

Des nuages moléculaires aux étoiles :

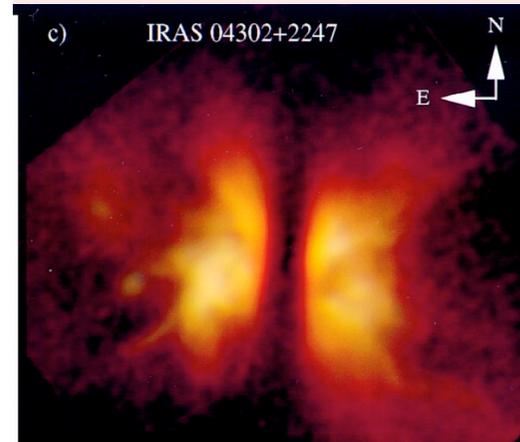
III - Formation du disque et fragmentation en systèmes multiples



Infant Solar System in Ophiuchus
(VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 12c/02 (7 May 2002)

Grosso et al. (2002) © European Southern Observatory

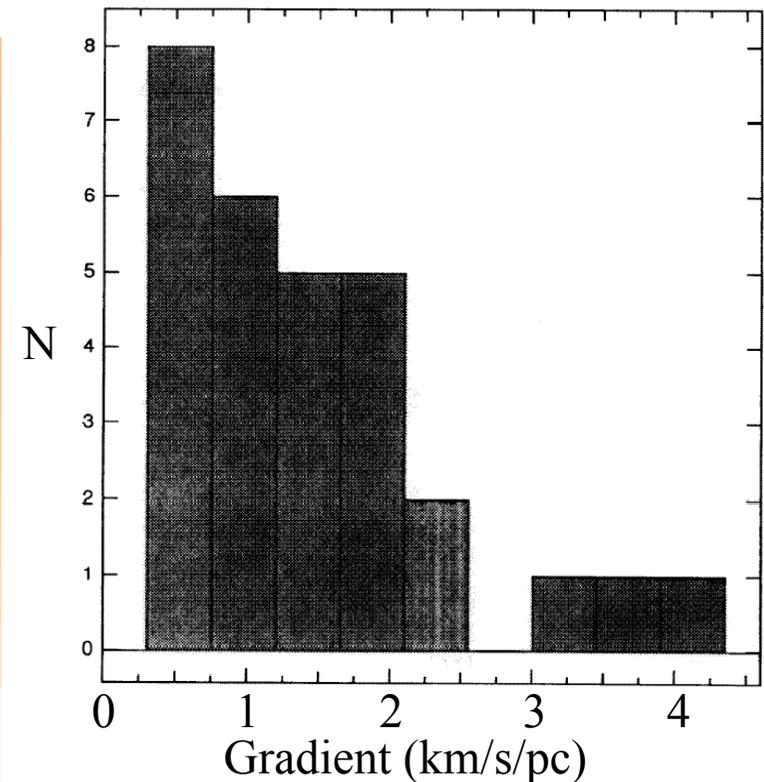
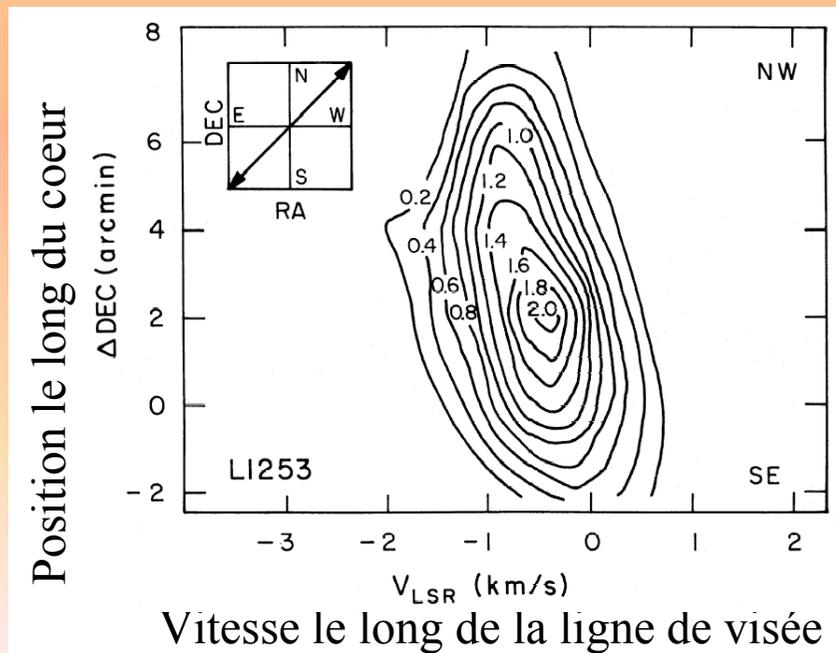


Plan de la partie observationnelle :

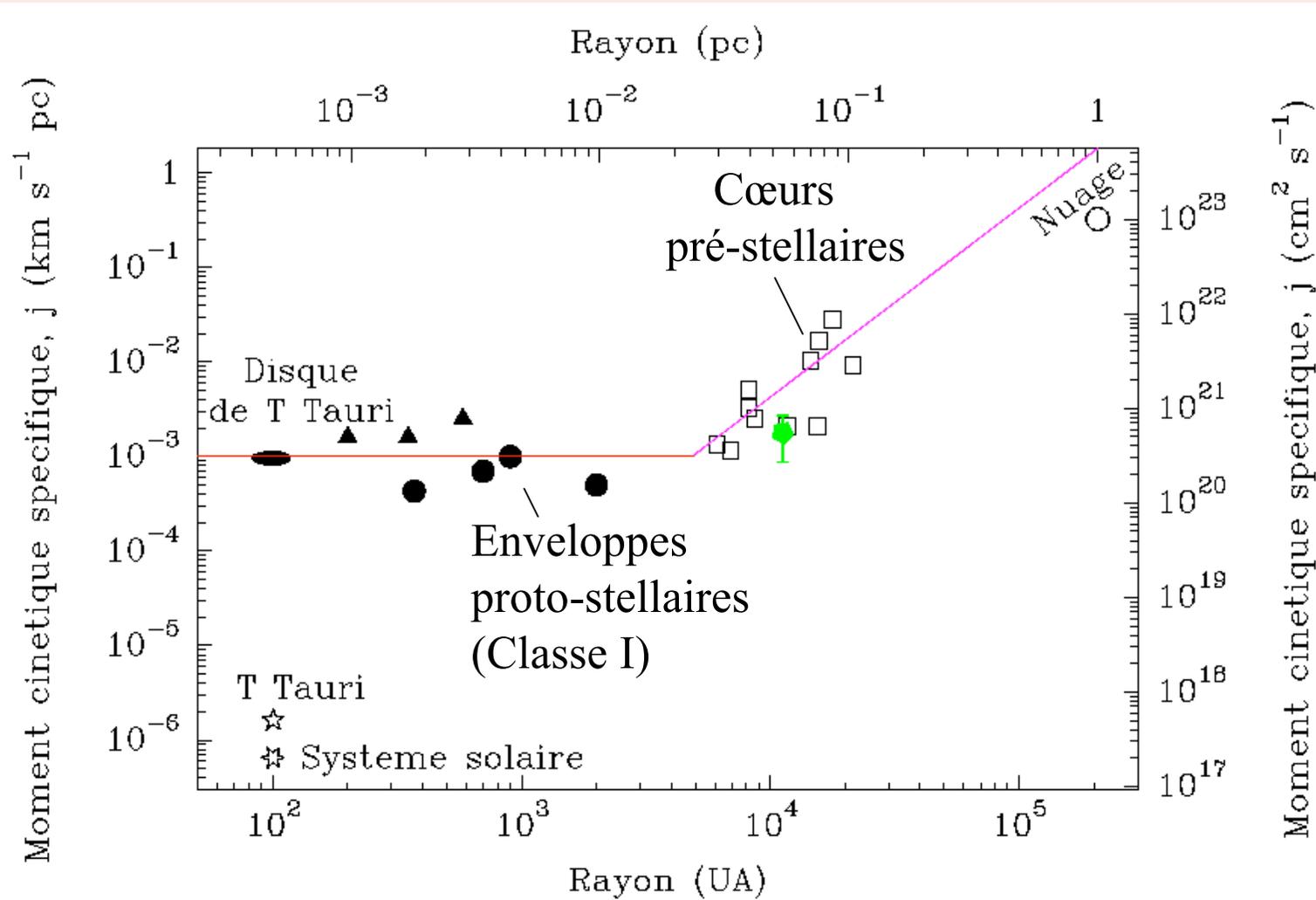
- Rotation des cœurs pré-stellaires
- Conséquences de l'«excès» de moment cinétique
- Toroides, disques et multiplicité des proto-étoiles de Classe 0
- Perspectives : Apports d'ALMA

Rotation des cœurs denses pré-stellaires

- Mesures de gradients de vitesse dans les coeurs « isolés » en ^{13}CO , C^{18}O , NH_3 , N_2H^+ (Arquilla & Goldsmith 1986, Goodman et al. 1993, Kane & Clemens 1997, Caselli et al. 2002)
- $\Omega_{\text{rot}} \sim 0.3 - 4 \text{ km/s/pc} \sim 10^{-14} - 10^{-13} \text{ rad/s} \rightarrow$ dynamiquement négligeable ($\Omega = E_{\text{rot}}/E_{\text{grav}} \sim 0.02$)
- Moment cinétique spécifique : $J/M \sim 10^{21} - 10^{22} \text{ cm}^2/\text{s} \gg$ système solaire ($2 \times 10^{17} \text{ cm}^2/\text{s}$)



Evolution du moment cinétique au cours du processus de formation stellaire



d'après Ohashi et al. 1997

Conséquences de l' 'excès' de moment cinétique initial

1) Formation d'un disque centrifuge (et d'un jet) pendant la phase proto-stellaire :

➤ Le moment cinétique du cœur pré-stellaire initial (au début de l'effondrement dynamique) contrôle la taille du disque centrifuge

➤ Taille maximum : $R_d \sim \square_{\text{rot}}^{\text{init}} \times R_{\text{init}} \sim 0.02 \times 10000 \text{ UA} = 200 \text{ UA}$

$$E_{\text{rot}} \sim J^2/(MR^2) \quad ; \quad E_{\text{grav}} \sim GM^2/R \quad \Rightarrow \quad \square_{\text{rot}} = E_{\text{rot}}/E_{\text{grav}} \sim 1/R$$

Initialement $\square_{\text{rot}} \sim 0.02$;

La rotation stoppe l'effondrement lorsque $\square_{\text{rot}} \sim 1$

Conséquences de l' 'excès' de moment cinétique initial

1) Formation d'un disque centrifuge pendant la phase proto-stellaire :

➤ La distribution de moment cinétique dans le cœur pré-stellaire initial [$j(r_{\text{init}})$ ou $j(m)$] contrôle la croissance du disque centrifuge :

A chaque instant t , $R_{\text{centrifuge}} \sim j^2(m)/(Gm)$ où $m = m(t)$ est la masse «effondrée» à t

➤ $R_{\text{centrifuge}}$ croît différemment suivant les modèles d'effondrement

➤ Modèle de Terebey, Shu, Cassen (1984) :

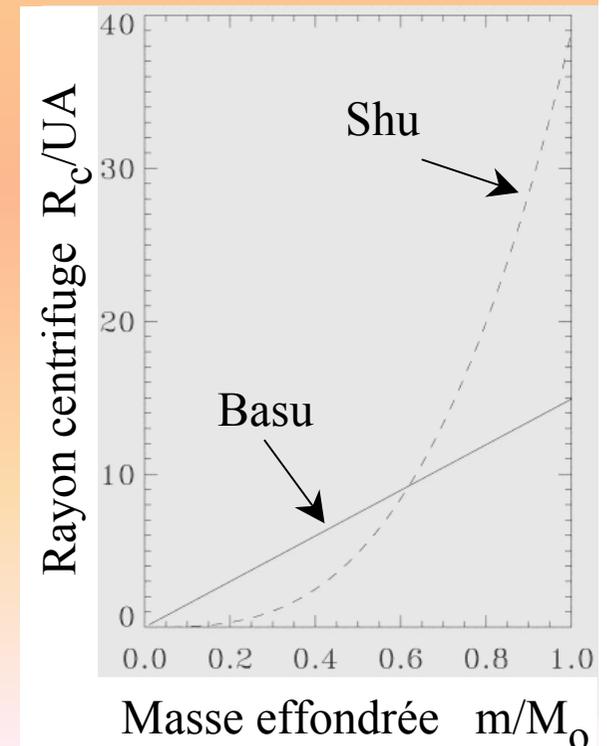
Sphère singulière isotherme en rotation solide à $t=0$

$$m(r_{\text{init}}) \sim r_{\text{init}} ; j(r_{\text{init}}) = \Omega_{\text{init}} r_{\text{init}}^2 \Rightarrow j(m) \sim \Omega_{\text{init}} m^2$$

$$R_{\text{cent}} = 39 \text{ UA} (\Omega / 10^{14} \text{ rad/s})^2 (a/0.2 \text{ km/s})^{-8} (m/1M_{\odot})^3$$

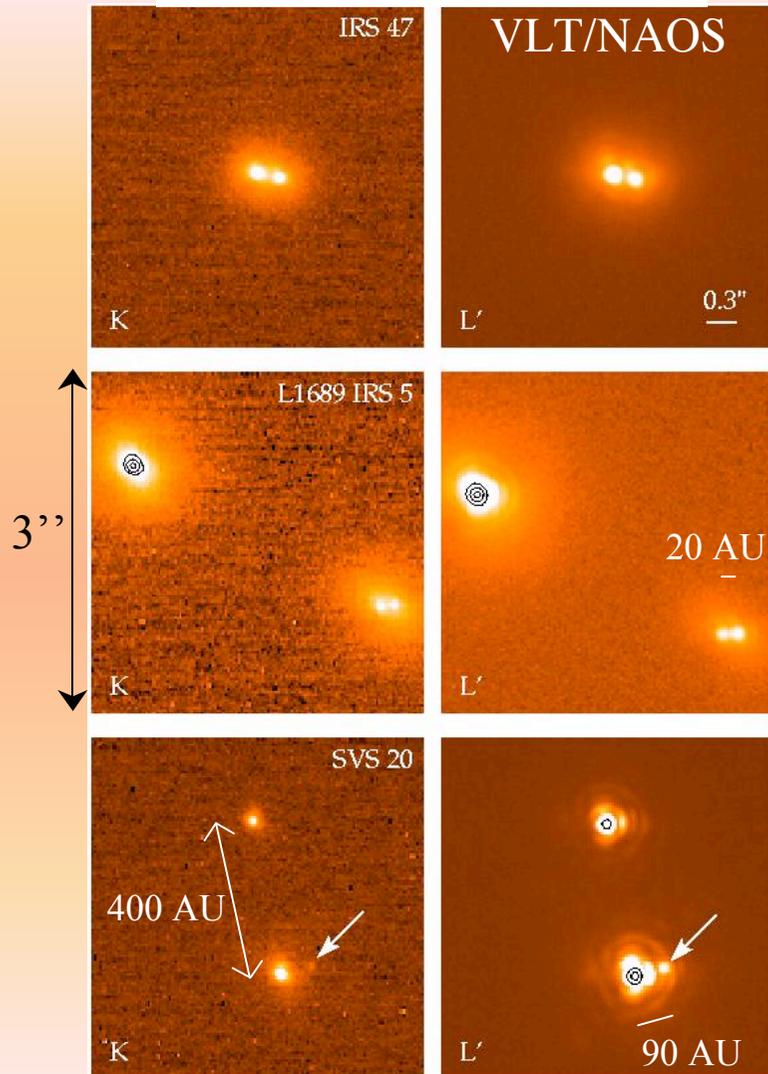
➤ Modèle de Basu (1998) : cœur dense magnétisé en rotation différentielle ($\Omega \propto 1/r$) à $t=0 \Rightarrow j(m) \sim m$

$$R_{\text{cent}} = 15 \text{ UA} (\Omega_b/10^{14} \text{ rad/s})^2 (B/30 \text{ G})^{-2} (m/1M_{\odot})$$



Conséquences de l' 'excès' de moment cinétique initial

Multiple embedded YSOs
in \square Oph & Serpens

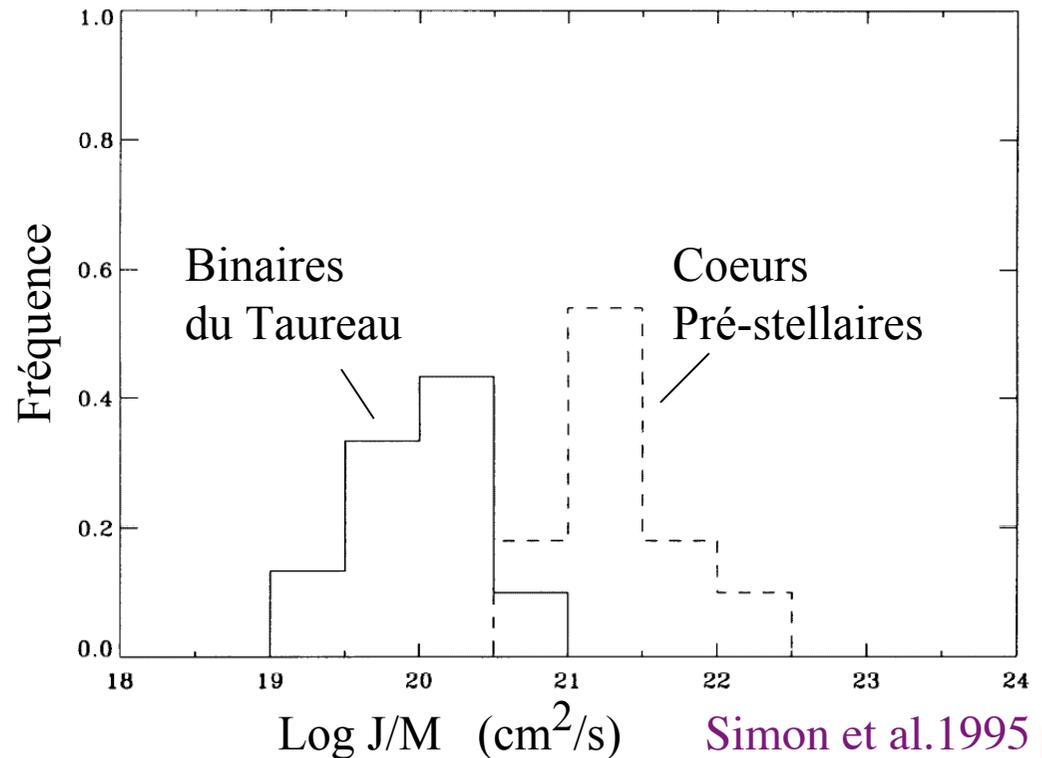


Duchêne et al. 2003

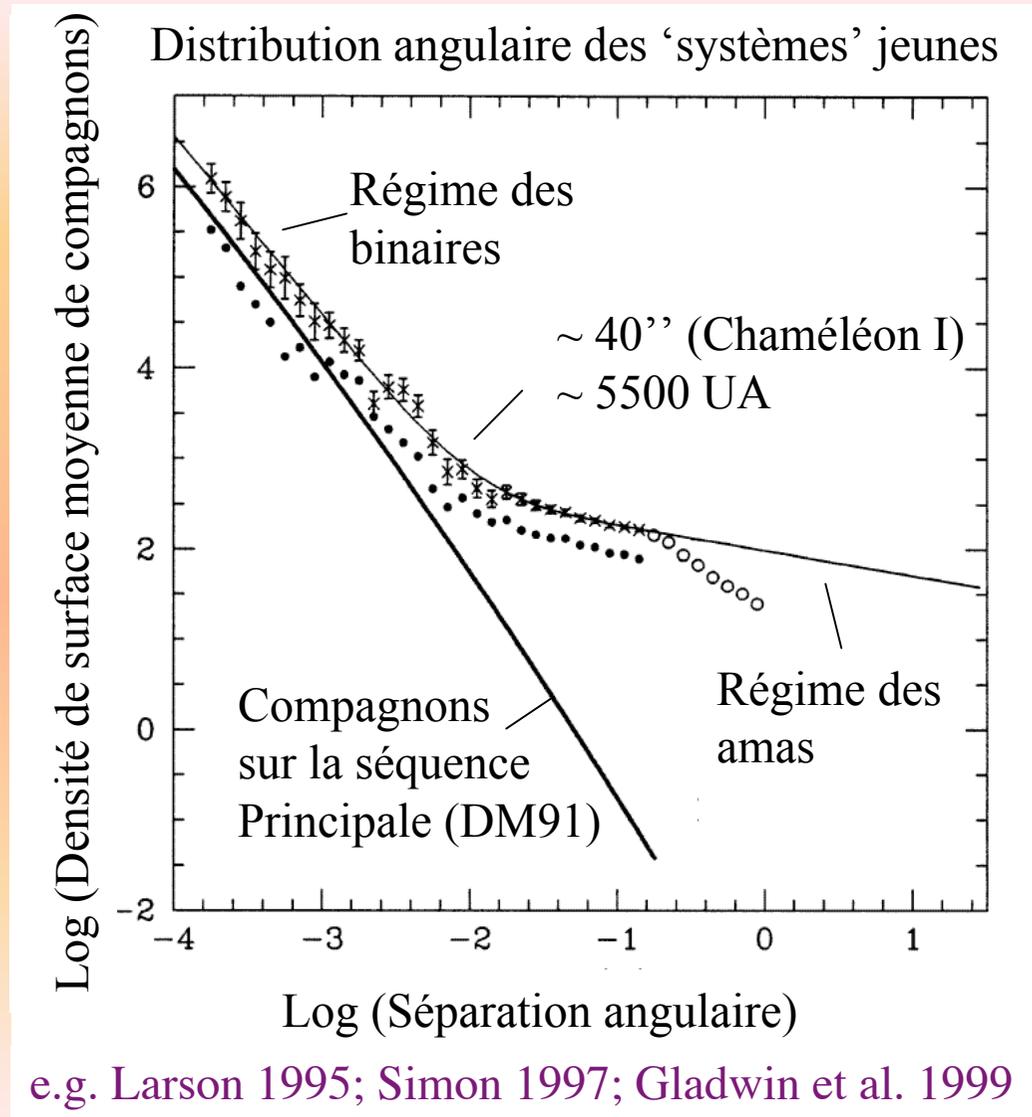
2) Formation de systèmes binaires :

La majorité (50-100%) des étoiles naissent multiples (e.g. Duquennoy & Mayor 1991, Patience & Duchêne 2001)

Résoud en grande partie le problème du moment cinétique (e.g. Larson 2002)



Différence de nature entre la fragmentation en binaires et la fragmentation des nuages en condensations pré-stellaires



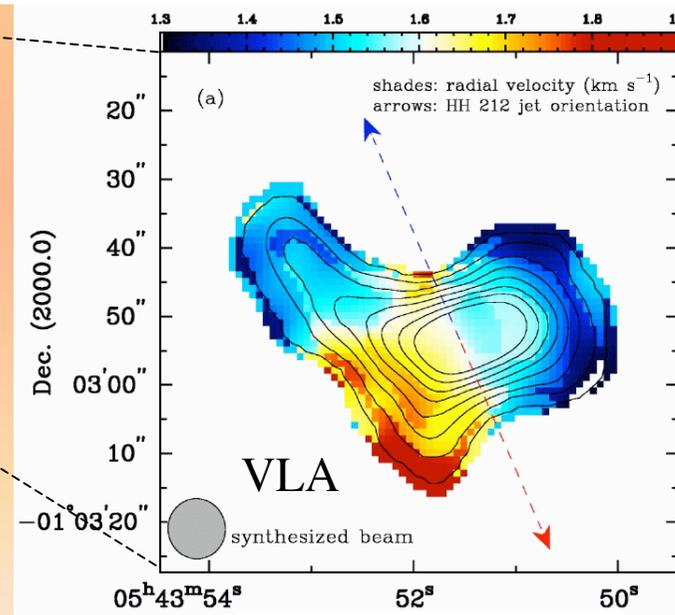
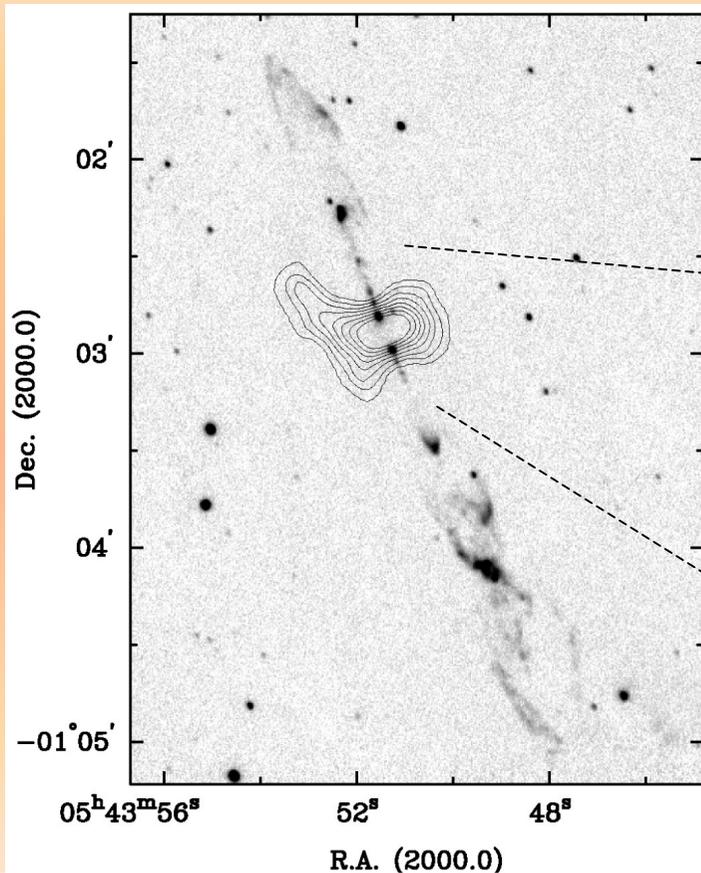
Toroides ou 'pseudo-disques' autour des objets de Classe 0 :

Enveloppes aplaties perpendiculairement à l'axe du jet/flot

Aplatissement dû à la rotation (e.g. Matsumoto et al. 1997) ou au champ magnétique (e.g. Allen, Li, & Shu 2003) ?

Exemple de HH-212MM (Orion B) :

- Toroïde vu en $\text{NH}_3(1,1)$; $M \sim 1.2 M_{\odot}$
 $R \sim 7500 \text{ UA}$
- Jet symétrique vu en H_2 à $2 \mu\text{m}$



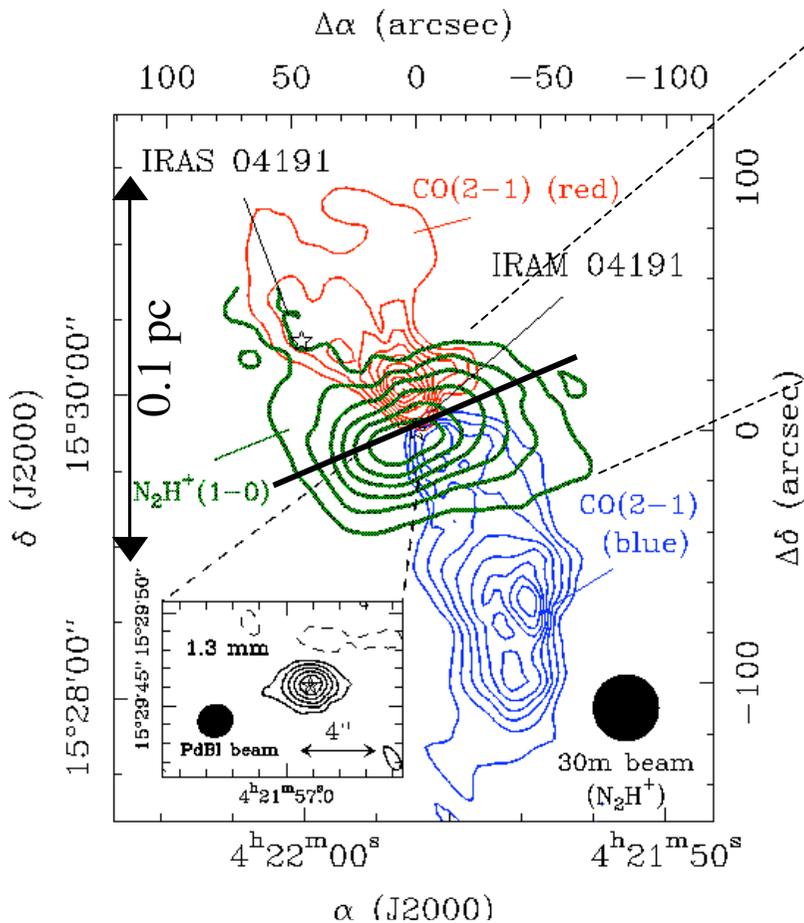
Wiseman, Wootten, Zinnecker, McCaughrean 2000

$\Delta_{\text{rot}} \sim 5 \text{ km/s/pc}$
 $\Delta_{\text{rot}} \sim 0.03-0.1$

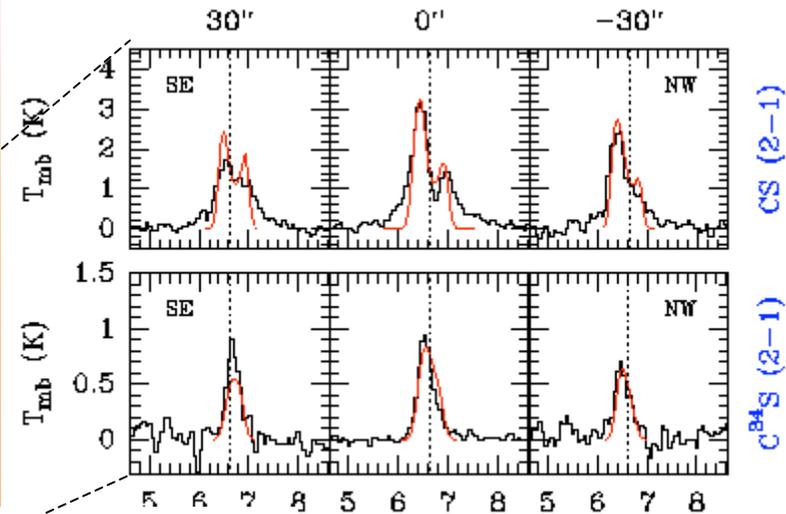
Formation du disque : Exemple de la proto-étoile IRAM04191 (Taureau)

- Toroïde (N_2H^+) $M \sim 1.5 M_\odot$; $R \sim 11000$ UA
- Flot bipolaire (CO)
- Absence de disque centrifuge ?
 $R_d < 10$ UA ; $M_d < 10^{-3} M_\odot$

Toroïde en effondrement

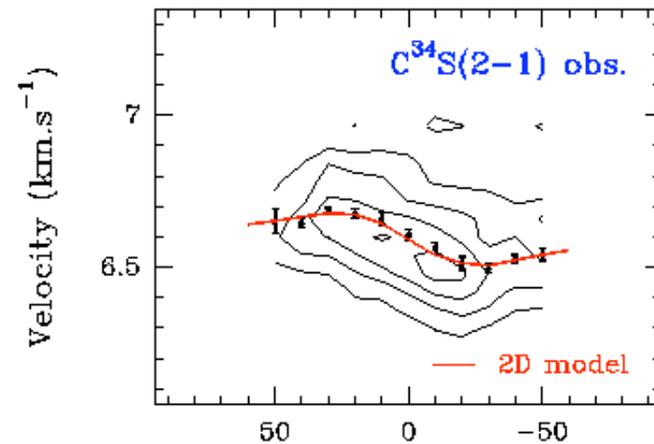


Belloche, André, Despois, Blinder (2002)



$V_{inf} \sim 0.15$ km/s Velocity ($km.s^{-1}$)

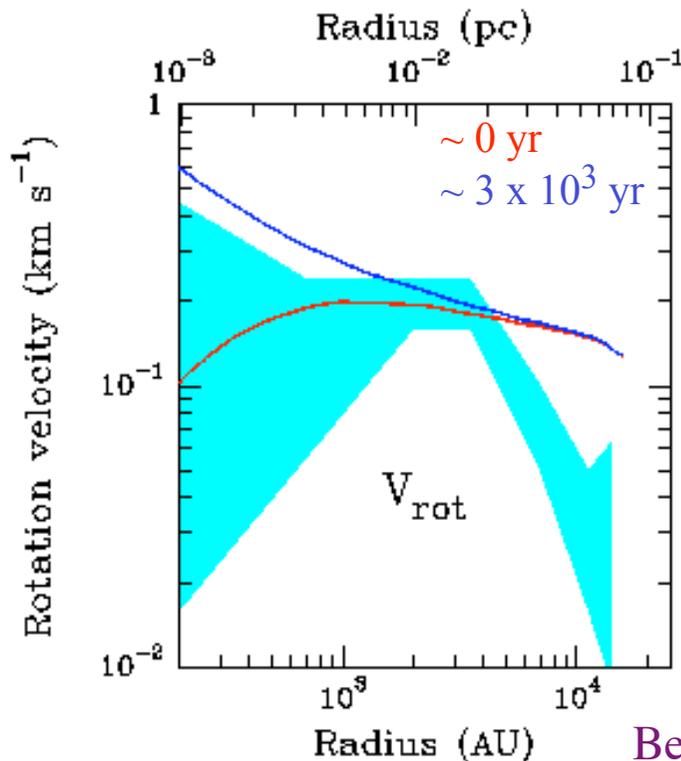
et en rotation différentielle



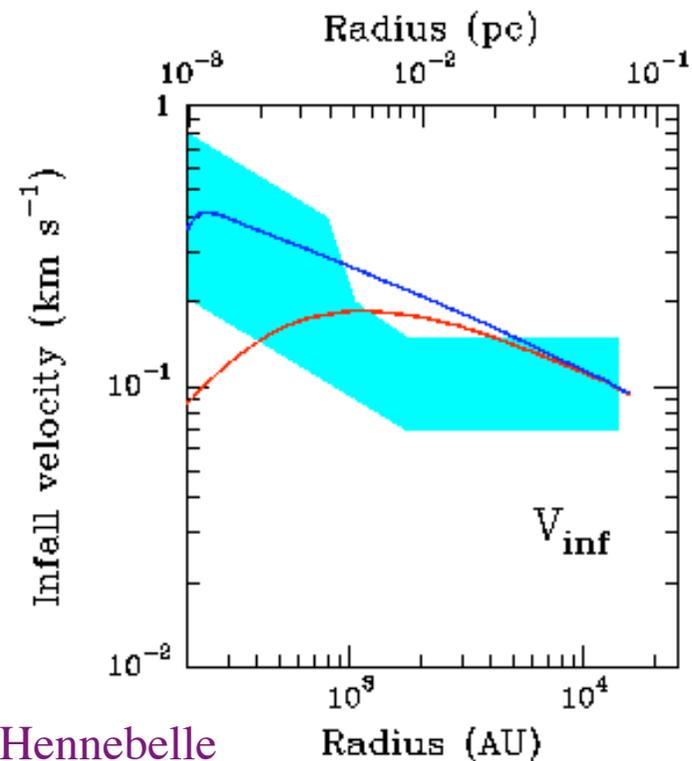
$\Omega_{rot} \sim 12$ km/s/pc $\Omega_{rot} \sim 0.1$

Structure en vitesse de l'enveloppe protostellaire d'IRAM04191

- Infall velocity: \sim uniform and subsonic between 3000 and 11000 AU; rising ($r^{-0.5}$) inside 3000 AU.
 - Rotation velocity: \sim flat inside 3500 AU; steeply declining ($r^{-1.5}$) beyond 3500 AU.
- Suggests loss of angular momentum at $r > 3500$ AU



Belloche & Hennebelle

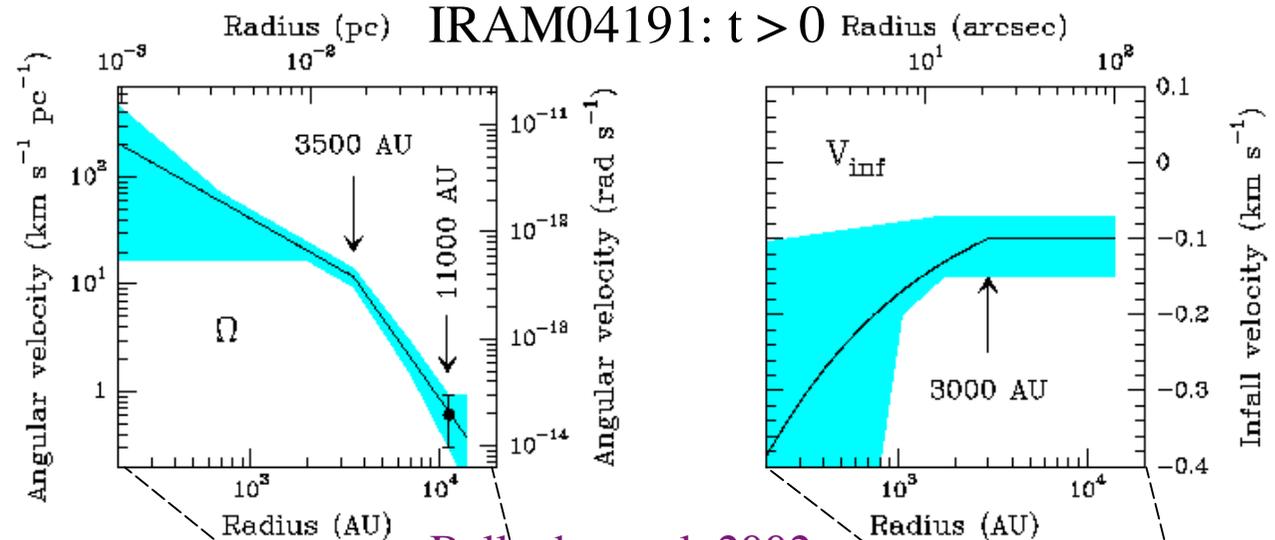


Comparaison avec les modèles de diffusion ambipolaire

→ La perte de moment cinétique à $r > 3500$ AU peut s'expliquer par freinage magnétique

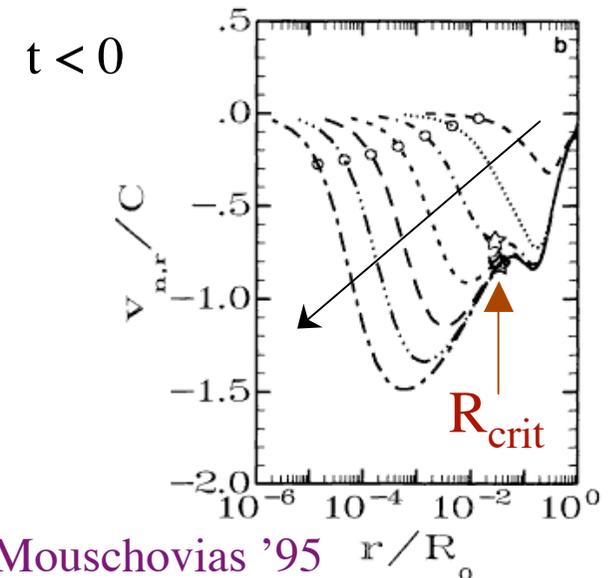
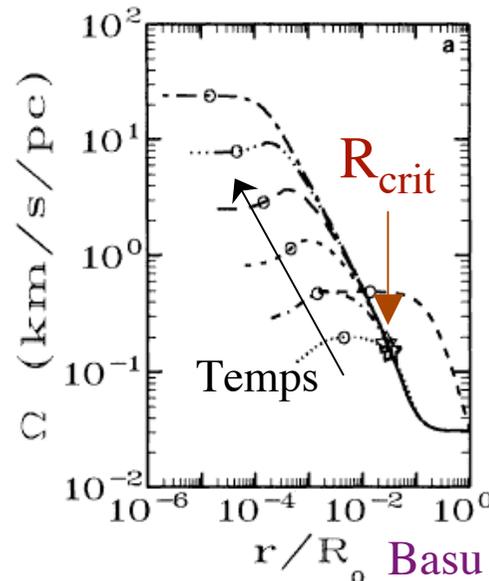
- Cœur interne «super-critique» se découplant d'une enveloppe externe ralentie par le champ B ambiant

- Condition : Champ B $\sim 60 \mu\text{G}$ à $n \sim 1-2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$
OK ? (cf. Crutcher et al. 2003)



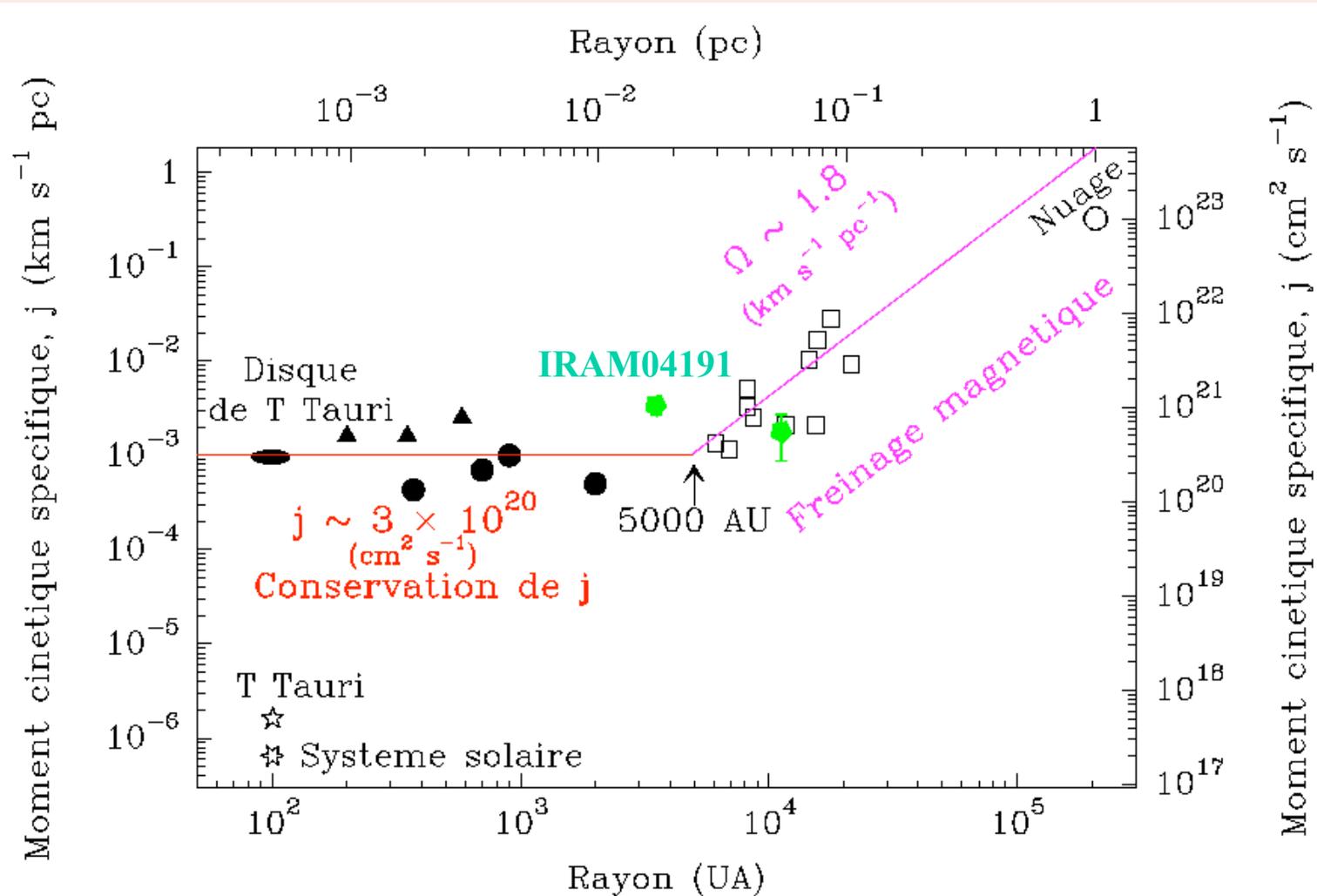
Belloche et al. 2002

Modèles avec freinage magnétique



Basu & Mouschovias '95

Evolution du moment cinétique au cours du processus de formation stellaire



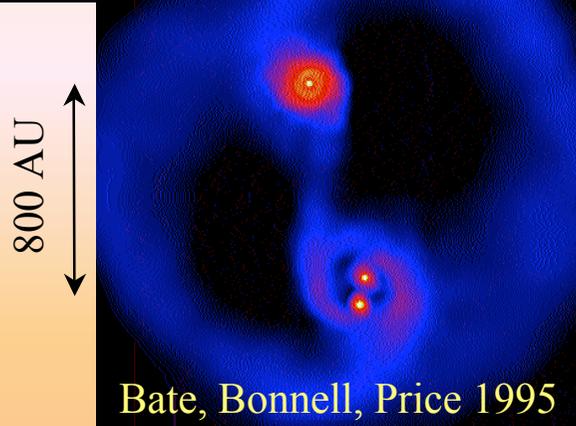
Ohashi et al. (1997) - Belloche et al. (2002)

En résumé, d'après les observations actuelles :

- Présence d'enveloppes aplaties massives en rotation et effondrement rapide autour des proto-étoiles de Classe 0
- $M_{\text{disk}} \lesssim 0.01-0.1 M_{\odot}$ au stade Classe 0/Classe I comme au stade T Tauri (Classe II)
- Pas ou très peu de disques centrifuges massifs (auto-gravitants)
- $M_{\text{disk}}/M_{\text{env}}$ et R_{disk} ont tendance à croître avec le temps

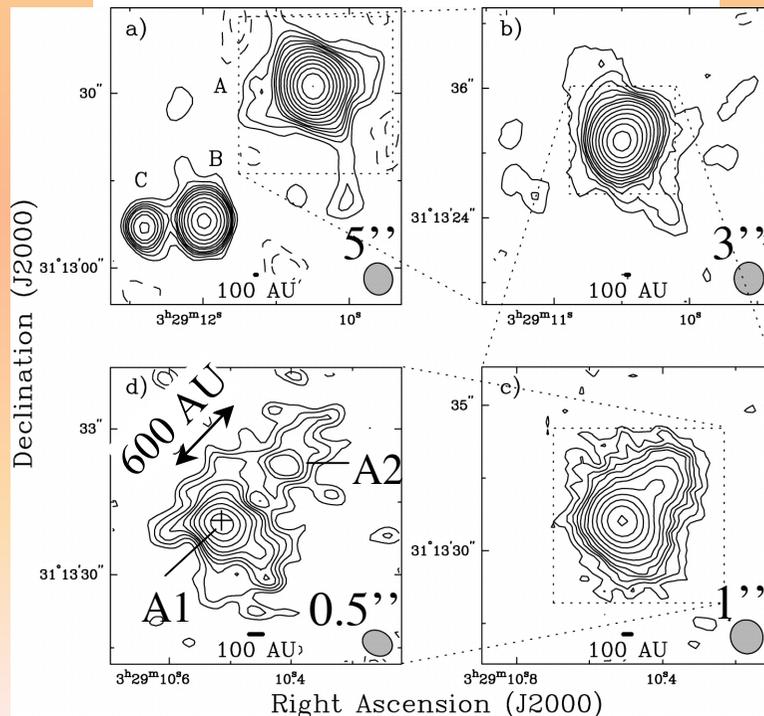
Perspectives avec ALMA

Simulations de fragmentation pendant l'effondrement



→ Etudes dans le (sub)mm pendant la phase d'effondrement (Classe 0) pour comprendre le processus de fragmentation et l'importance des effets dynamiques (e.g. éjections)

NGC1333 IRAS4 - BIMA - 2.7 mm



Looney, Mundy, Welch (2000)

- Aujourd'hui : seuls les systèmes proches les plus massifs/étendus sont accessibles
 - Avec ALMA : échantillons complets de centaines de proto-étoiles; mesures des mouvements propres/orbitaux (1km/s \Leftrightarrow 1.5 mas/an @ 140 pc)
- Fréquence et propriétés des systèmes entre ~ 3 UA et ~ 10000 UA