Formation des disques protoplanétaires et mécanismes de transport des CAIs

Adnan Ali Ahmad



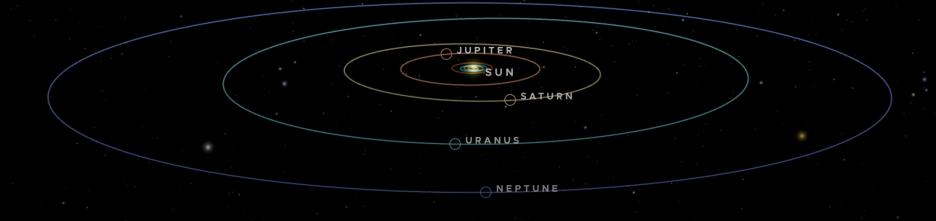






Un aperçu global de la théorie de formation stellaire - Où se forment les étoiles? - Comment se forme une étoile ? - Comment se forme un disque protoplanétaire? - Expansion radiale du disque - Jet de matière Crédits image: Caltech / T.Pyle (IPAC)

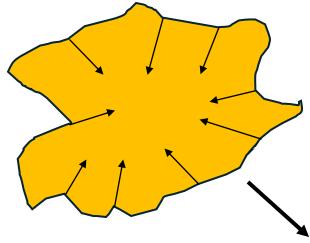




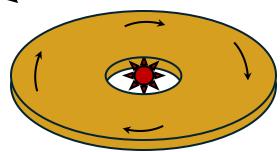
- Objet central à l'équilibre hydrostatique
- Planètes orbitant sur un même plan

L'hypothèse de la nébuleuse

1: Effondrement dû à la gravité



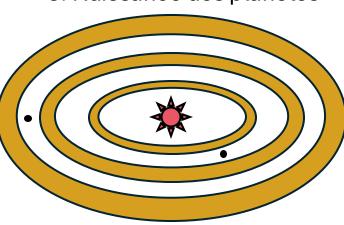
2: Naissance d'une protoétoile et d'un disque circumstellaire





Pierre Simon de Laplace (1749-1827)

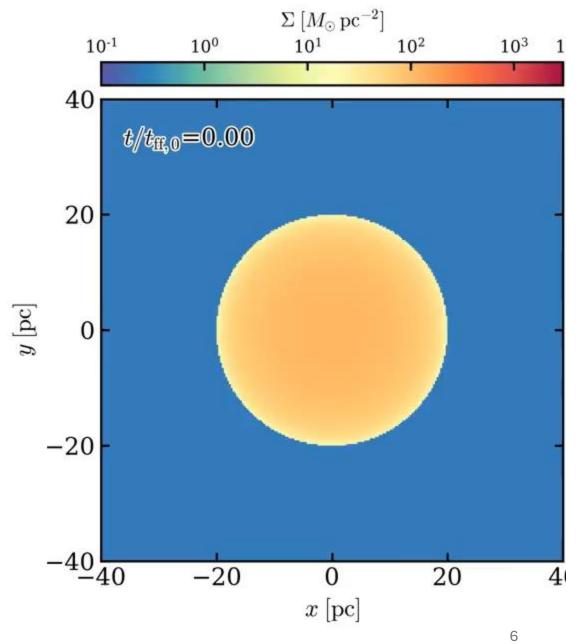
3: Naissance des planètes





Simulation de la formation d'un amas d'étoiles

Jeong-Gyu Kim et al. 2018







Pouponnières d'étoiles

Température $\sim 10~\mathrm{K}~(-263~\mathrm{C}^\circ)$ $\sim 1\%$ poussière en masse



Crédits image: NASA, ESA

Bande Visible



Image Hubble Space Telescope

Pouponnières d'étoiles

Température $\sim 10~\mathrm{K}~(-263~\mathrm{C}^\circ)$ $\sim 1\%$ poussière en masse



Crédits image: NASA, ESA

Bande proche infrarouge

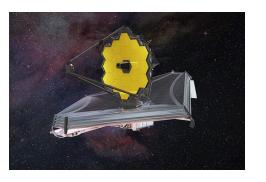
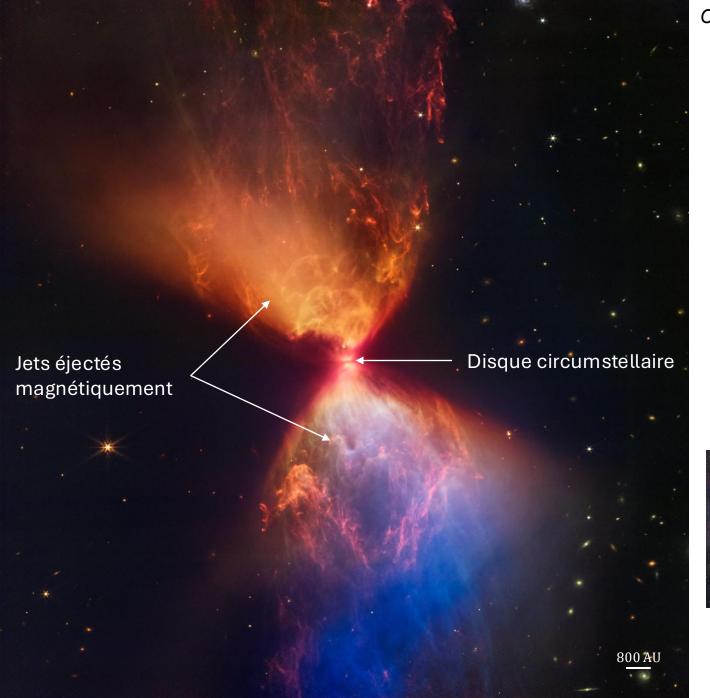
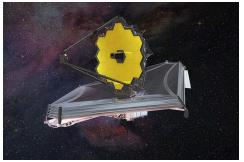


Image James Webb Space telescope

L1527 (NIRCam) Taurus

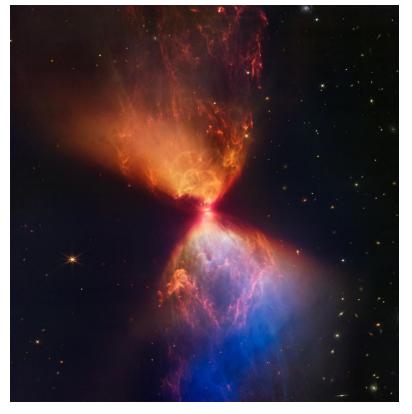


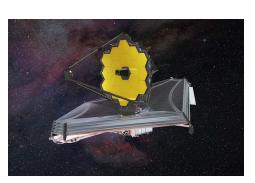
Crédits image: NASA, ESA



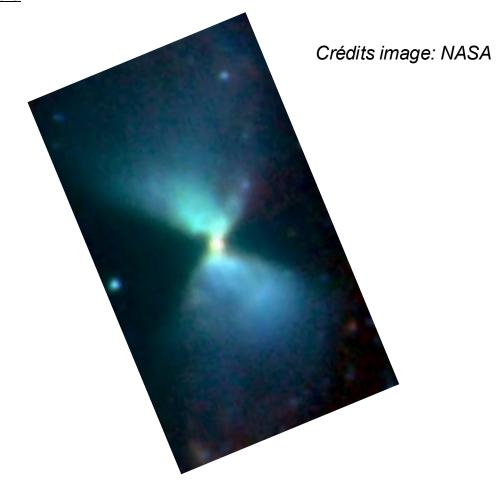
<u>L1527 (NIRCam)</u> <u>Taurus</u>

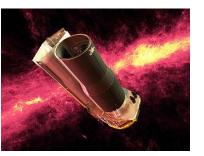
Crédits image: NASA, ESA

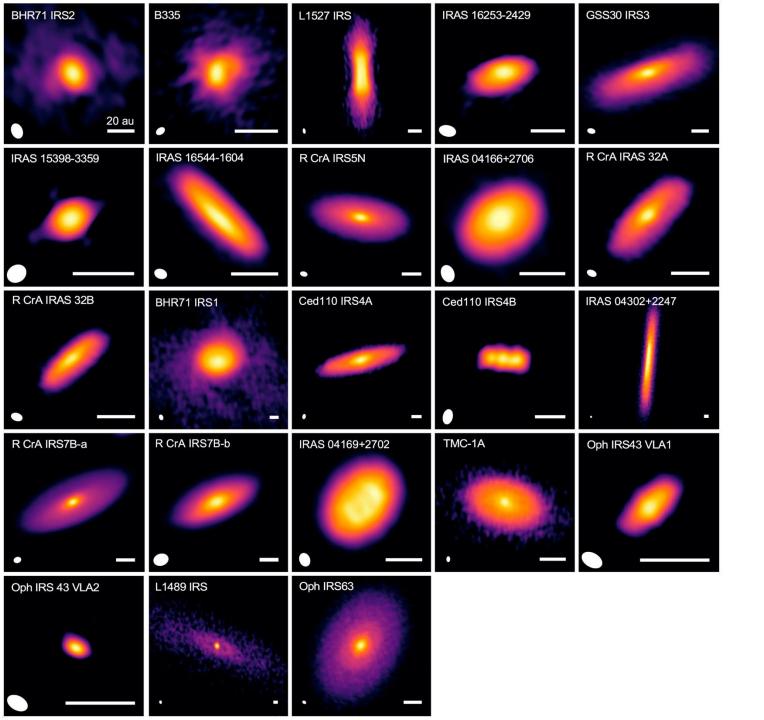




<u>L1527 (Spitzer Space Telescope)</u> <u>Taurus</u>







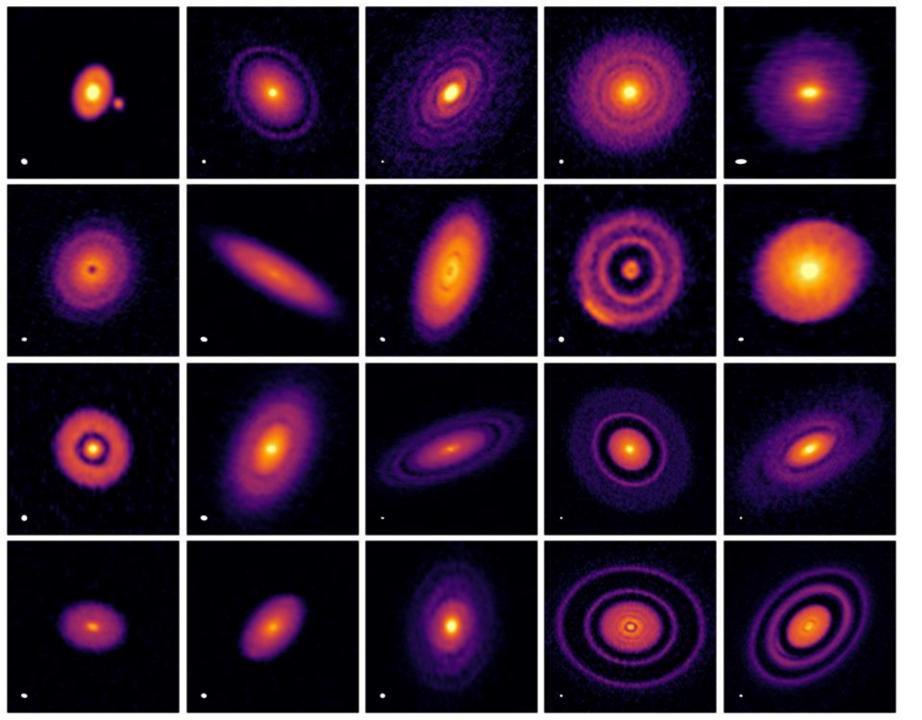
eDisk Survey

Ohashi+ 2023

Submillimétrique

ALMA





DSHARP Survey

Andrews+ 2018

Submillimétrique

- Les protoétoiles sont entourées de disques de gaz et de poussière, dont beaucoup présentent des anneaux
- Ce sont des systèmes planétaires en formation

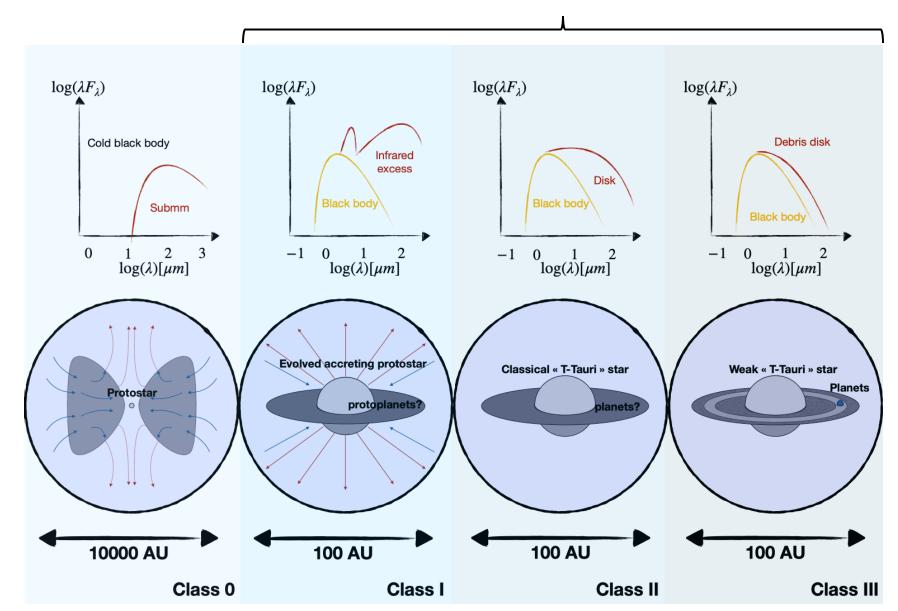
ALMA



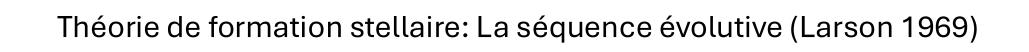
La séquence empirique

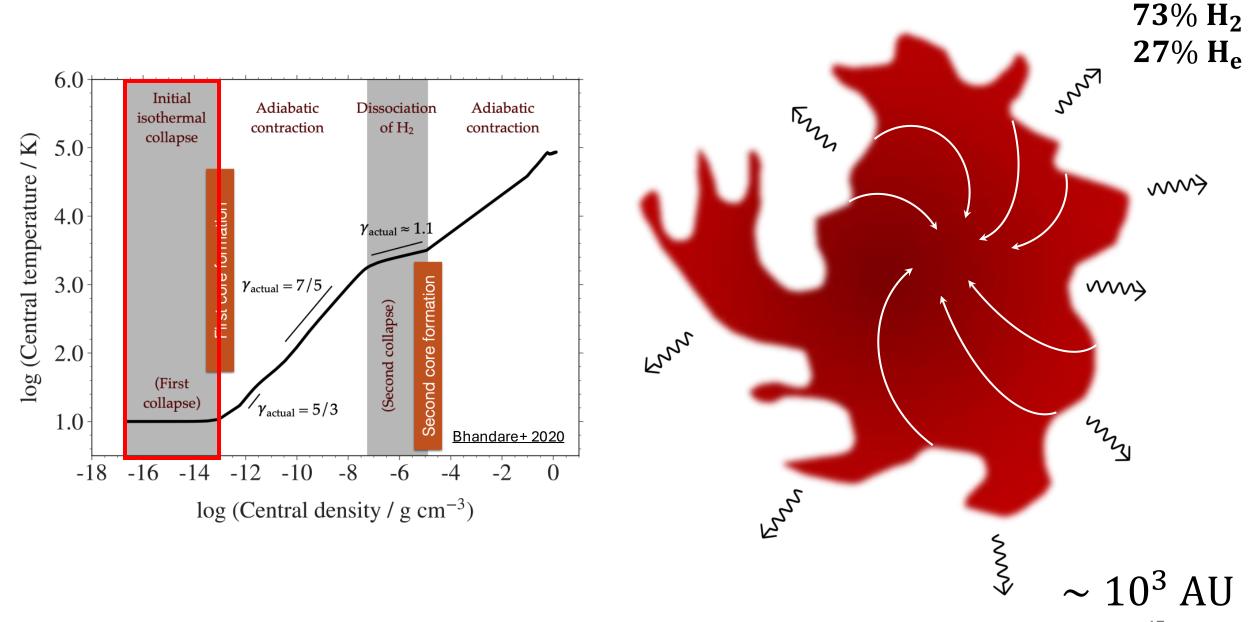
André 2002

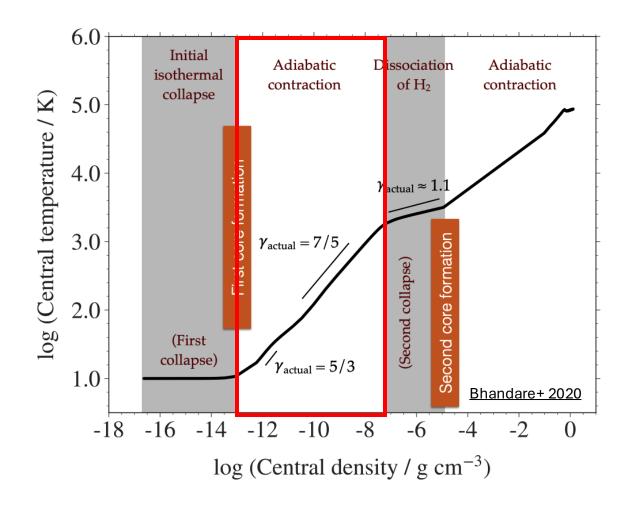
Meilleures contraintes observationnelles



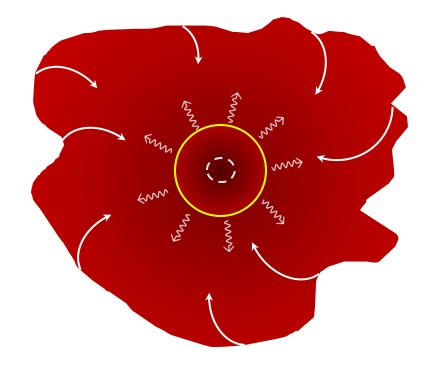
Crédits: Lebreuilly 2020

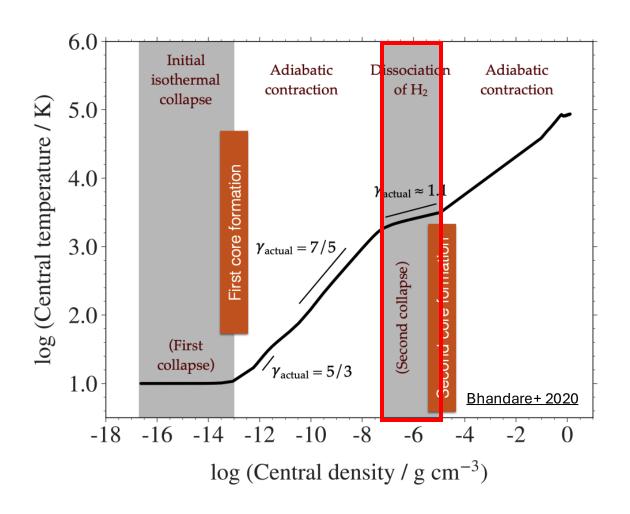


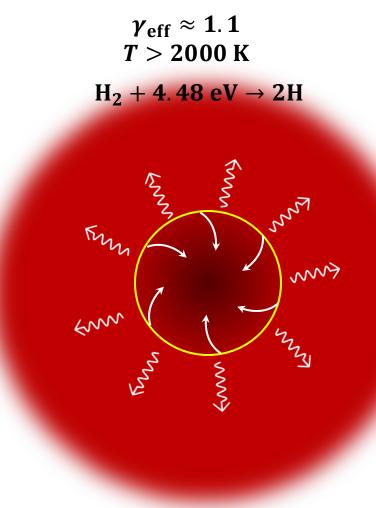


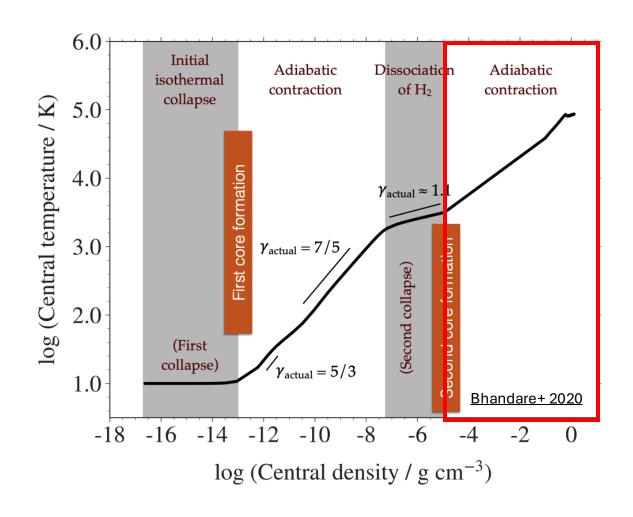


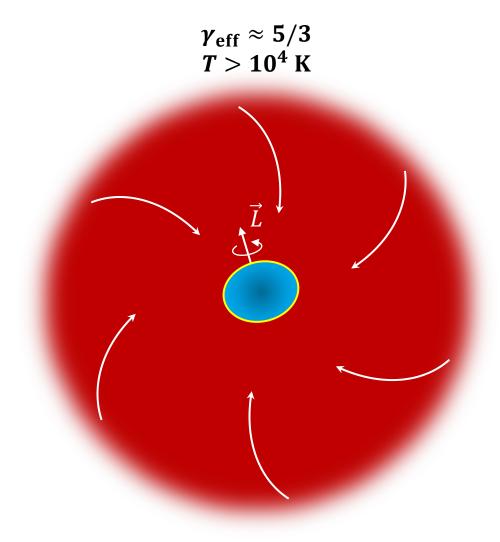
$$\gamma_{\rm eff} pprox rac{5}{3} \ (T < 100 \ {
m K}); \ \gamma_{\rm eff} pprox rac{7}{5} \ (T > 100 \ {
m K})$$

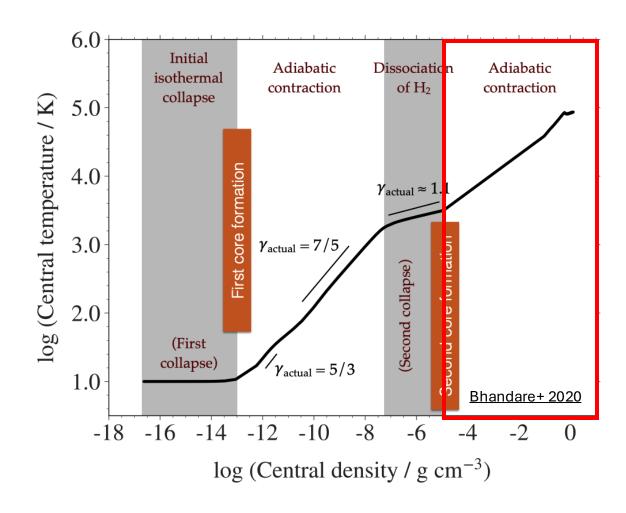




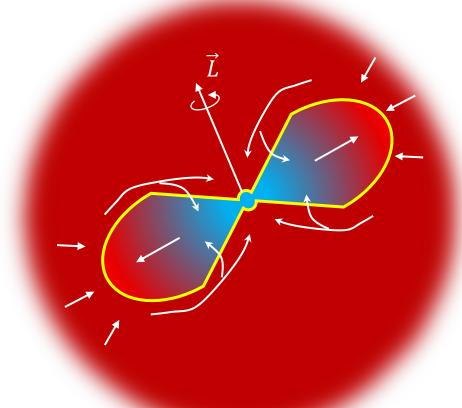


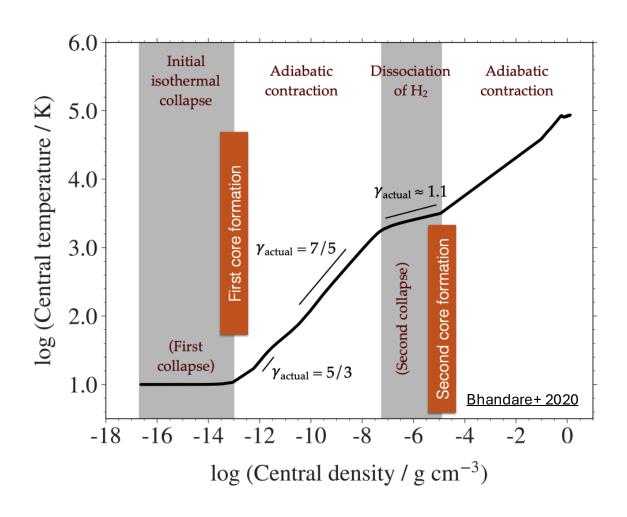




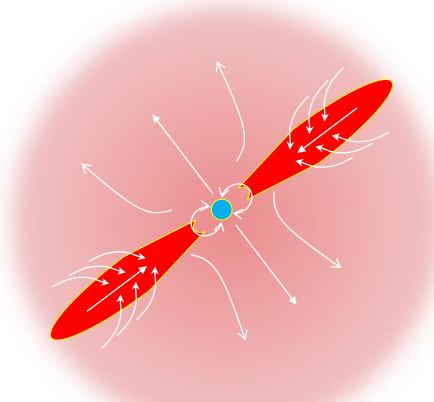


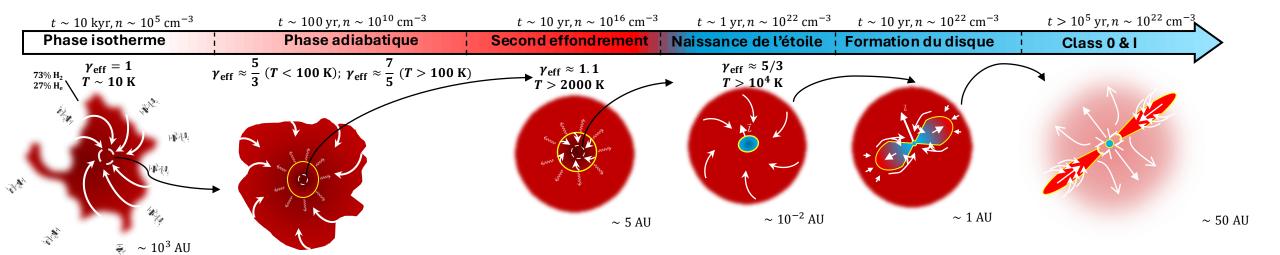












La formation d'un disque est possible

- ~ 25 ordres de grandeurs en densités
- ~ 8 ordres de grandeurs en étendues spatiales

~ 5 AU



Quelle physique prendre en compte?

Hydrodynamique

Gravité

Transfert radiatif (avec équation d'état réaliste)



- i. Le disque est axisymétrique
- ii. Le disque est géométriquement fin $(H \ll R)$

Conservation de la masse + conservation du moment cinétique (Pringle 1981)

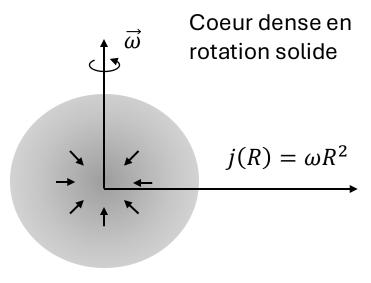
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[\sqrt{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma \sqrt{R} \right) \right] + \frac{S(R, t)}{\text{Terme source (accrétion)}}$$

Viscosité effective $\nu = \alpha H^2 \Omega$ (Shakura & Sunyaev 1973)

$$S(R,t) = \frac{\dot{M}_d}{8\pi R_c^2} \left(\frac{R}{R_c}\right)^{-3/2} \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{\frac{R}{R_c}}}}$$

- I. Vigueur du **transport** de moment cinétique au sein du disque: α
- II. La physique de **l'effondrement**
 - a) Taux d'accrétion sur le disque: $\dot{M}_d(t)$
 - b) Rayon centrifuge de la matière accrétée: $R_c(t)$

Hueso & Guillot 2005



Hartmann+ 1998

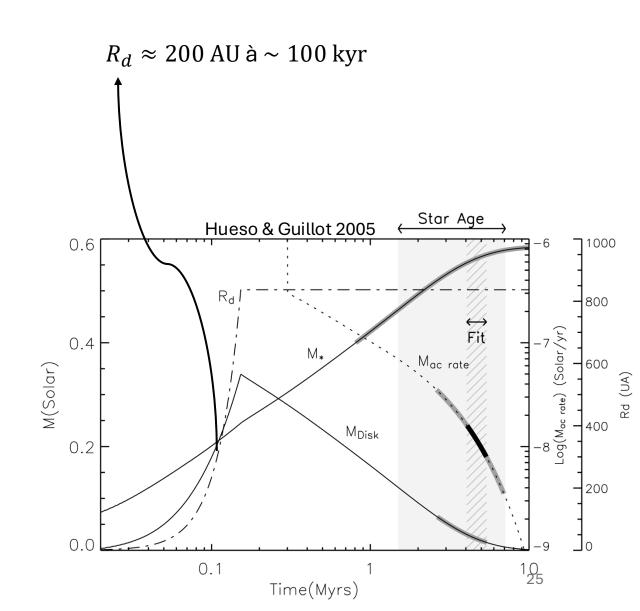
$$\alpha \approx 10^{-2}$$

Larson 1969, Penston 1969

$$\dot{M}_d \approx \frac{c_s^3}{G}$$

Shu 1977

$$R_c \approx 53 \left(\frac{\omega}{10^{-14} \text{ s}^{-1}}\right)^2 \left(\frac{T}{10 \text{ K}}\right)^{-4} \left(\frac{M_*(t) + M_d(t)}{1 \text{ M}_{\odot}}\right)^3 \text{ AU}$$



$$R_d \approx 200 \, \mathrm{AU} \, \mathrm{\grave{a}} \sim 100 \, \mathrm{kyr}$$
 (Hueso & Guillot)

Que disent les observations?

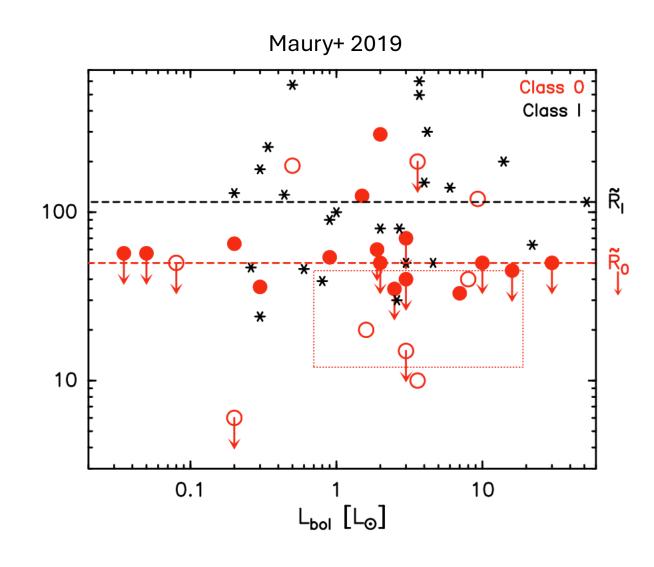
Les disques jeunes sont rarement de grande taille (Maury+ 2019, Tobin+ 2020)

Il faut réduire le moment cinétique durant l'effondrement Pour expliquer le transport des CAIs:

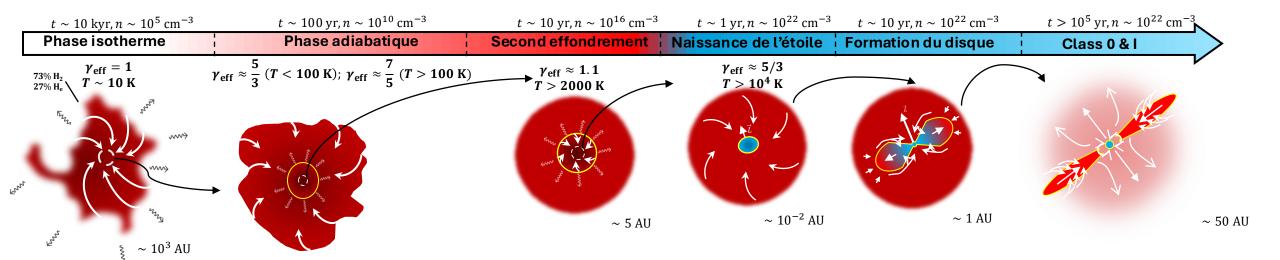




Pignatale+ 2018, Morbidelli+ 2022, Marschall+ 2023



75% des disques ont $R_d < 60 \text{ AU}$



La formation d'un disque est possible

~ 25 ordres de grandeurs en densités

~ 8 ordres de grandeurs en étendues spatiales

~ 5 AU



Quelle physique prendre en compte?

Hydrodynamique

Gravité

Transfert radiatif (avec équation d'état réaliste)

Champs magnétiques



Les équations de la magneto-hydrodynamique (idéale)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = \vec{0}$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{v} \otimes \vec{v} + \left(P + \frac{\left| \vec{B} \right|^2}{2} \right) \mathbb{I} - \vec{B} \otimes \vec{B} \right) = -\rho \vec{\nabla} \phi$$

$$\frac{\partial E_{\text{tot}}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[\vec{v} \left(E_{\text{tot}} + P + \frac{\left| \vec{B} \right|^2}{2} \right) - \vec{B} \left(\vec{B} \cdot \vec{v} \right) \right] = -\rho \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \phi$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B})$$

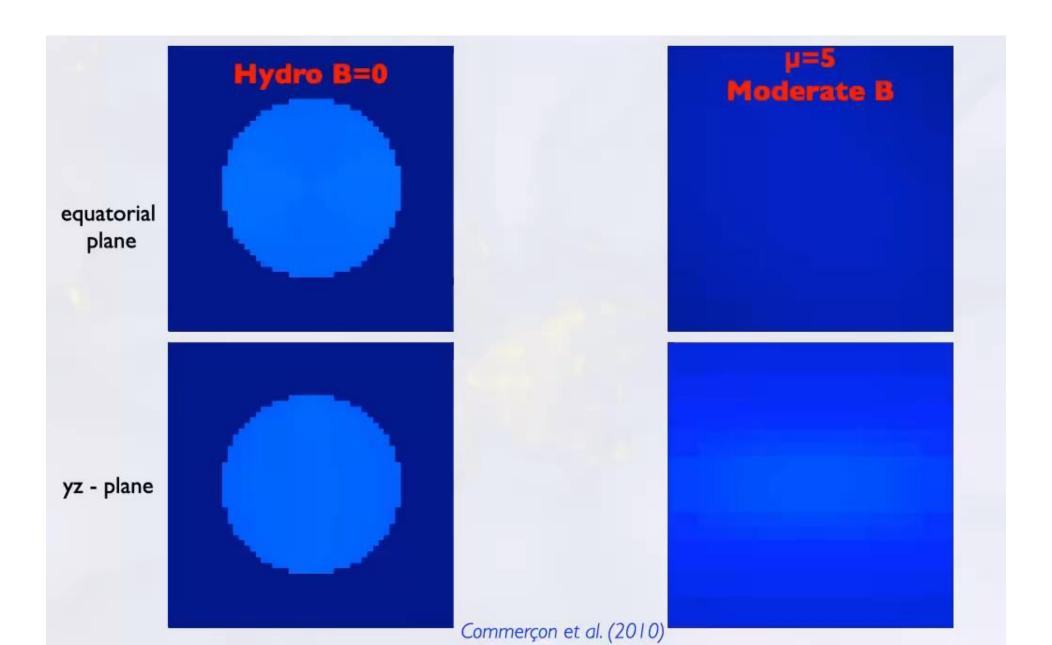
Conservation de la masse

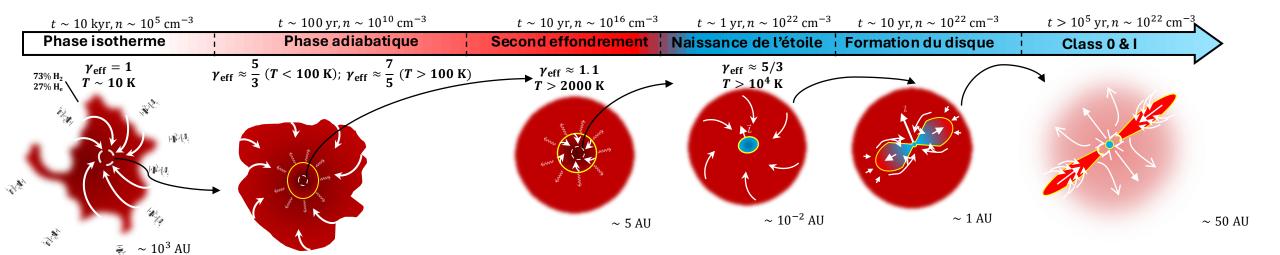
Conservation de la quantité de mouvement

Conservation de l'énergie

Auto-gravité

Équation d'induction





La formation d'un disque est possible

~ 25 ordres de grandeurs en densité

~ 8 ordres de grandeurs en étendue spatiale

~ 5 AU



Quelle physique prendre en compte?

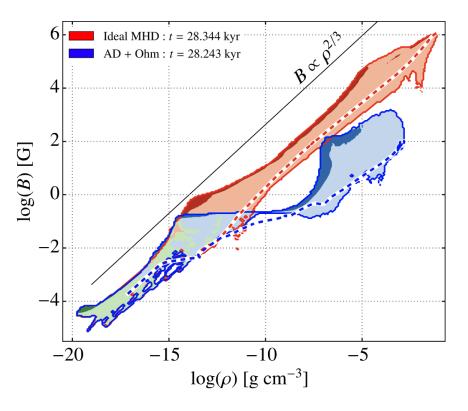
Hydrodynamique

Gravité

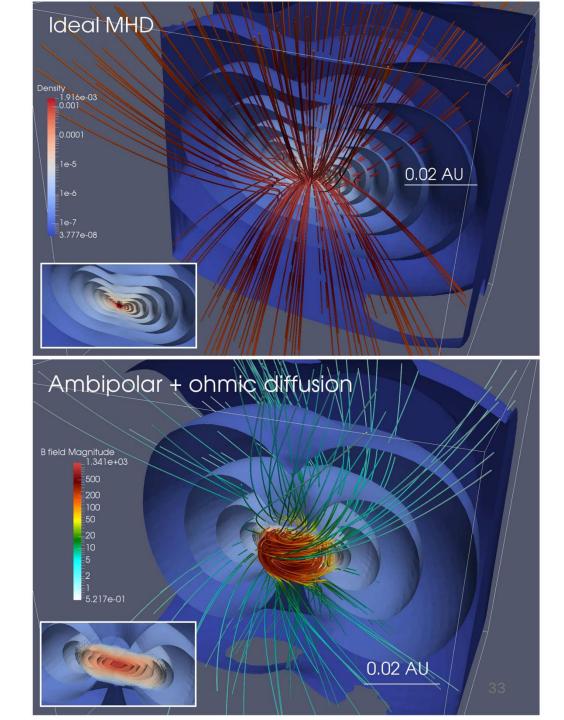
Transfert radiatif (avec équation d'état réaliste)

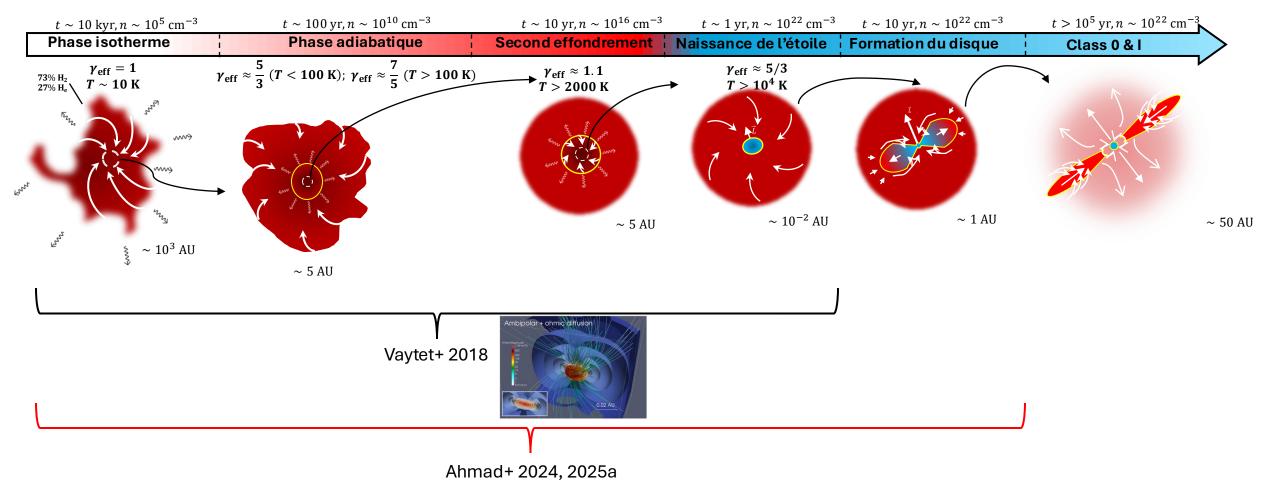
Champs magnétiques non idéaux

Vaytet+2018



- La résistivité magnétique crée un plateau $B \sim 0.1~\mathrm{G}$
- La réduction du freinage magnétique permet un disque de ≈ 0.2 AU de se former en **~30 jours**





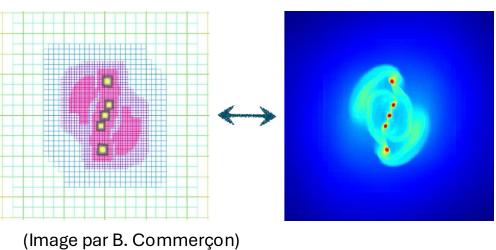
Ahmad+ 2025a

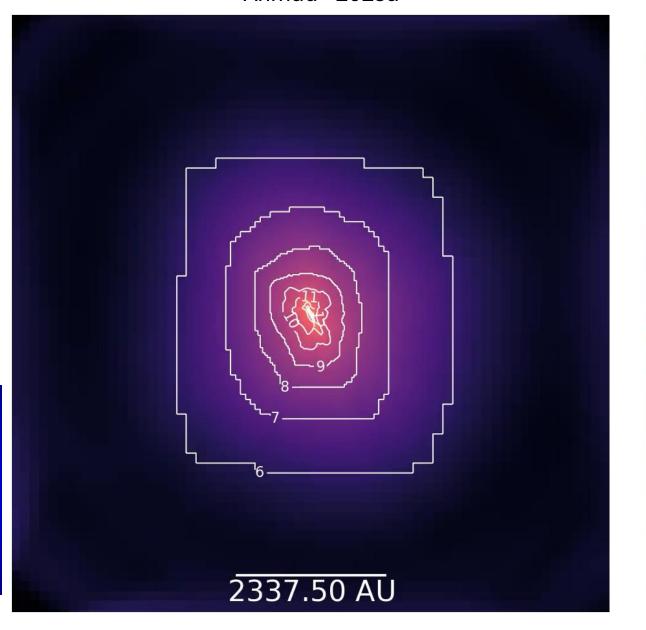
RAMSES (Teyssier 2002)

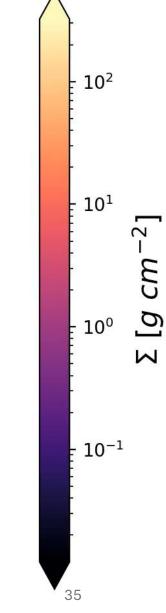


Résolution typique:

$$\Delta x \sim \left[10^{-5} - 10^{-4}\right] AU$$





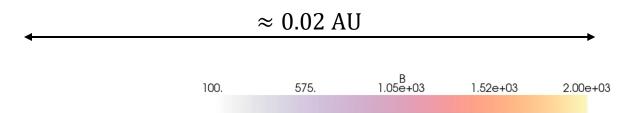


Ahmad+ 2025b

RAMSES (Teyssier 2002)



La protoétoile subit **une croissance rapide** en masse et en taille après sa naissance

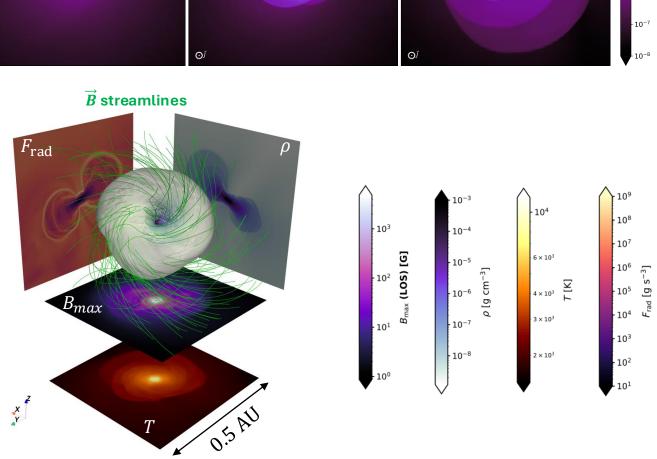


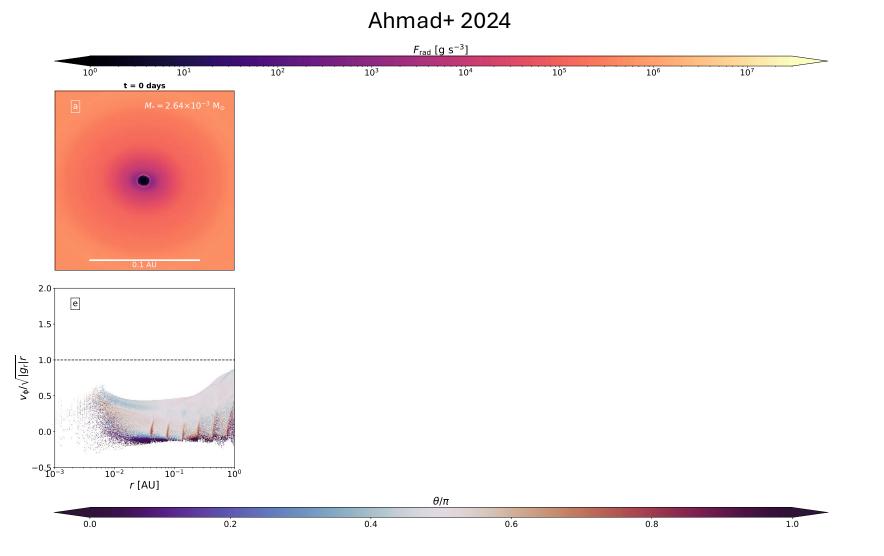
Ahmad+ 2025a

0.3 AU



Un disque **dense** et **chaud** se forme autour de la protoétoile

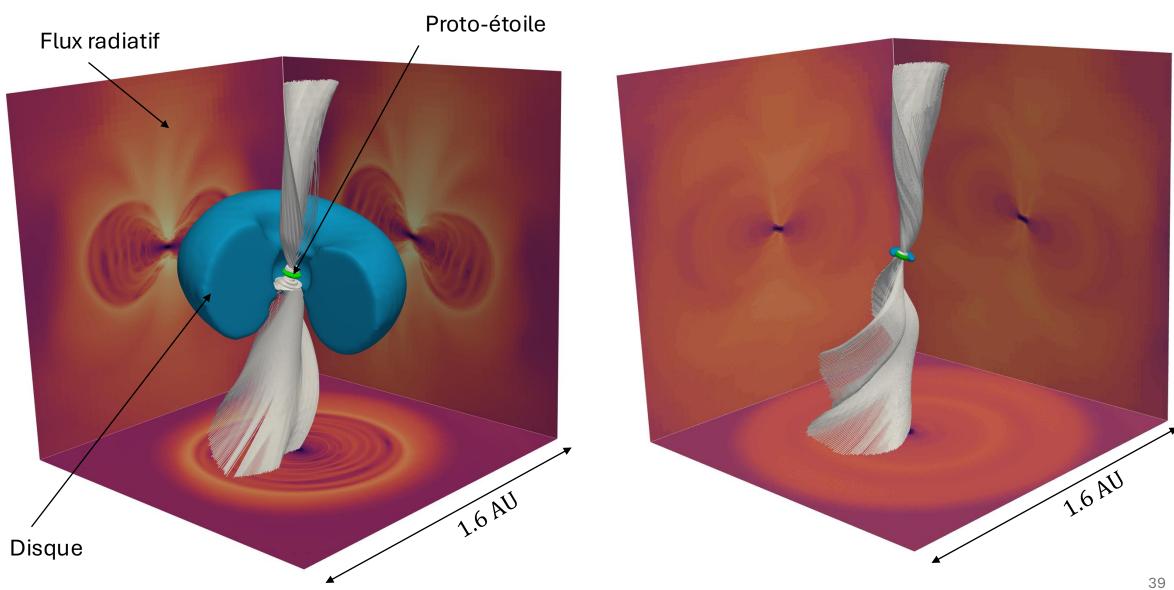




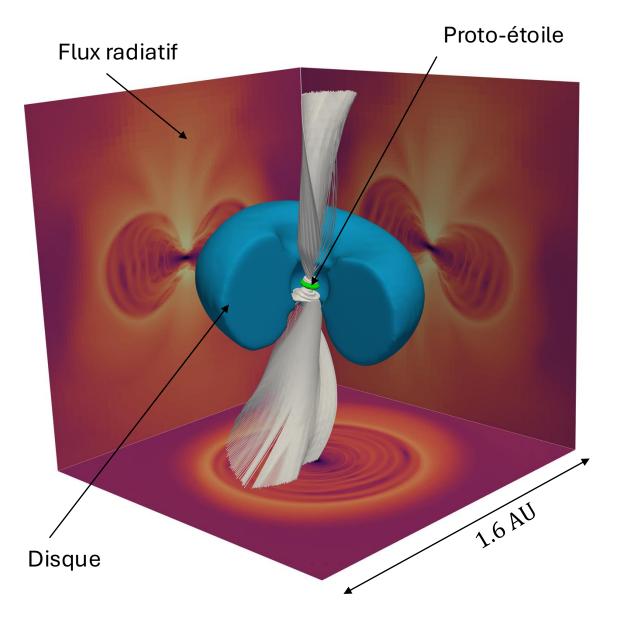
- La protoétoile perd de la masse en raison d'un excès de moment cinétique
- ❖ Douce transition de la protoétoile au disque ⇒ Les deux forment un système fluide continu
- De la matière à très haute température est transportée vers l'extérieur ⇒ Mais jusqu'où ?

t = -0.02 (yr)

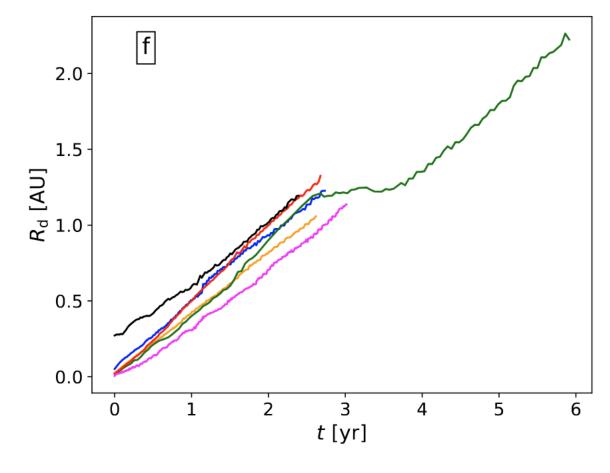
Ahmad+ 2024

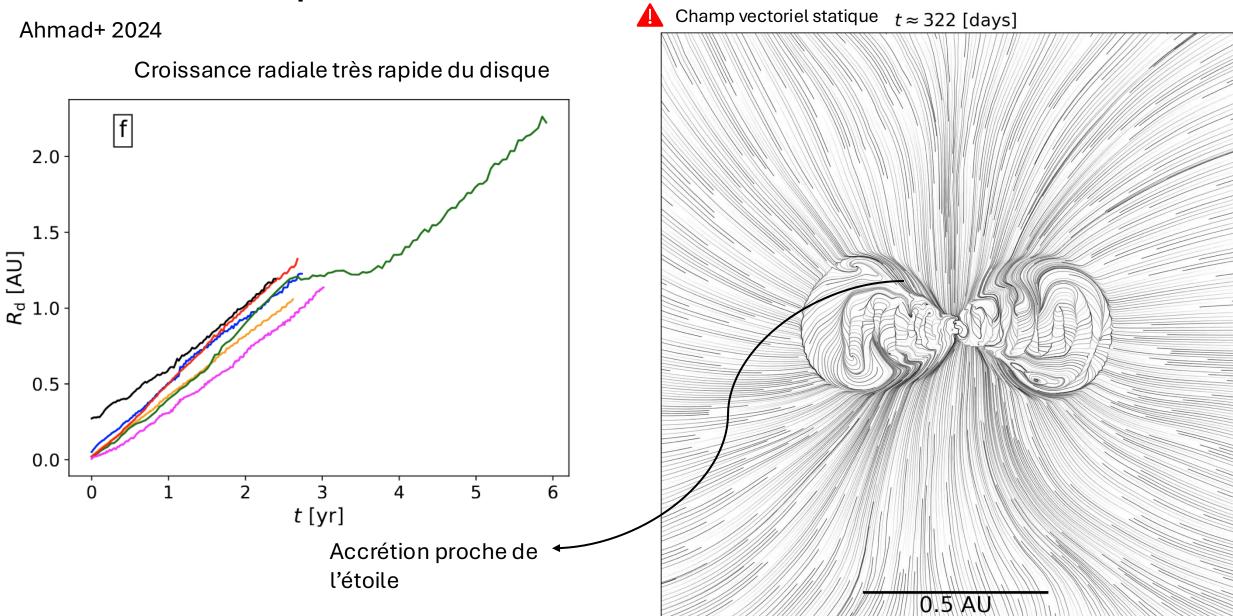


Ahmad+ 2024



Croissance radiale très rapide du disque





Ejection de matière par les jets

Méchanismes magnétiques

Magnéto-centrifuge (Blandford & Payne 1982)

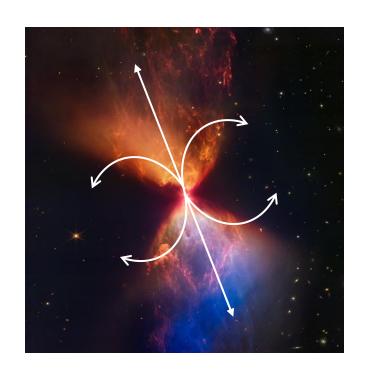
<u>"Tour magnétique"</u> (Uchida & Shibata 1985; Lynden-Bell 2003)

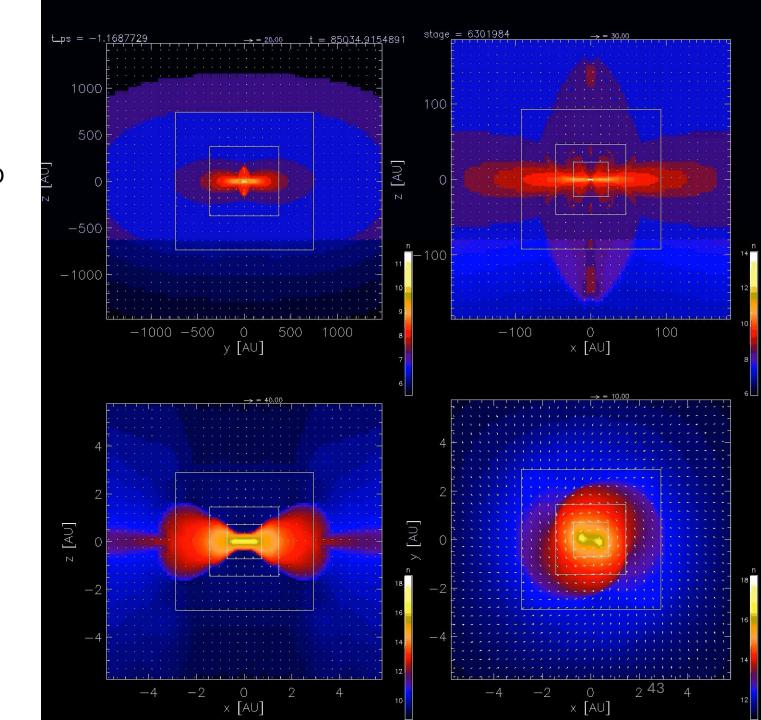
Movie by Marc Joos



Ejection de matière par les jets

Machida+ 2019 Simulation MHD 3D

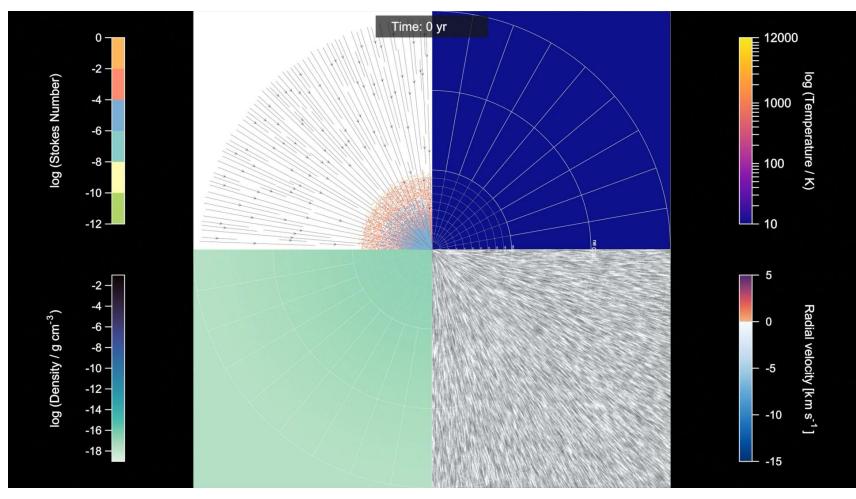


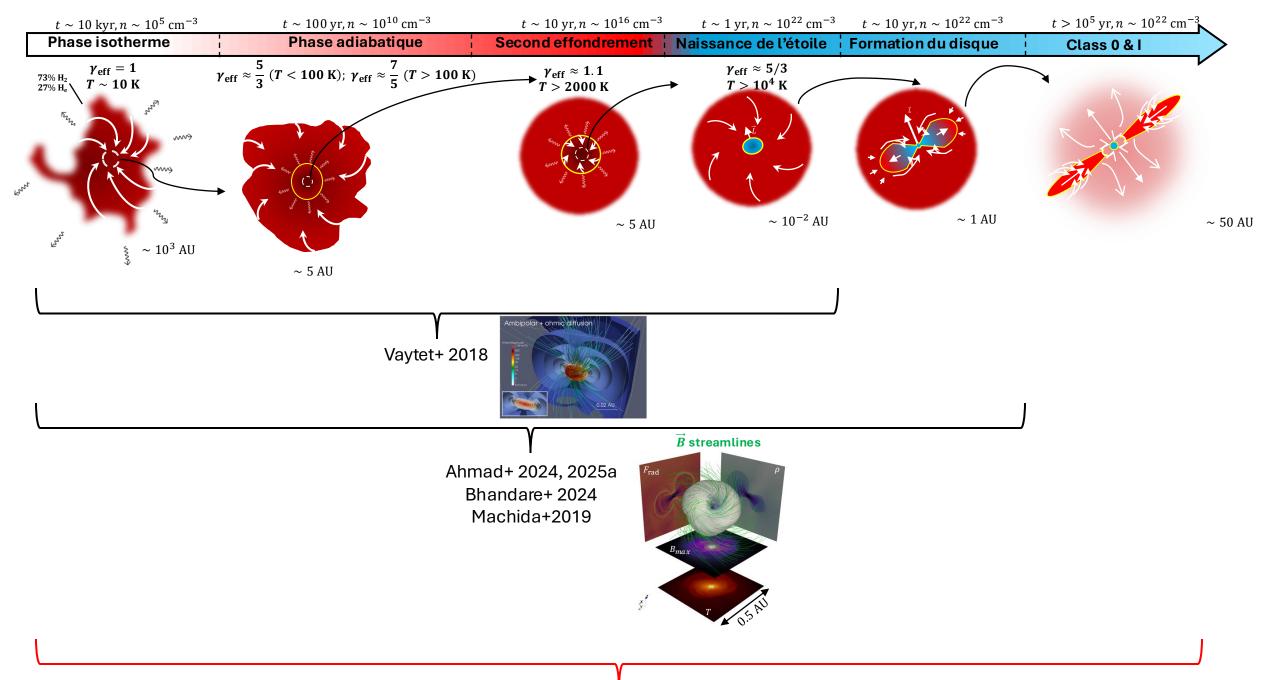


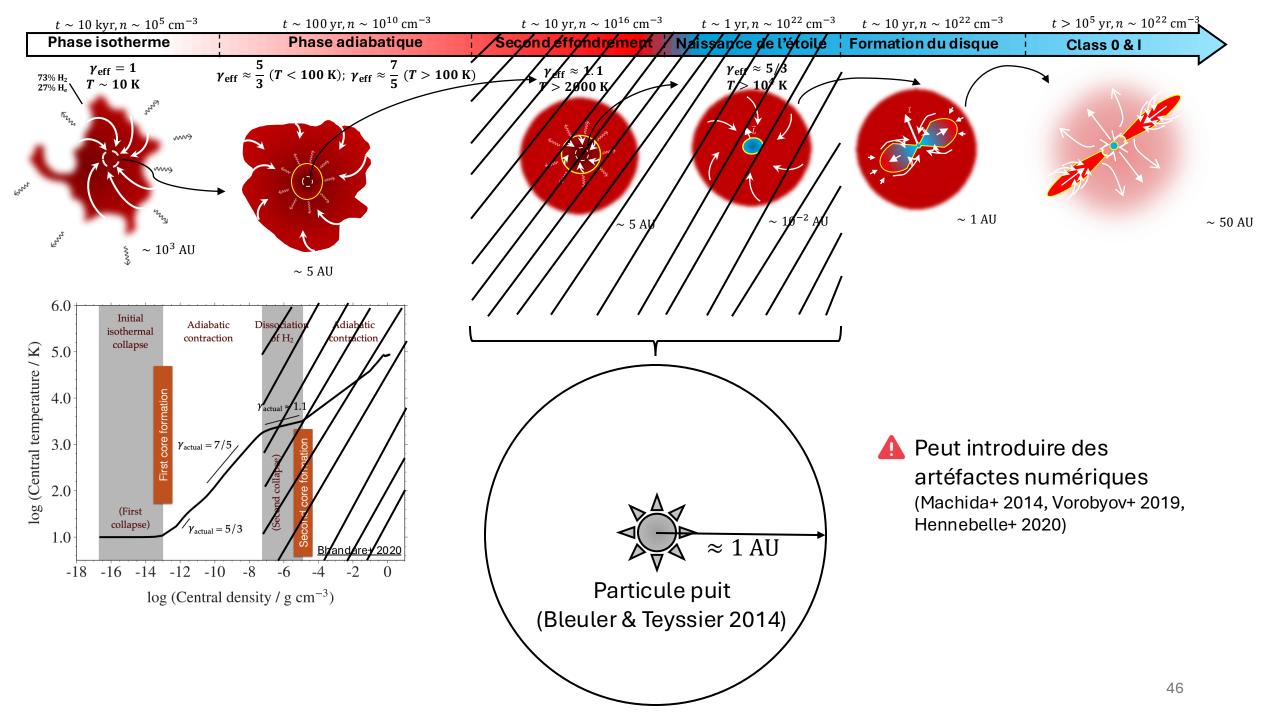
Ejection de matière par les jets

La poussière peut être trainée par les jets

Bhandare+ 2024 Simulation RHD 2D







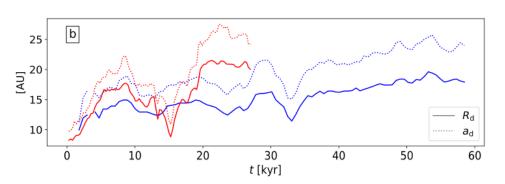
t = 0.000 kyr

Naissance des disques dans les modèles 3D

Dynamique d'**accrétion complexe** durant la phase Class 0

L'accrétion verticale genère de la turbulence au sein du disque (Lesur+ 2015, Hennebelle+ 2016b, 2017, Kuznetsova+ 2022, Ahmad+ 2025c in-prep)

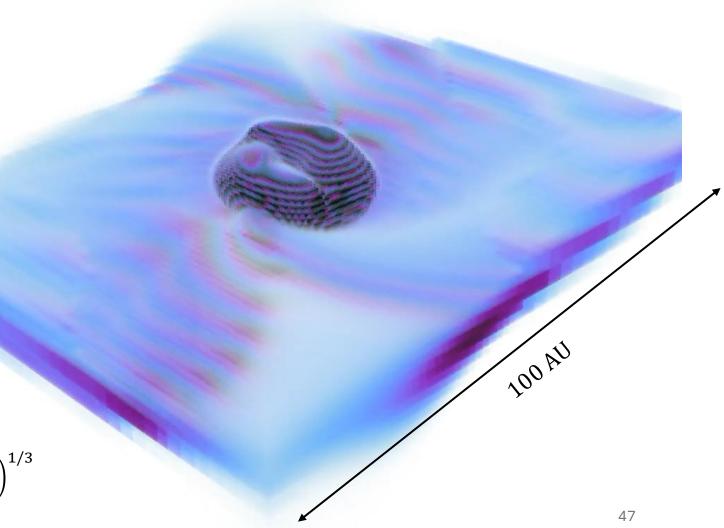
> Ceci peut **maintenir l'étalement radiale** du disque via **transport du moment cinétique**



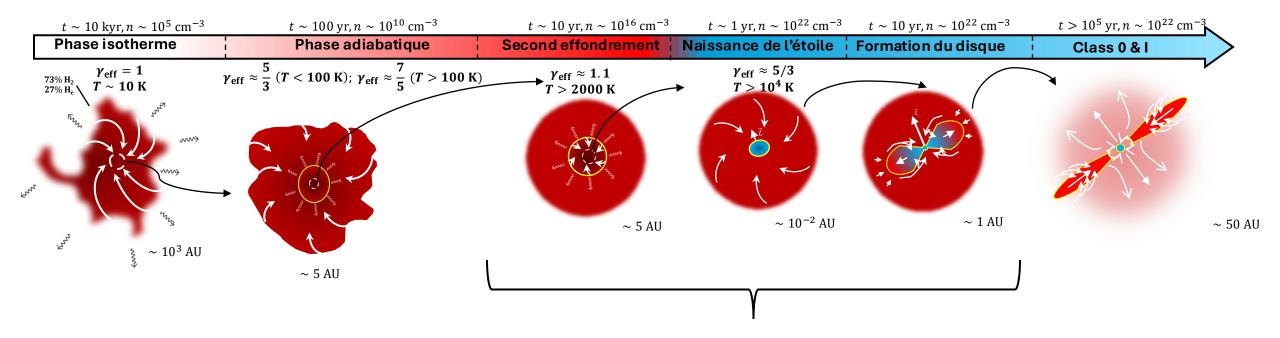
Rayon du disque **régulé** par le **champ magnétique**

Hennebelle + 2016:
$$R_d \approx 18 \text{ AU } \left(\frac{\eta_{\rm AD}}{0.1 \text{ s}}\right)^{\frac{2}{9}} \left(\frac{B_Z}{0.1 \text{ G}}\right)^{-4/9} \left(\frac{M_d + M_*}{0.1 \text{ M}_{\odot}}\right)^{1/3}$$

Ahmad+ 2025c (in-prep) Simulation de B. Commerçon (CRAL – ENS Lyon)



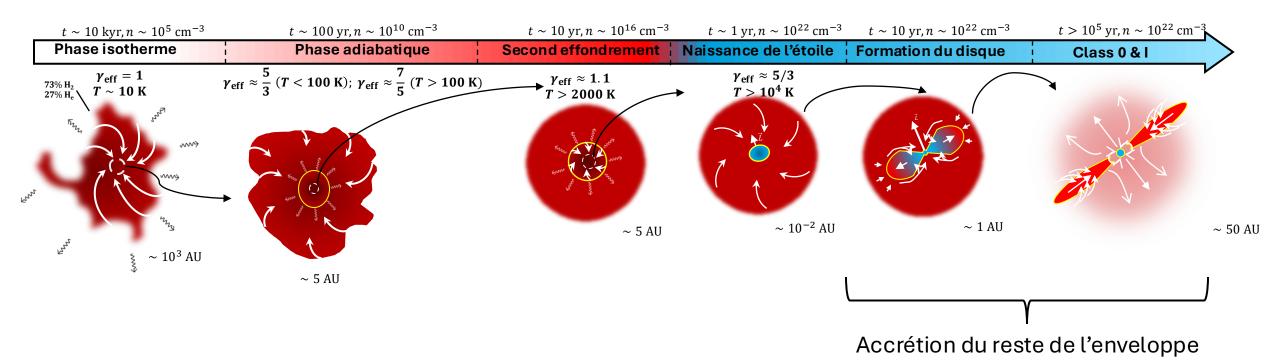
Conclusion



Effondrement du premier coeur et naissance du disque autour de la protoétoile

- Transport très efficace des CAIs par étalement radiale
- Accrétion proche de l'étoile
- Jet lancé par propulsion magnétique/thermique à proximité de la protoétoile

Conclusion



- Transport très efficace des CAIs par étalement radiale
- Accrétion proche de l'étoile
- Jet lancé par propulsion magnétique/thermique à proximité de la protoétoile

- L'accrétion verticale mantient l'étalement du disque grâce à la turbulence qu'elle génère
- Le champ magnétique régule la taille du disque par freinage magnétique