chargées en mouvement
 - → courants électriques
 - → champs magnétiques
 - → force de Lorentz sur les particules
- Théorème d'Alfvén :

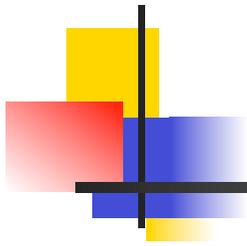
Dans un milieu conducteur, les lignes de champ magnétique se déplacent exactement comme la matière
- De façon imagée: les lignes de champ magnétique sont « gelées » dans la matière
- L'enroulement des lignes de champ transfère le moment angulaire du centre à la périphérie
- Autrement dit, la rotation du centre ralentit... et celle du disque augmente
- Parallèlement, cela crée deux jets de matière ionisée dans les directions polaires



Simulation numérique de la magnétohydrodynamique

© Machida, Inutsuka et Matsumoto 2007

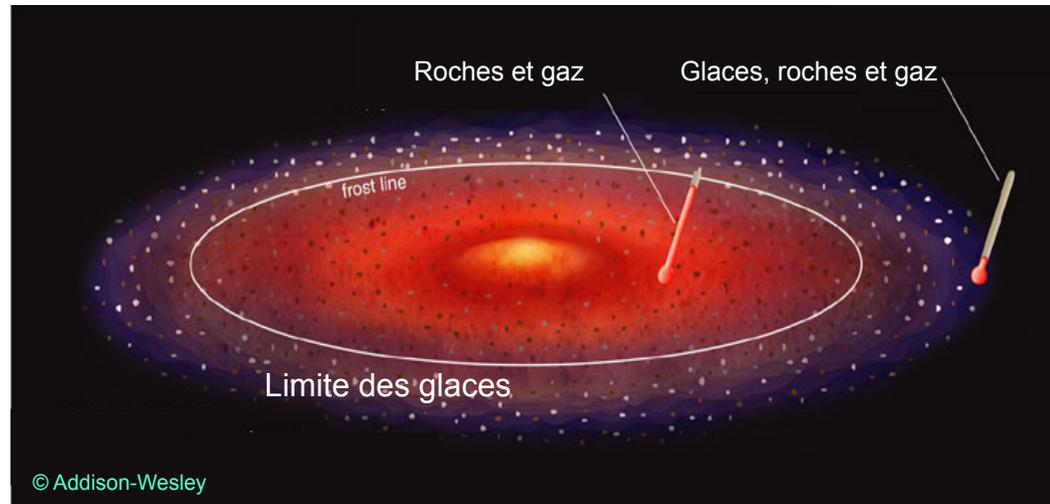




PLANÉTÉSIMAUX

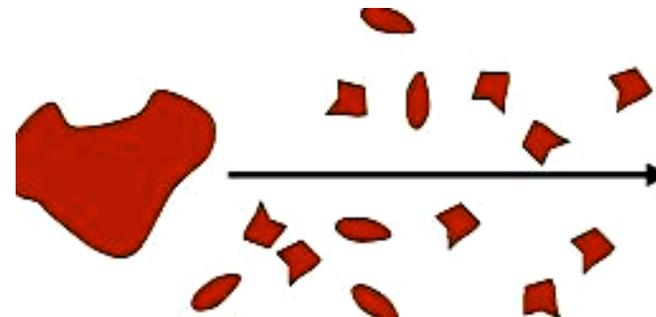
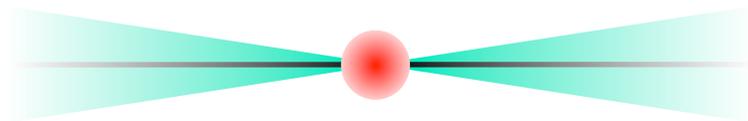
Formation des planétésimaux

- Compétition entre
 - réchauffement causé par le protosoleil
 - refroidissement du gaz et des poussières (glaces + silicates + métaux) par émission de rayonnement
- → ceci induit une gradation
 - près du protosoleil, métaux puis silicates subsistent sous forme solide (grains de poussière)
 - plus loin, particules de glaces



Croissance des planétésimaux

- Mélange de grains microscopiques et de gaz
- Gaz en partie soutenu par la pression (à la différence des grains) → mouvement non képlérien (plus lent)
- → le gaz freine le mouvement des grains
- → disque mince de poussière dans un disque plus épais de gaz
- Les grains sont d'autant plus freinés par le gaz qu'ils sont petits
- → fort taux de collision entre grains de tailles différentes
 - Les gros grains balayent les petits grains devant eux
 - Ceux-ci rebondissent **ou adhèrent**
 - → **les grains grossissent peu à peu** : en 100 000 ans ils atteignent une taille de l'ordre du kilomètre





5 janvier 2011

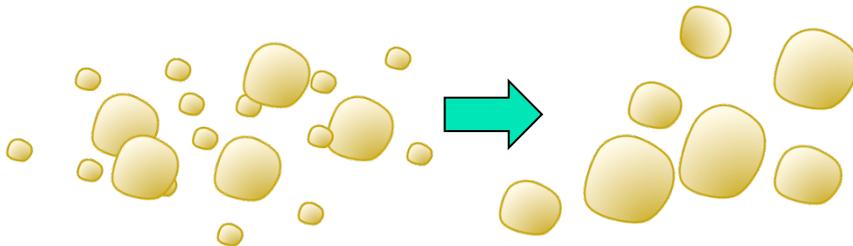
Alain Bouquet – Astrophysique 9 – Formation des planètes

17

Deux modèles de l'évolution des planétésimaux

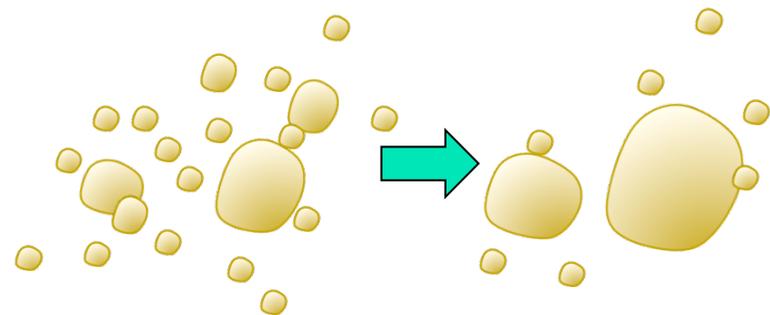
- Croissance ordonnée, ou méthode russe (Safronov 1969)

- petits grains
 - grains moyens
 - gros grains
 - planétésimaux *stricto sensu*
 - protoplanètes
 - planètes



- Croissance exponentielle ou méthode américaine (Greenberg et al. 1978)

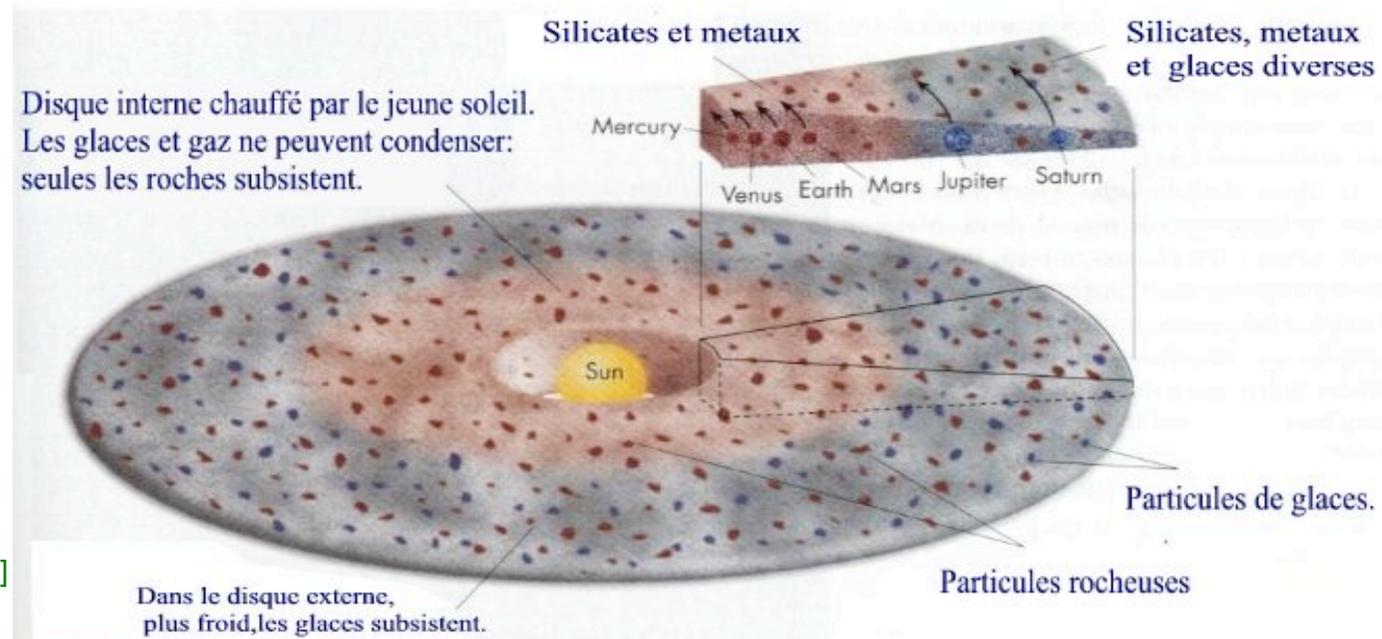
- le plus gros planétésimal d'une région absorbe tous ses voisins
- → son attraction gravitationnelle augmente d'autant plus
- → il absorbe des voisins de plus en plus éloignés
- → sa taille croît exponentiellement (effet boule de neige)



- Problème : c'est très long !

Différentiation des planètes

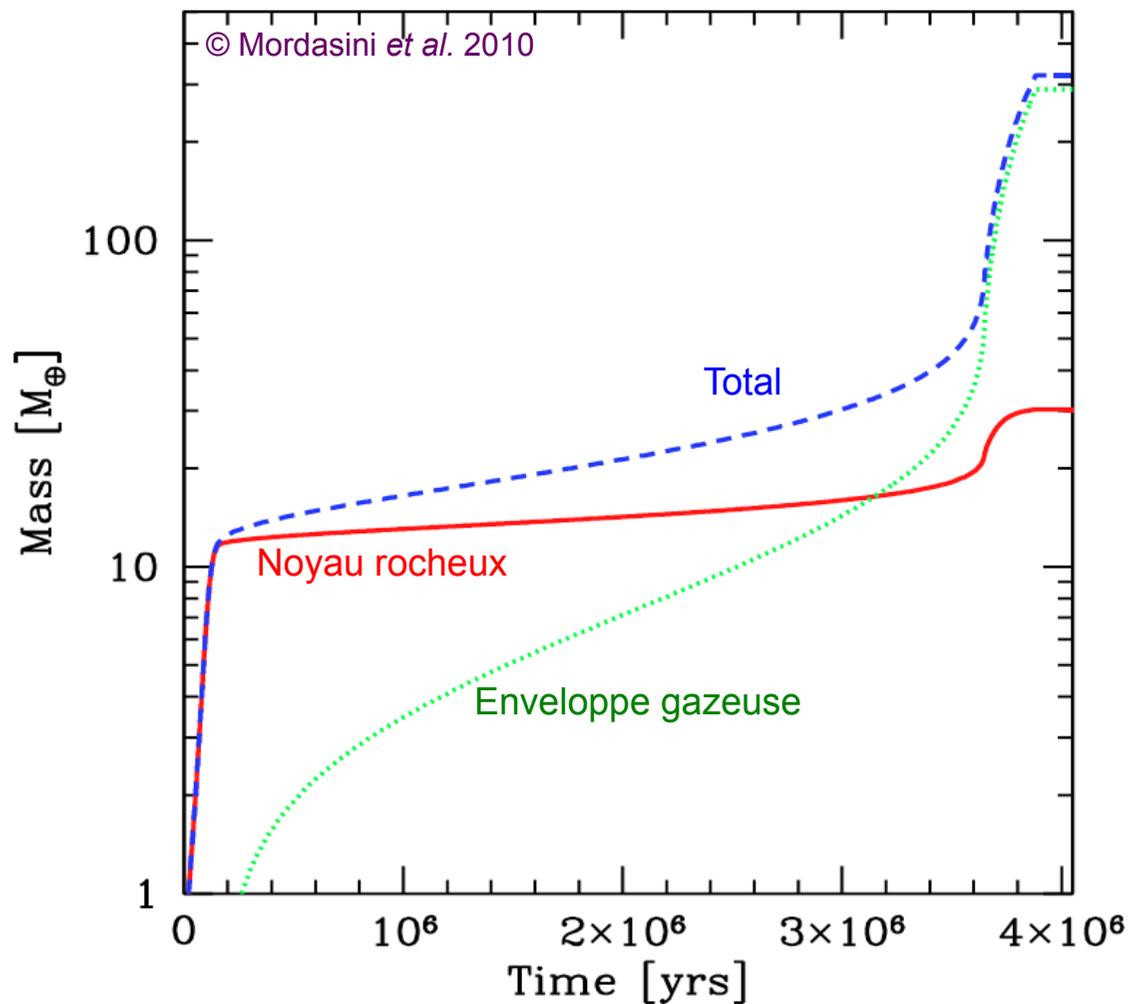
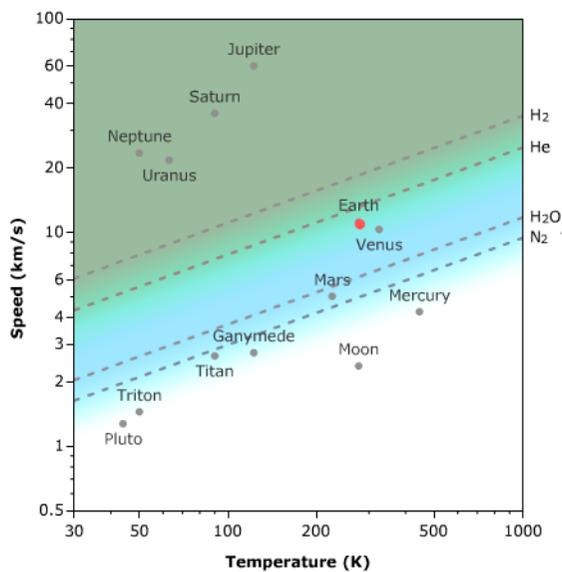
- Près du Soleil, les éléments qui ont formé les planétésimaux étaient riches en métaux et silicates
 - → planètes telluriques
- Loin du Soleil, les planétésimaux étaient beaucoup plus riches en glaces
 - → noyau plus gros
 - → accréation ensuite possible d'hydrogène et d'hélium (gazeux)
 - → planètes gazeuses



© S. Charnoz [AIM]

Croissance des planètes : Jupiter

- Mini-étoile ?
 - Pas d'exemple $M_{\star} \ll M_{\odot}$
- Maxi-Terre ?
 - accrétion noyau rocheux
 - *puis accrétion gaz possible*

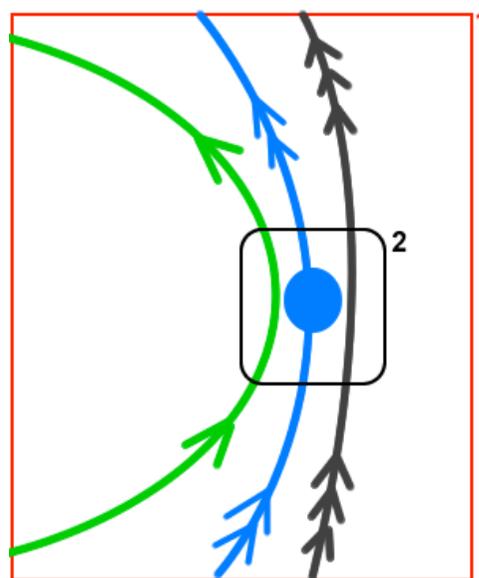
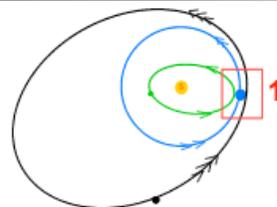
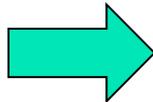


Rotation des planètes

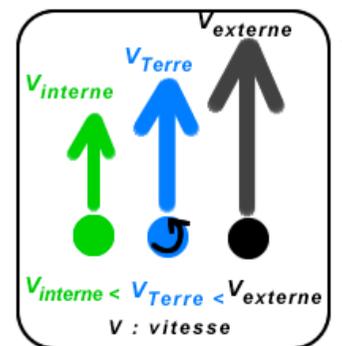
- Rotation de la nébuleuse protosolaire
 - → rotation du protosoleil **dans le même sens**
 - → rotation du disque protoplanétaire **dans le même sens**
 - → rotation des planétésimaux autour du Soleil **dans le même sens**
 - → rotation des planètes autour du Soleil **dans le même sens**

- Et la rotation des planètes sur elles-mêmes?

- **Induite par les collisions des planétésimaux**

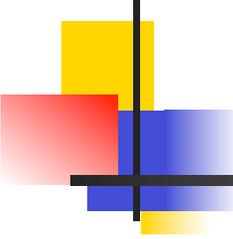


Vue dans un repère galiléen



Les planétésimaux qui frôlent tangentiellement la Terre, du côté externe de son orbite ont une vitesse plus élevée que ceux qui la percutent du côté interne. Cette configuration favorise une rotation de la Terre sur elle-même dans le même sens que celui de la Terre autour du Soleil.

- orbites des planétésimaux tangentes à l'orbite de la Terre par l'EXtérieur
 - orbite de la prototerre
 - orbites des planétésimaux tangentes à l'orbite de la Terre par l'INTérieur
- Plus le nombre de flèches est grand, plus la vitesse est élevée



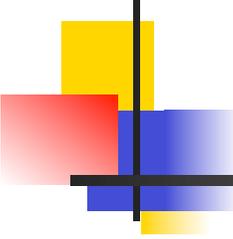
Particularités de certaines planètes

- Gros cœur fer-nickel de Mercure
 - Collision de protoplanètes conduisant à l'éjection de leurs manteaux (silicates) et à la fusion de leurs cœurs (métaux) ?
- Rotation lente de Vénus sur elle-même
 - À nouveau une collision de protoplanètes ?
- Rotation « à plat » d'Uranus
 - Fusion de deux petites planètes, ou collision rasante avec un gros planétésimal ?
- Orbite rétrograde de Triton (satellite de Neptune)
 - Interaction de Neptune avec les planétésimaux qui ont formé les satellites
 - Pourrait aussi expliquer le système Pluton-Charon
- Système Terre-Lune
 - Théia ? Une protoplanète de la taille de Mars entrée en collision avec la Terre, 30 à 40 Ma après sa formation
 - Augmentation de masse → plus de gravité → attire plus de comètes → eau
 - Gros satellite → stabilisation axe de rotation

Il y a eu des milliards de collisions entre planétésimaux de grande taille au cours des premières centaines de millions d'années



Les simulations numériques conduisent effectivement – à l'occasion – à des particularités de ce genre, mais pas systématiquement



Échelles de temps

- Problème dynamique complexe
 - plusieurs types d'objets (gaz, poussières, grains millimétriques, métriques ou kilométriques)
 - interactions gravitationnelle et électromagnétique
 - effets thermiques importants
 - turbulence probable
- Contraintes de temps
 - Datations radiochimiques
 - Météorites différenciées (chondrites) → existence de corps de taille > 1000 km à $t = 4$ Ma
 - Echelles de temps caractéristiques de l'effondrement gravitationnel et du refroidissement (dépendant fortement de la densité, de la température et de la composition chimique)
 - → protoétoile : 100 000 ans pour l'effondrement initial, 10 à 50 Ma pour l'allumage nucléaire
 - → durée de vie d'un disque protoplanétaire 5 à 10 Ma
 - → les **noyaux** des planètes doivent être formés avant
 - → fin de formation des planètes entre 10 Ma (géantes) et 100 Ma (telluriques)
- Bombardement « tardif » vers $t = 500$ Ma
 - → réarrangement des planètes géantes ?

Migration des planètes

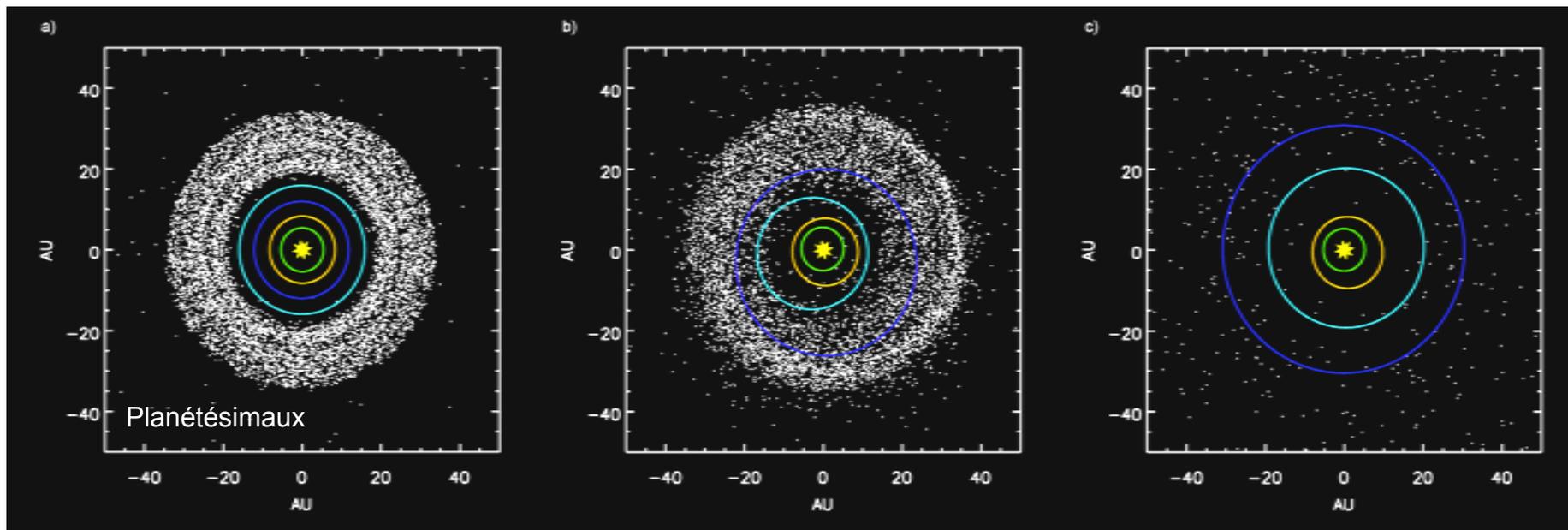
■ Modèle de Nice (2005)

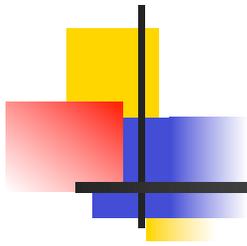
Jupiter
Saturne
Neptune
Uranus

Explique

- absence relative d'objets transneptuniens
- ceinture de Kuiper, nuage de Oort
- **pluie tardive de météorites** dans le système solaire interne

Jupiter
Saturne
Uranus
Neptune

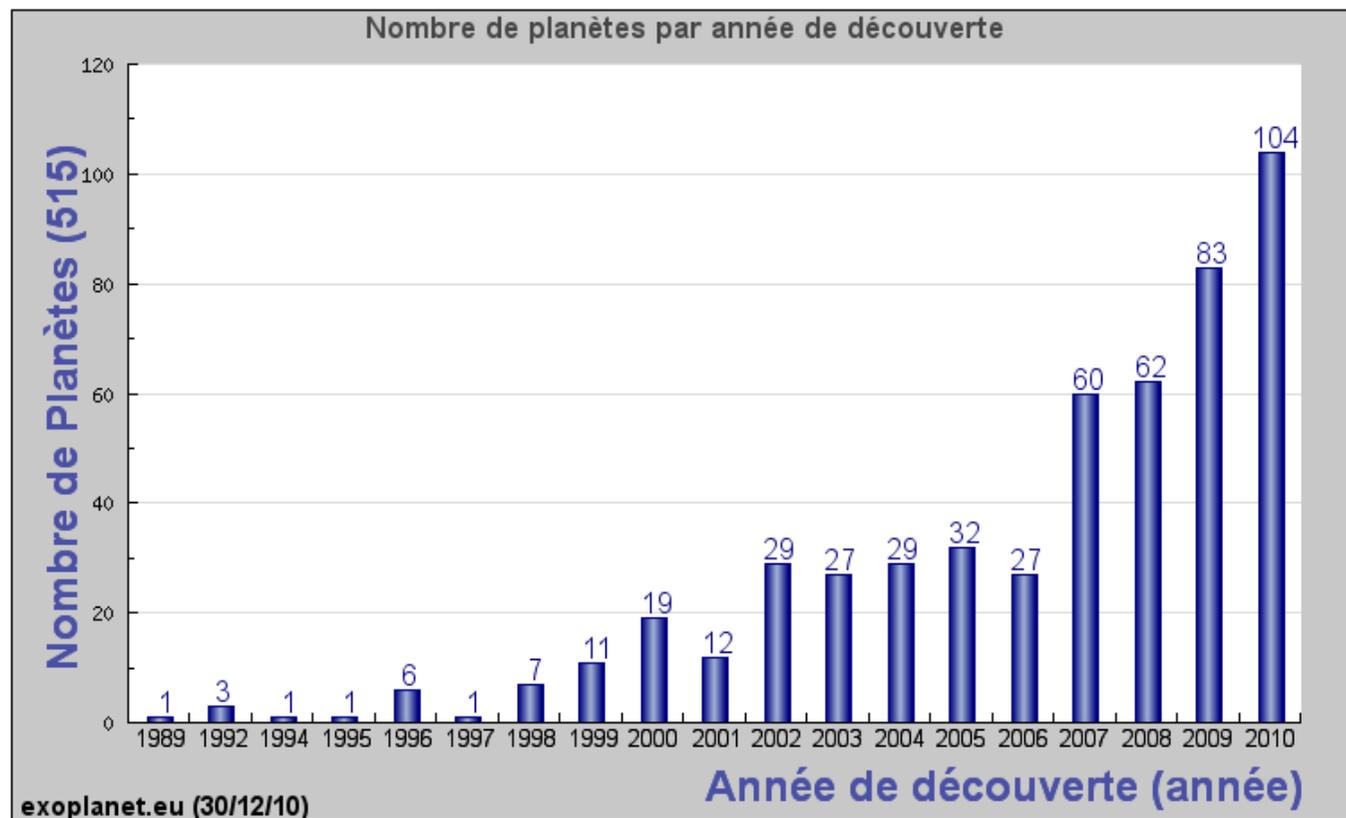




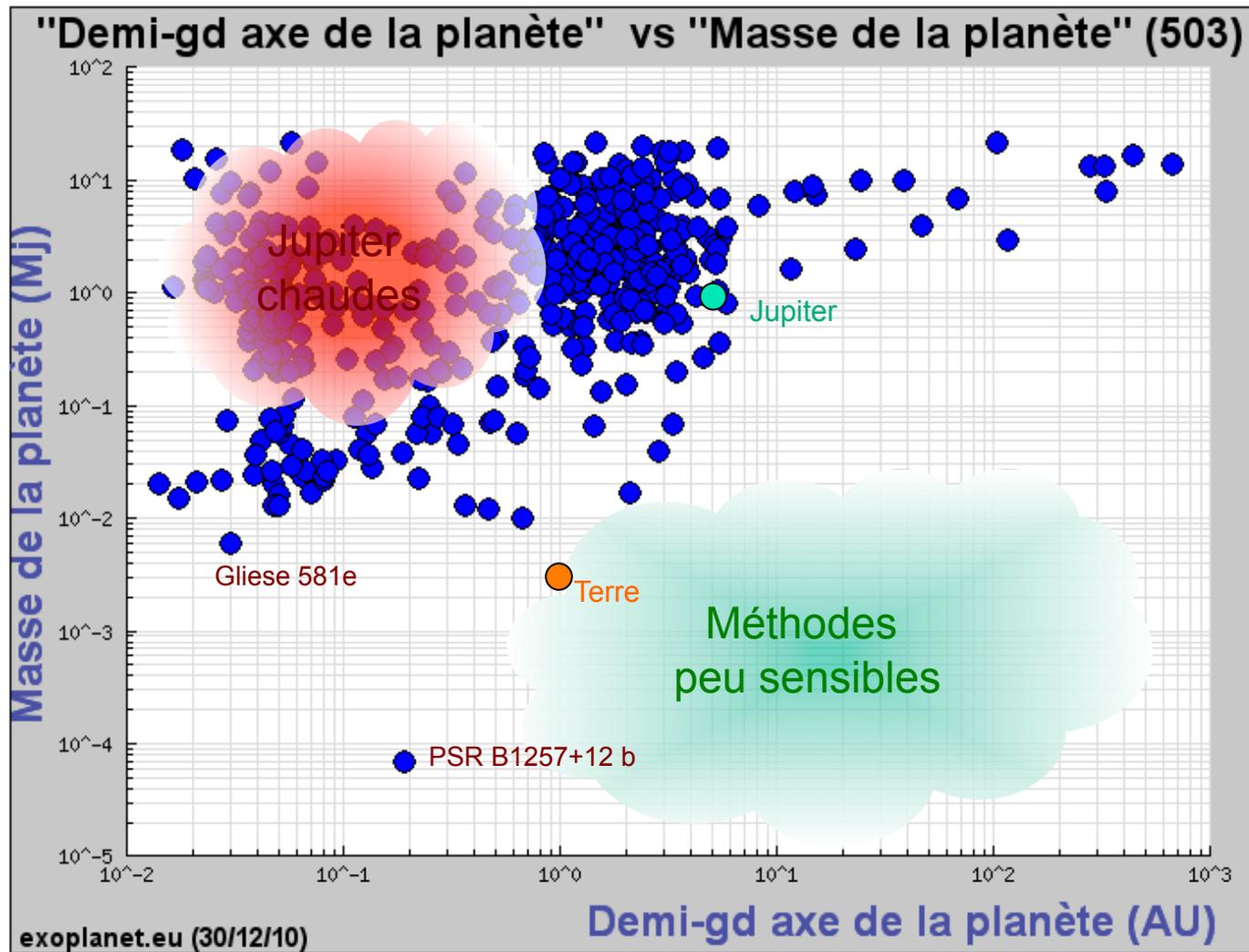
EXOPLANÈTES

Plus de 500 exoplanètes

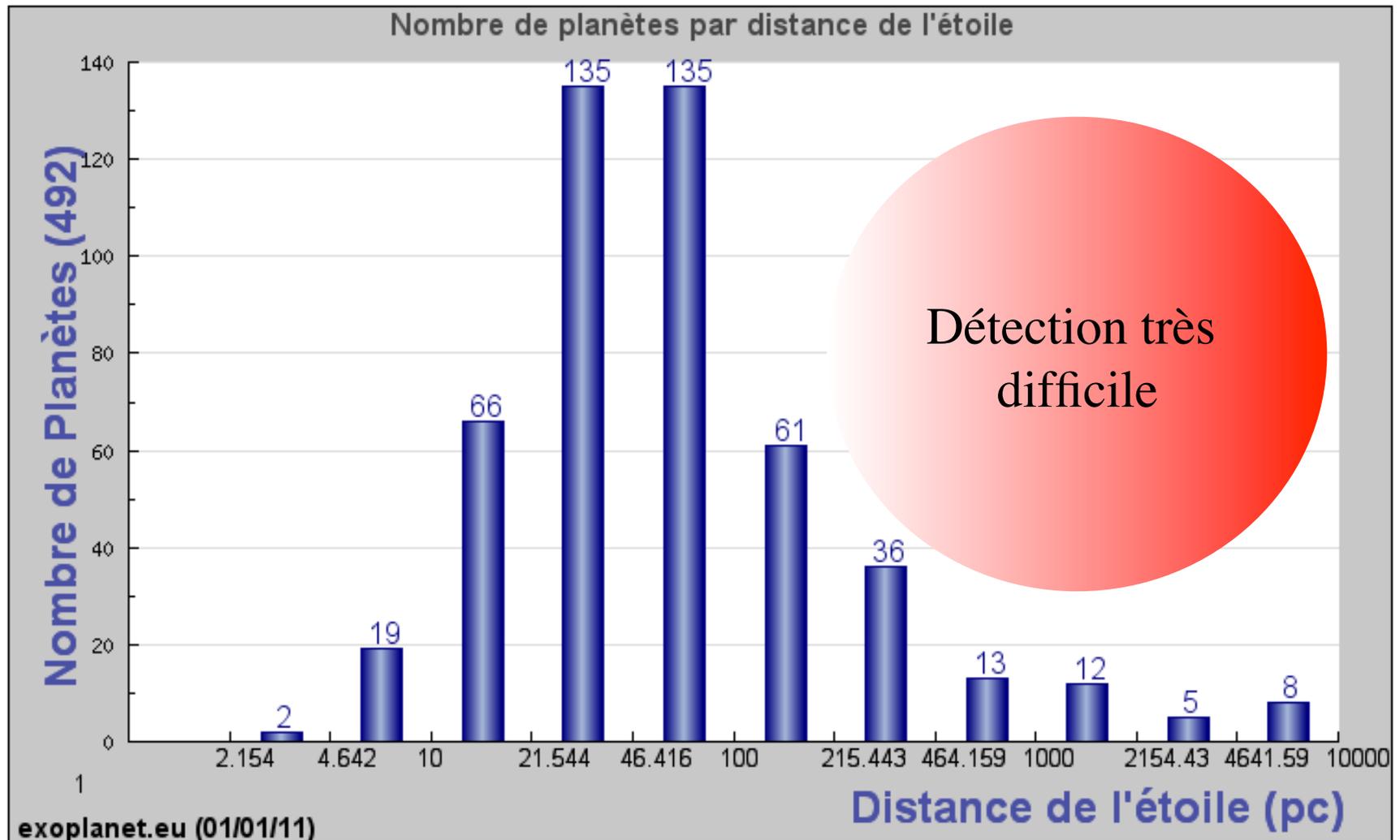
- Michel Mayor et Didier Queloz (1995) : 1^o exoplanète confirmée 51 Peg *b*
 - Une *Jupiter chaude* : $M \sim 0,5 M_J$ et $D \sim 0,05 \text{ UA}$



Distribution

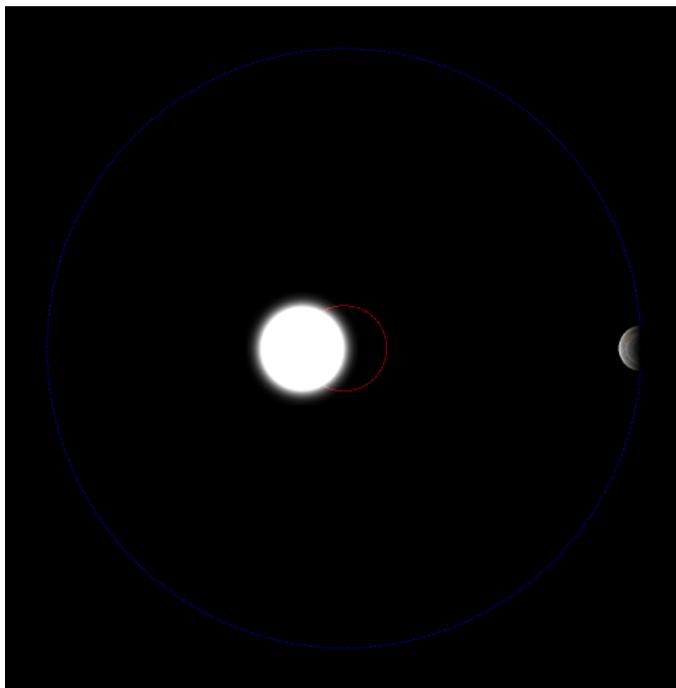


Distance de l'étoile



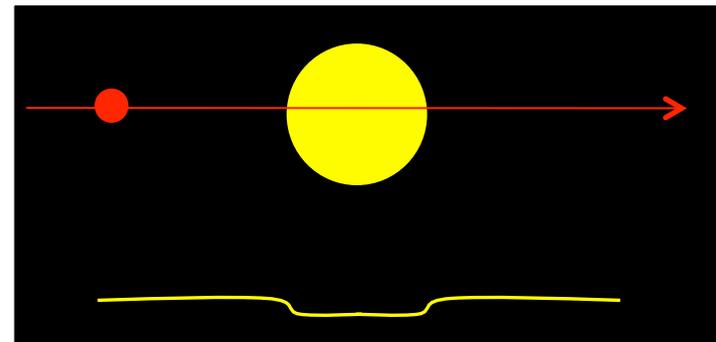
Techniques de recherche

- Vitesses radiales
- Astrométrie : déplacement de l'étoile

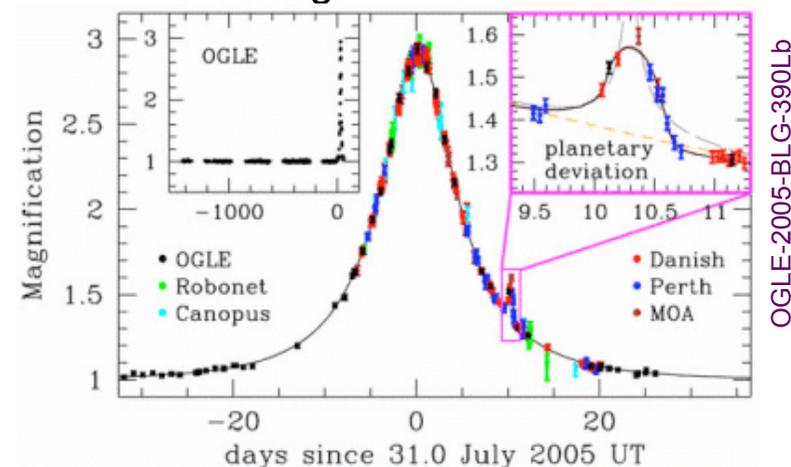


- Imagerie directe

- Transits : occultations de l'étoile par une planète



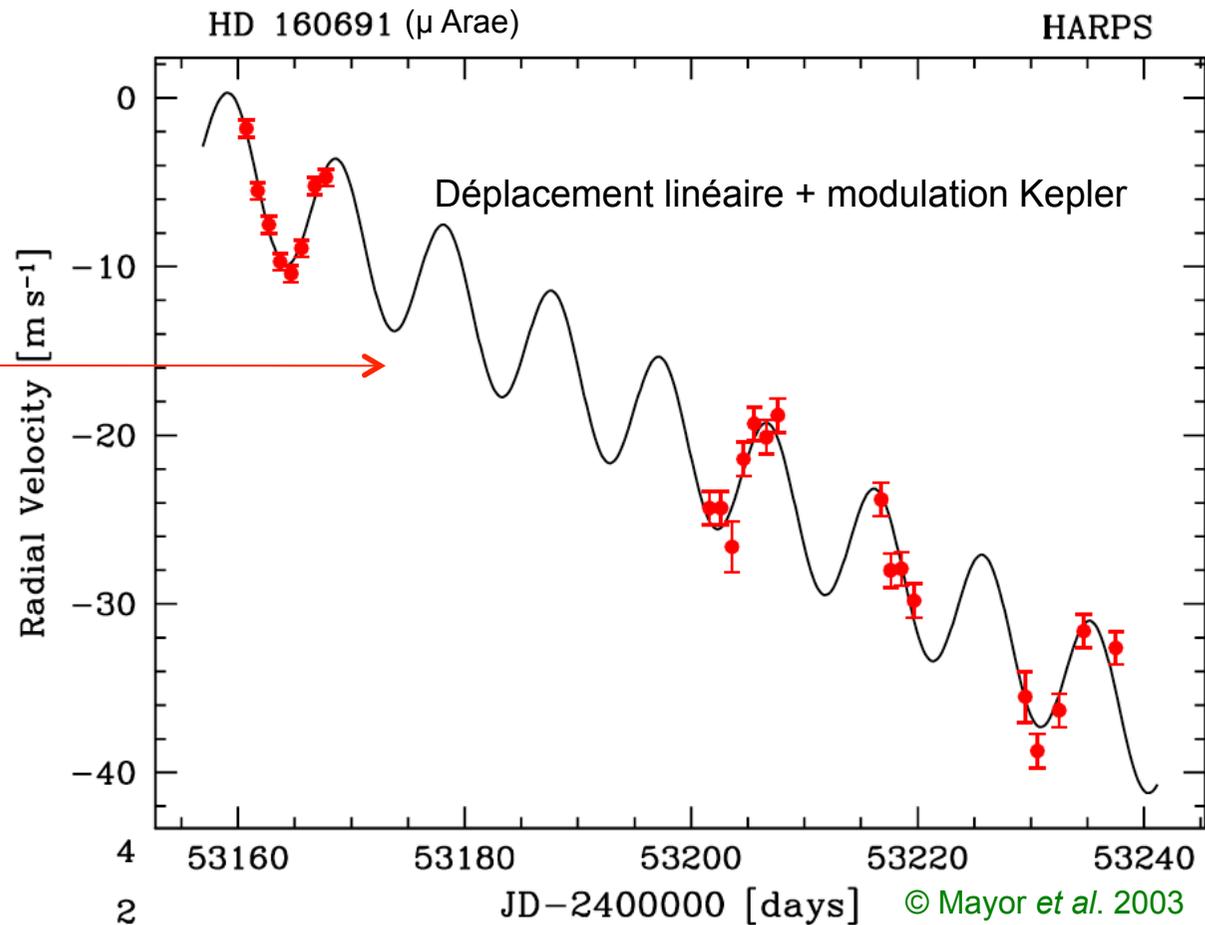
- Microlentille gravitationnelle



Techniques de recherche : vitesse radiale

- [Effet Doppler]

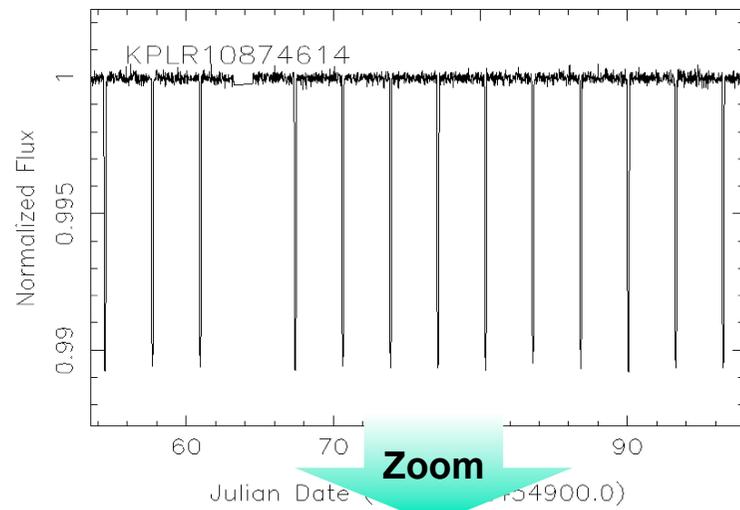
- Ici, découvertes de
 - μ Ara *b* en 2000
 - 1,68 M_J
 - 1,50 UA
 - μ Ara *c* en 2004
 - 0,03 M_J
 - 0,09 UA
 - μ Ara *d* en 2004
 - 0,52 M_J
 - 0,92 UA
 - μ Ara *e* en 2006
 - 1,81 M_J
 - 5,23 UA



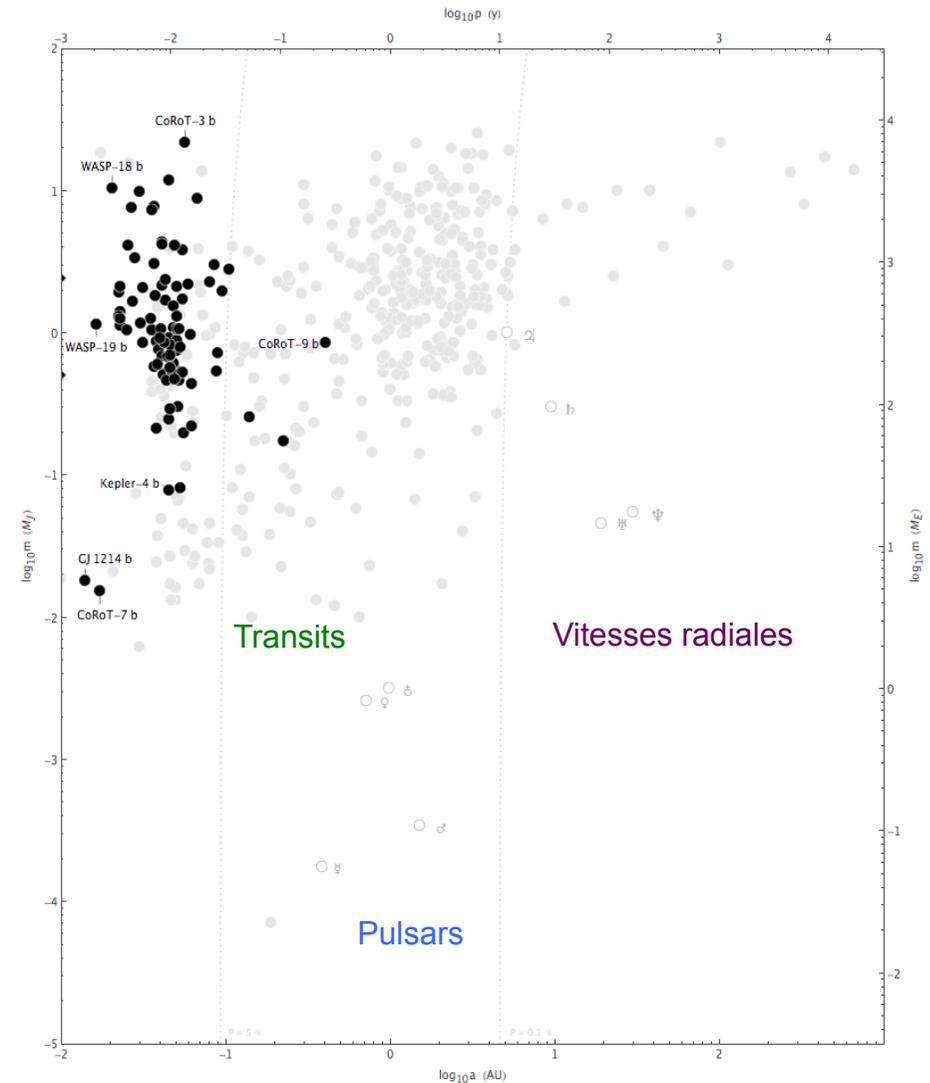
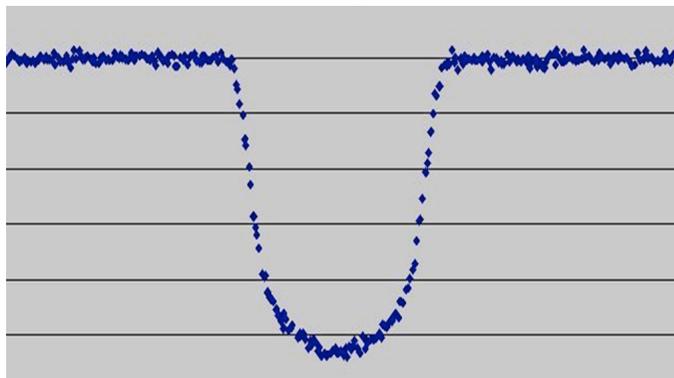
HARPS = High Accuracy Radial velocity Planet Searcher à La Silla (3.6 m ESO)

Techniques de recherche : transit

■ Courbe de lumière

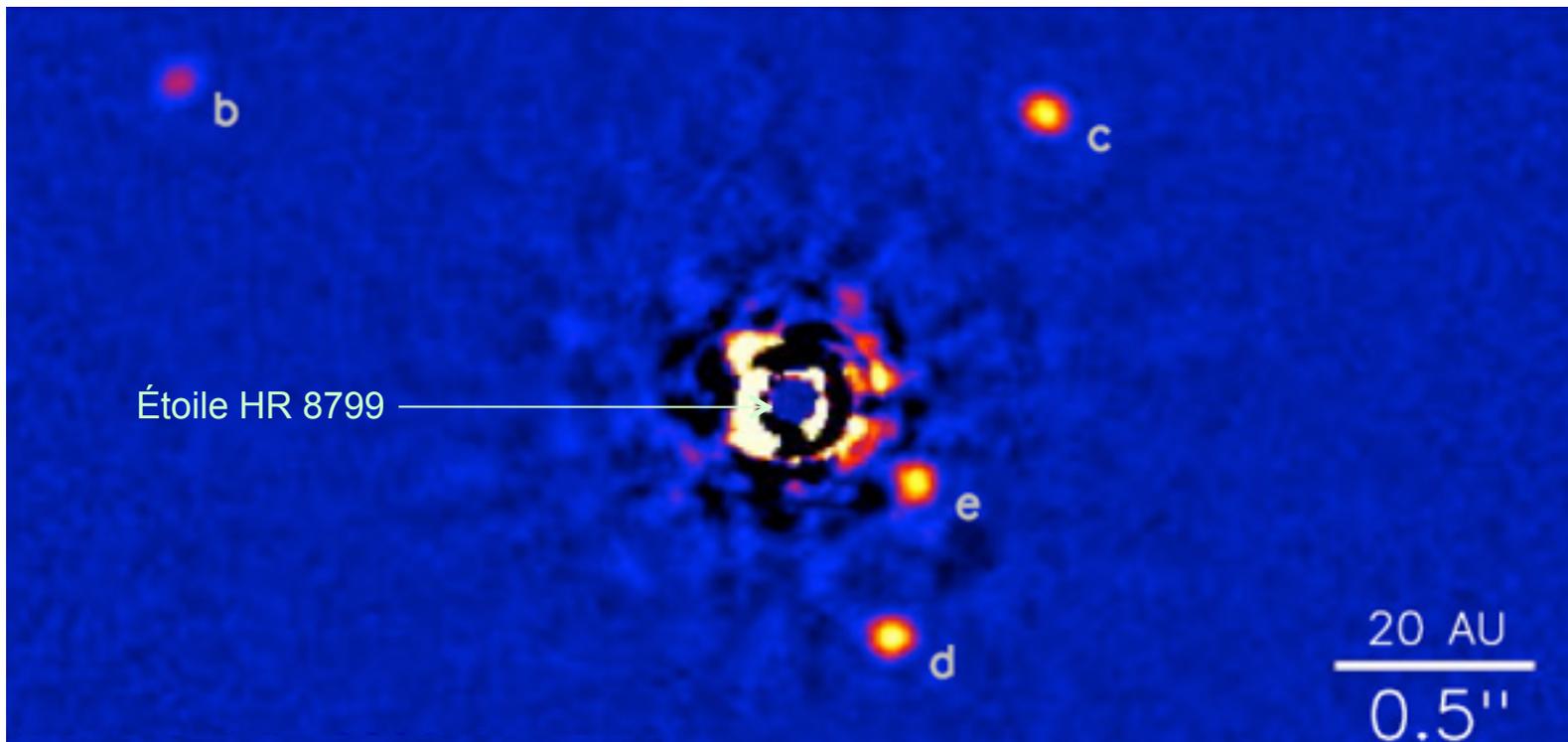


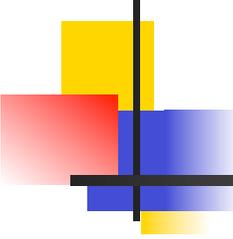
Zoom



Techniques de recherche : imagerie directe

- Difficulté technique: luminosité de l'étoile TRÈS supérieure à celle des planètes [même avec un coronographe!]
- Étoile HR 8799 *b*, *c*, *d* et *e* [Marois *et al.* nov. 2010, au Keck en infrarouge proche]





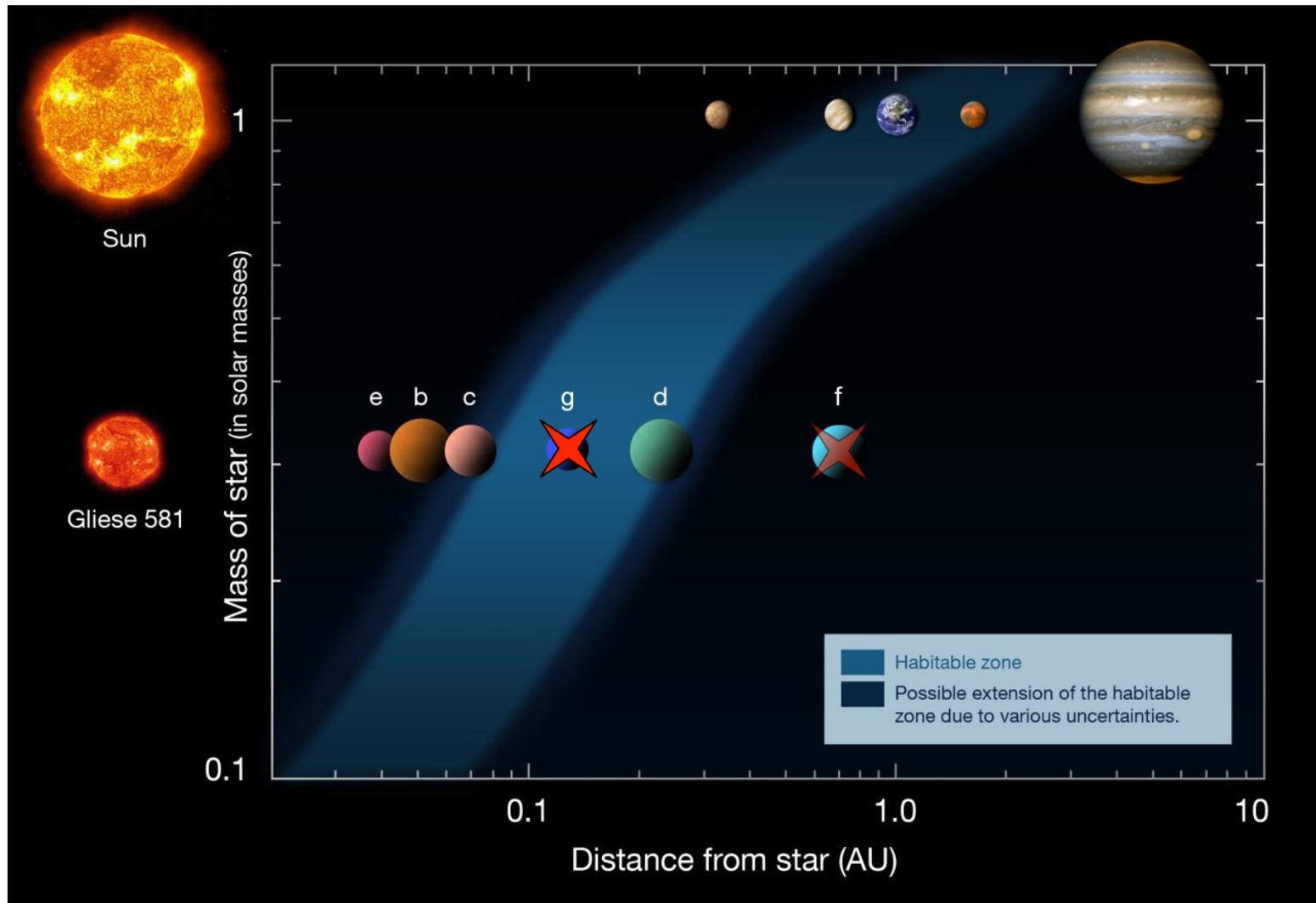
Bilan (TRÈS) provisoire

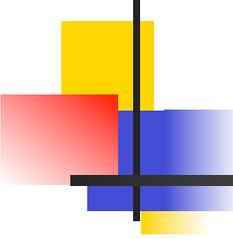
- **518 exoplanètes ± confirmées dans 435 systèmes** (au 3 janvier 2011)
 - Astrométrie & vitesses radiales 483 planètes dans 408 systèmes (48 multiples)
 - Transits 112 planètes dans 110 systèmes (7 multiples)
 - Microlentilles 11 planètes dans 10 systèmes (1 multiple)
 - Photométrie & imagerie 14 planètes dans 11 systèmes (1 multiple)

- Mais aussi
 - 119 planètes réfutées (ou non confirmées) dans 116 systèmes
 - La mission Corot [**CO**nvection **RO**tation and planetary **T**ransits] de l'ESA (lancée en décembre 2006, prolongée jusqu'en 2013) a annoncé la découverte de 17 exoplanètes
 - La mission Kepler de la NASA (lancée en mars 2009 pour 4 ans) surveille la luminosité de 145 000 étoiles
 - 312 candidats exoplanètes (5 confirmés)
 - 65 fausses alertes

- **Aucune planète n'a été détectée autour de plusieurs dizaines d'étoiles proches**
 - → 5% des étoiles seulement auraient des planètes
 - mais peut-être 20% des étoiles de métallicité importante (> solaire)

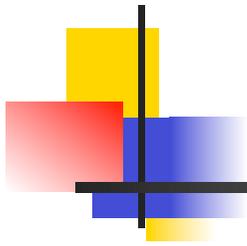
D'autres Terres ?





Du Soleil au système solaire

- La théorie de la formation du *Soleil* s'appuie sur les observations des étoiles jeunes dans son voisinage...
...et sur les lois de la physique
- De nombreux points demeurent obscurs
 - l'origine des nuages moléculaires (certainement des structures transitoires)
 - les effets de la métallicité
 - le transfert de moment angulaire
 - le rôle de la turbulence
- La théorie de la formation des *planètes* ne pouvait s'appuyer que sur les observations du système solaire
 - elle en rend assez bien compte
 - mais elle ne prévoyait pas vraiment les caractéristiques des *exoplanètes* observées depuis une quinzaine d'années (mais il faut tenir compte des biais d'observation)



Merci de votre attention !

