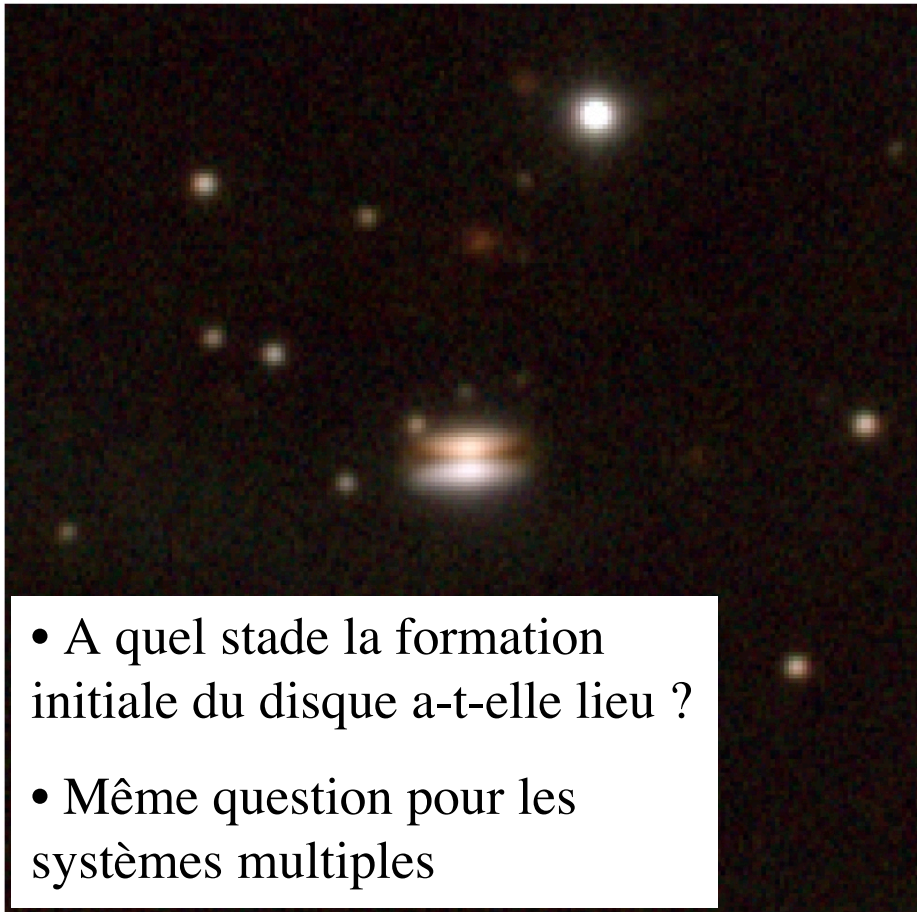


# Des nuages moléculaires aux étoiles :

## III - Formation du disque et fragmentation en systèmes multiples

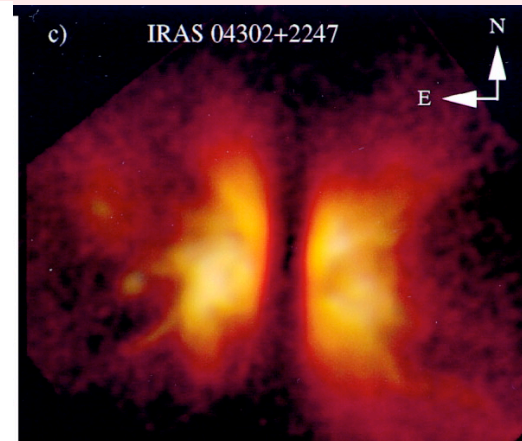


- A quel stade la formation initiale du disque a-t-elle lieu ?
- Même question pour les systèmes multiples

Infant Solar System in Ophiuchus  
(VLT ANTU + ISAAC)

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

Grosso et al. (2002) © European Southern Observatory

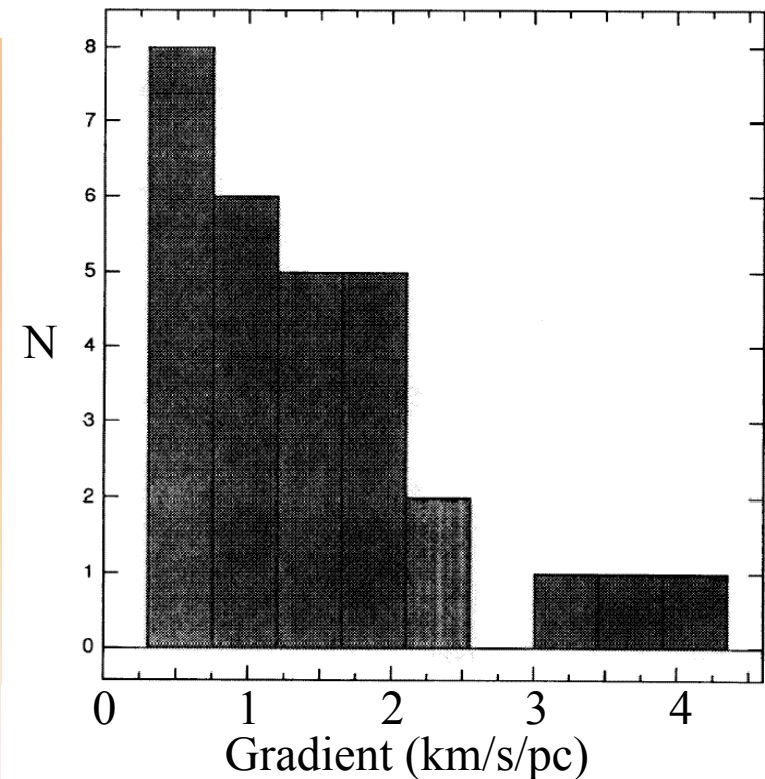
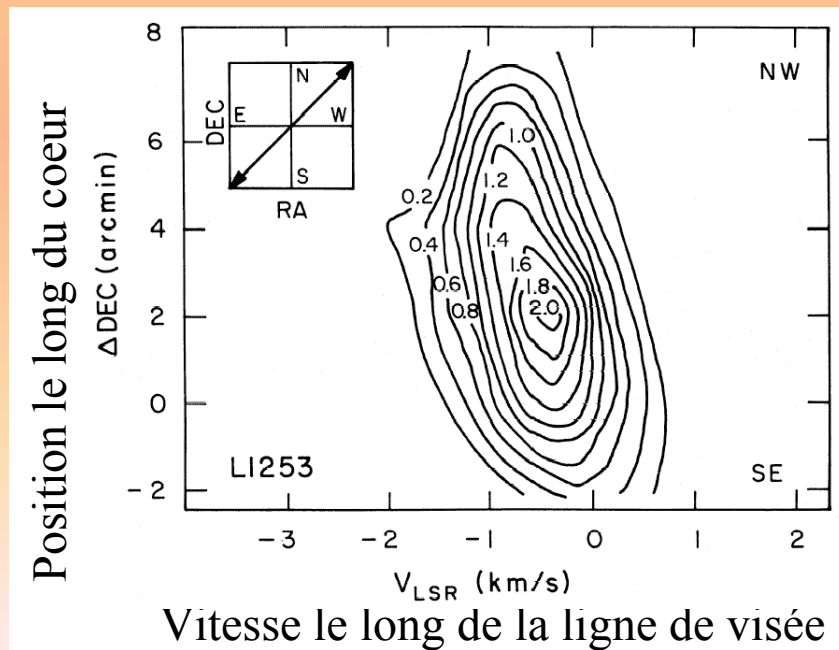


### Plan de la partie observationnelle :

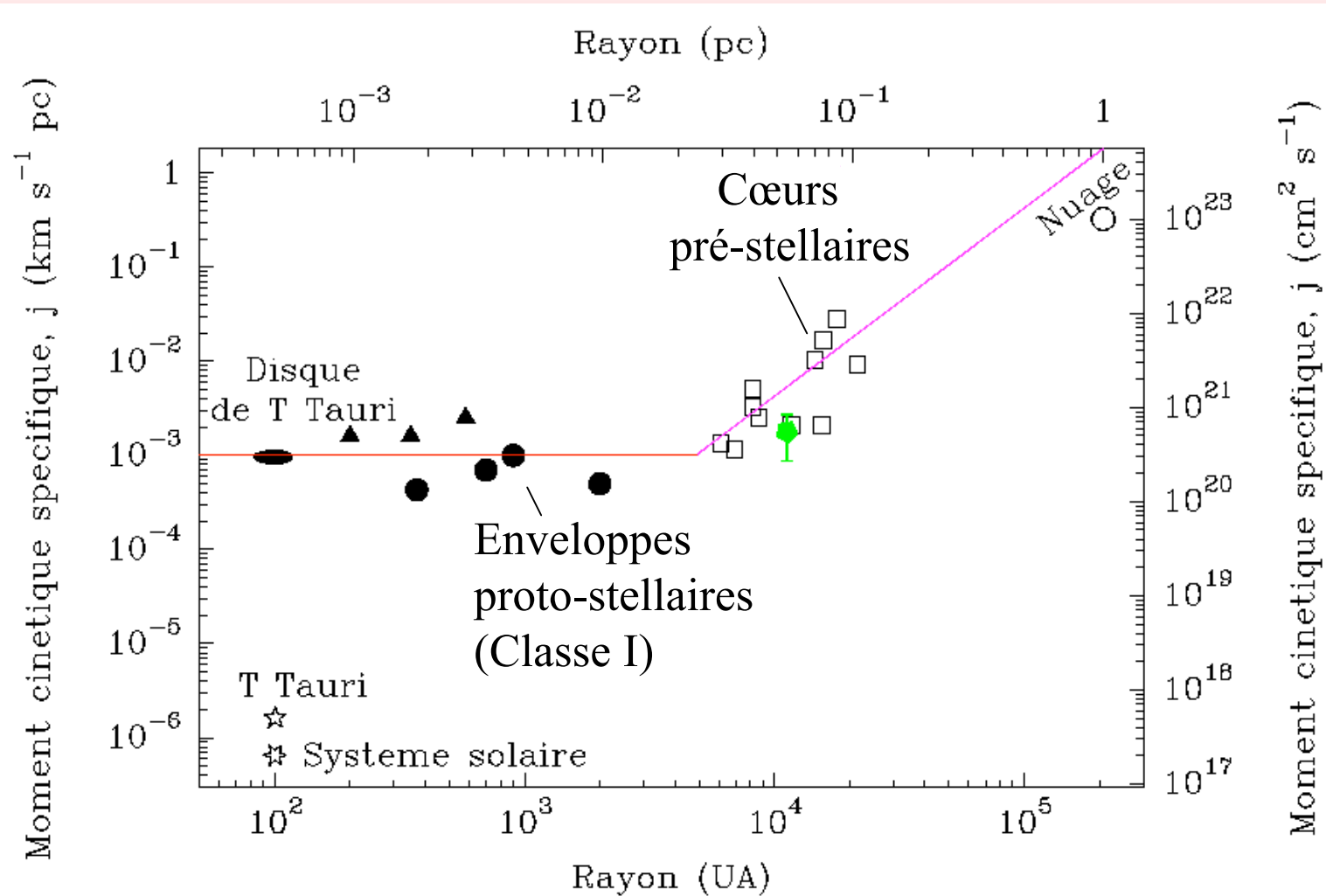
- Rotation des cœurs pré-stellaires
- Conséquences de l'«excès» de moment cinétique
- Toroides, disques et multiplicité des proto-étoiles de Classe 0
- Perspectives : Apports d'ALMA

# Rotation des cœurs denses pré-stellaires

- Mesures de gradients de vitesse dans les coeurs « isolés » en  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$  (Arquilla & Goldsmith 1986, Goodman et al. 1993, Kane & Clemens 1997, Caselli et al. 2002)
- $\square_{\text{rot}} \sim 0.3 - 4 \text{ km/s/pc} \sim 10^{-14} - 10^{-13} \text{ rad/s} \rightarrow$  dynamiquement négligeable ( $\square = E_{\text{rot}}/E_{\text{grav}} \sim 0.02$ )
- 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) :

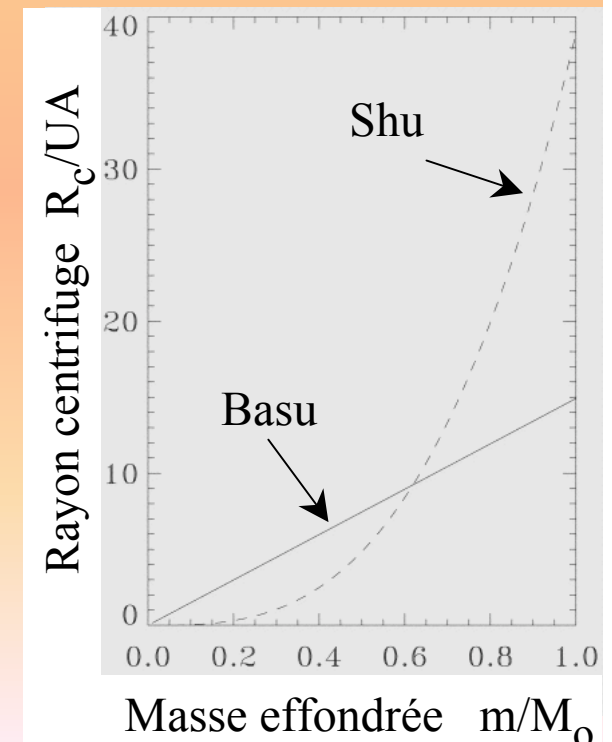
Sphère singulière isotherme en rotation solide à  $t=0$

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

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

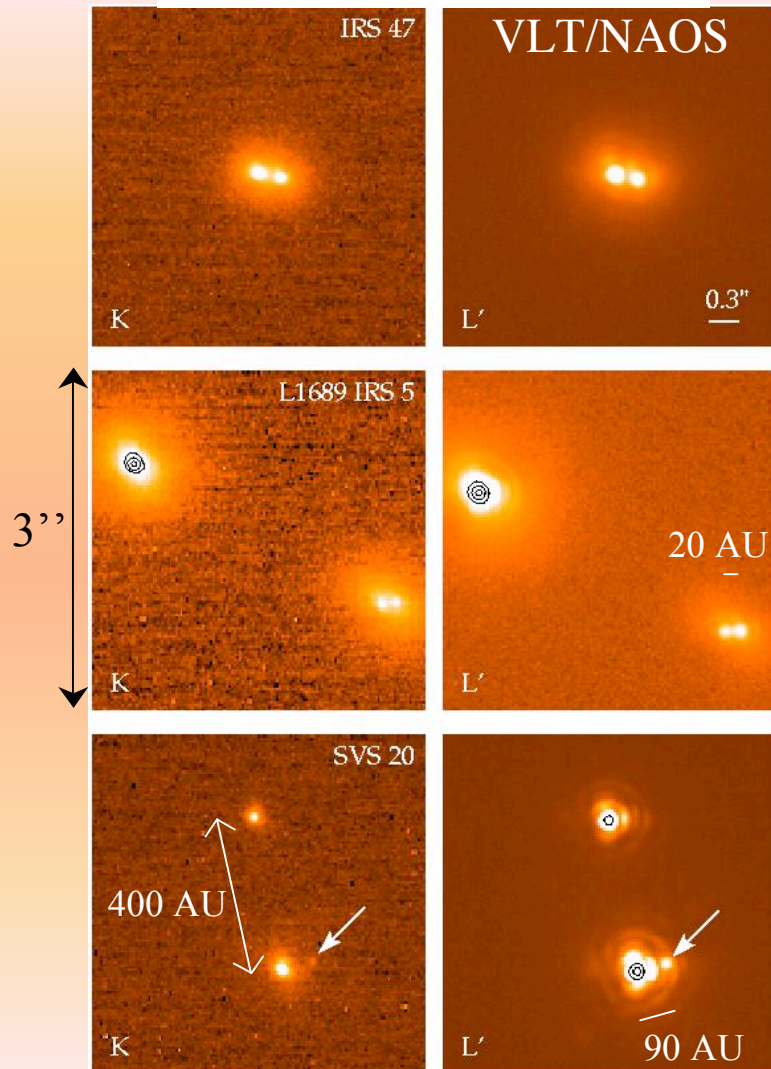
➤ Modèle de Basu (1998) : cœur dense magnétisé en rotation différentielle ( $\Omega \propto 1/r$ ) à  $t=0 \Rightarrow j(m) \sim m$

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



# Conséquences de l' 'excès' de moment cinétique initial

Multiple embedded YSOs  
in  $\square$  Oph & Serpens

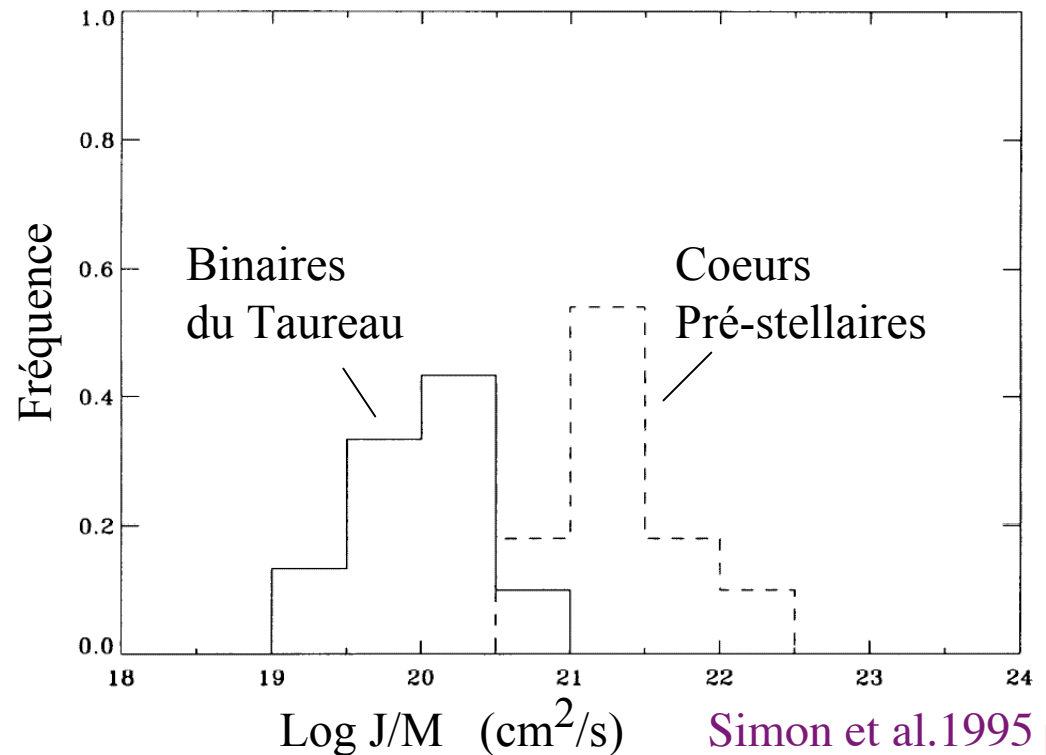


Duchêne et al. 2003

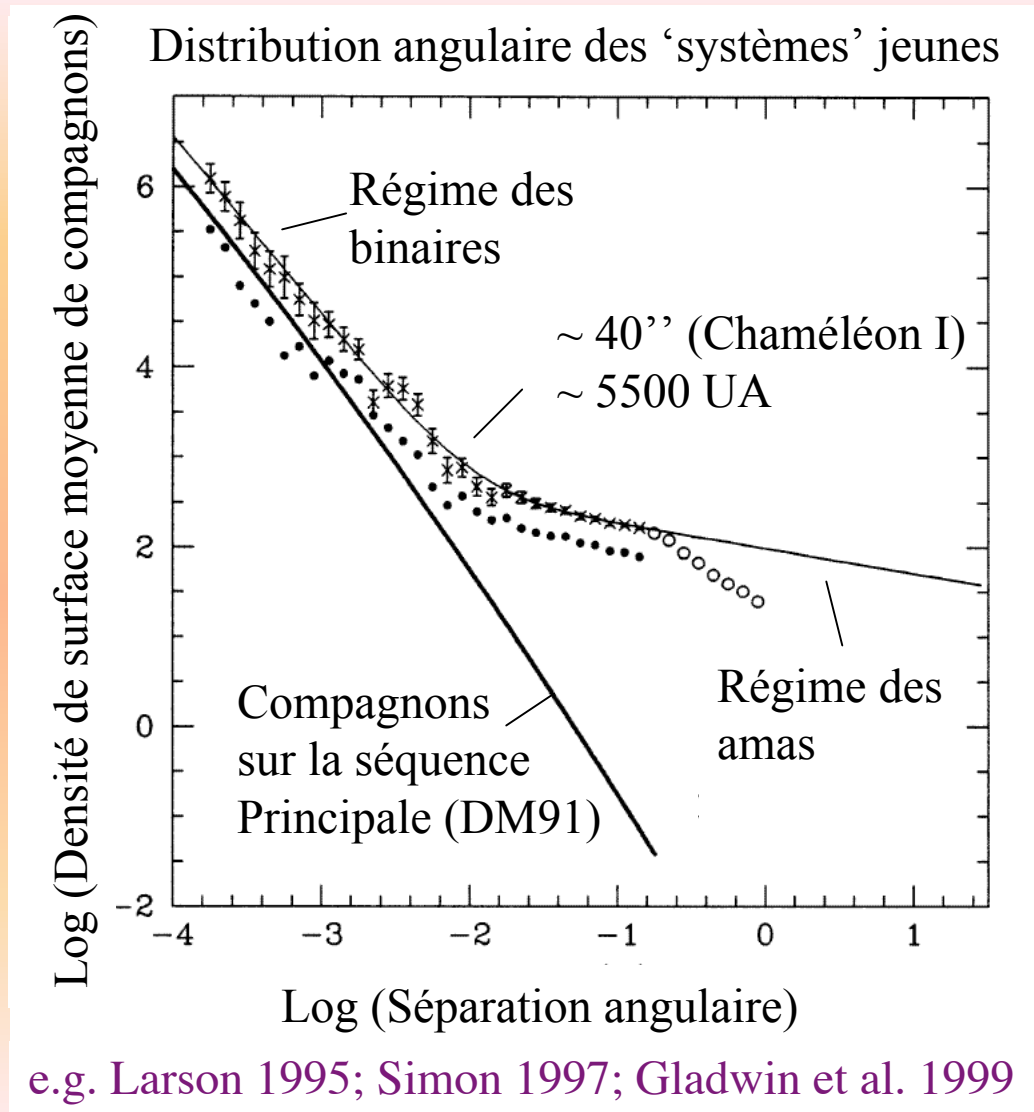
## 2) Formation de systèmes binaires :

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



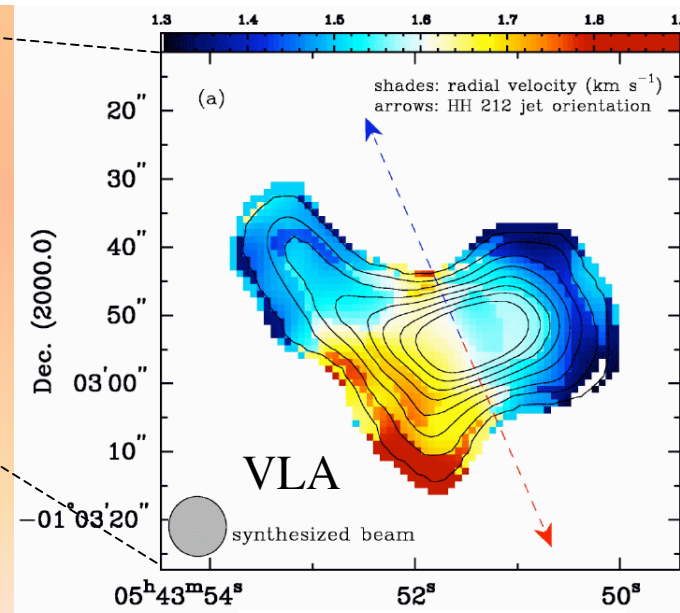
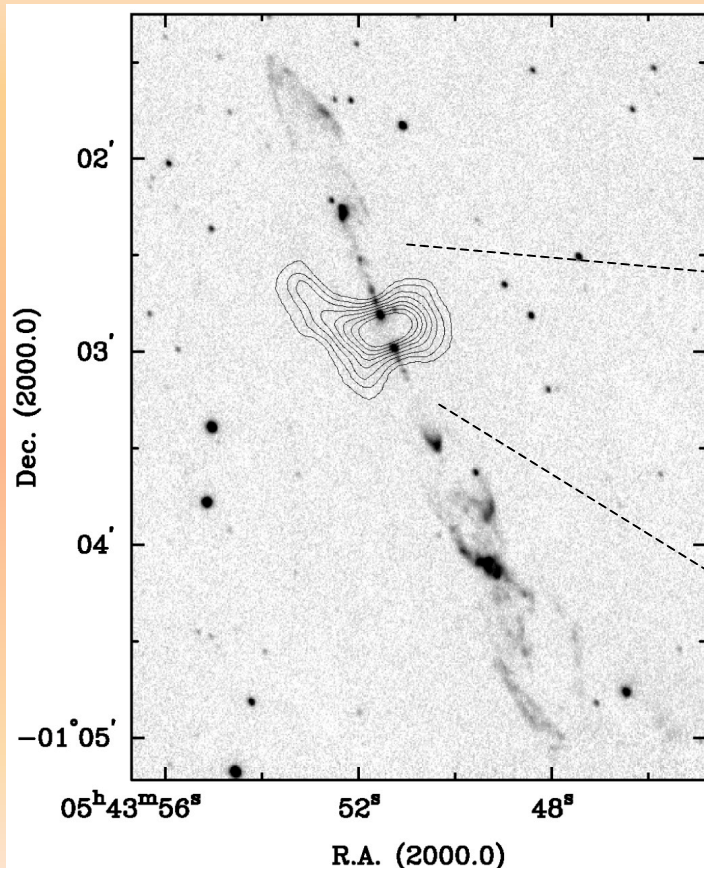
# Toroides ou 'pseudo-disques' autour des objets de Classe 0 :

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  $\text{H}_2$  à  $2 \mu\text{m}$



Wiseman, Wootten, Zinnecker, McCaughrean 2000

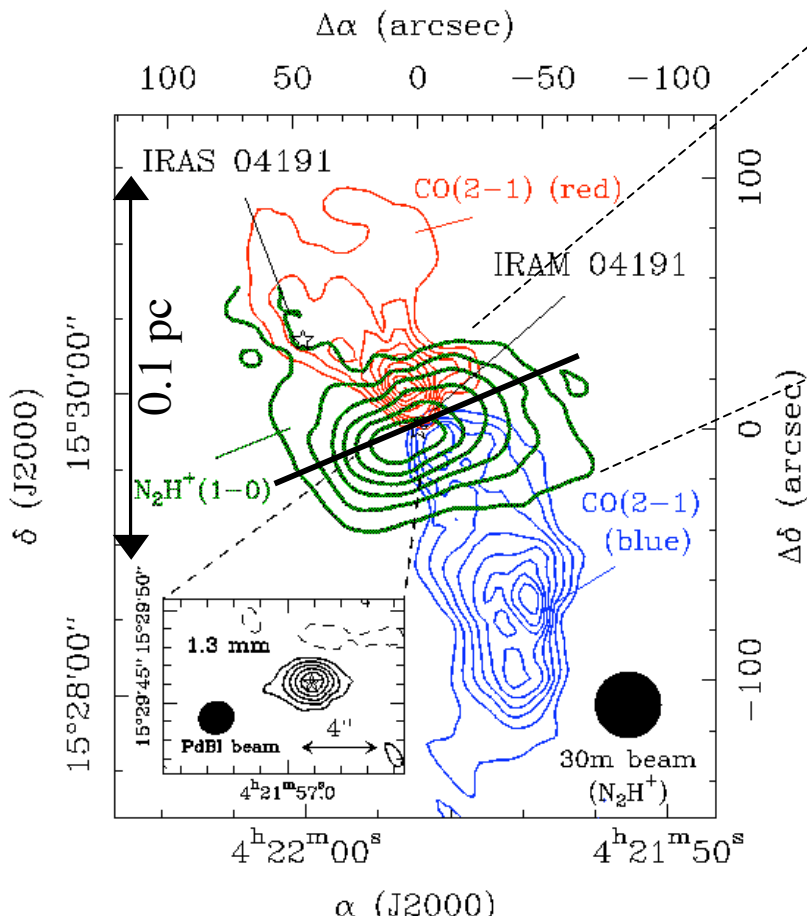
$\Delta_{\text{rot}} \sim 5 \text{ km/s/pc}$   
 $\Delta_{\text{rot}} \sim 0.03-0.1$



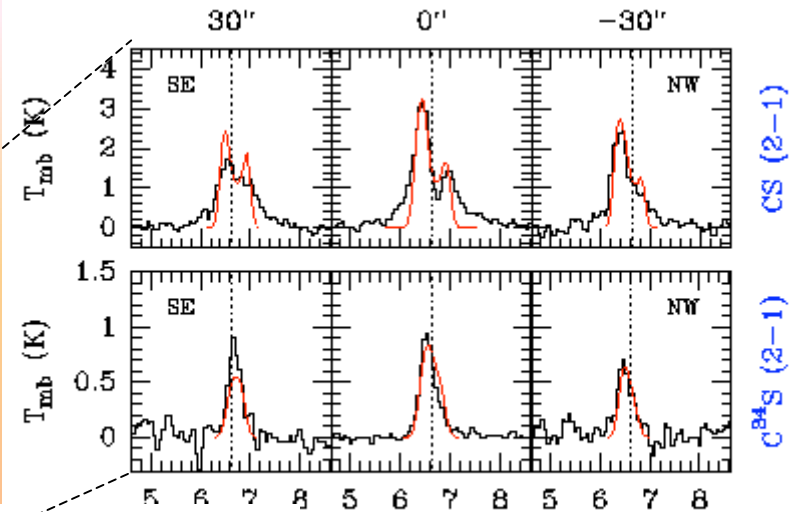
# Formation du disque : Exemple de la proto-étoile IRAM04191 (Taureau)

- 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

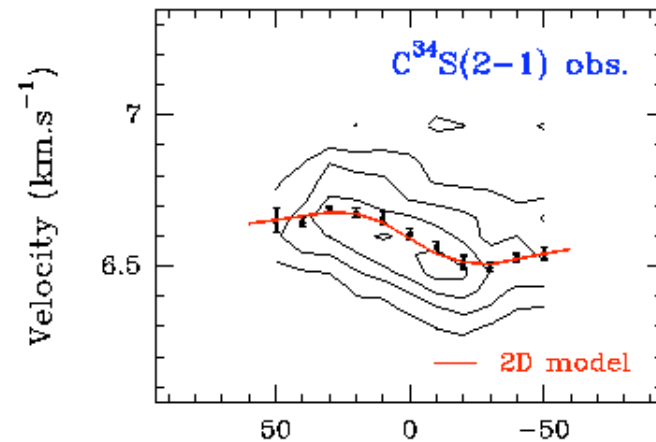


Belloche, André, Despois, Blinder (2002)



$V_{inf} \sim 0.15$  km/s

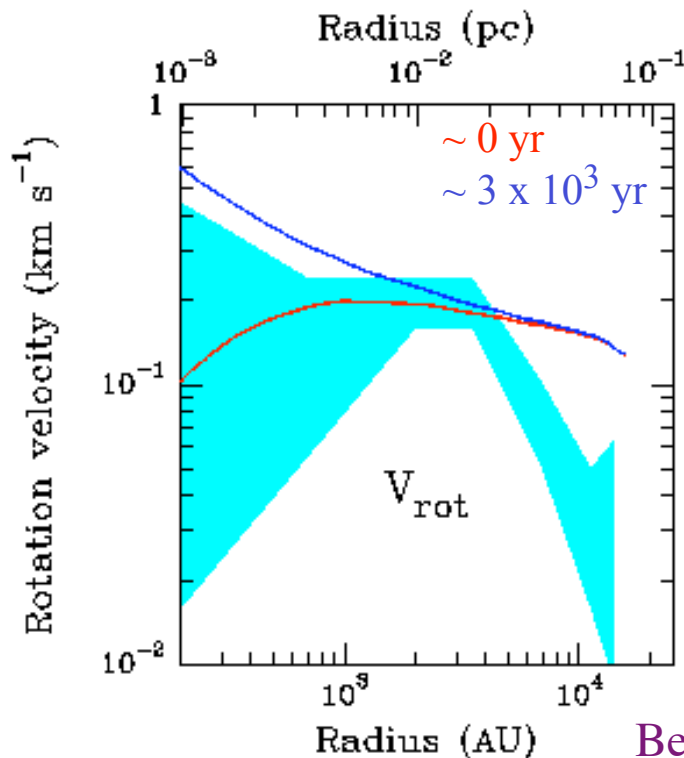
et en rotation différentielle



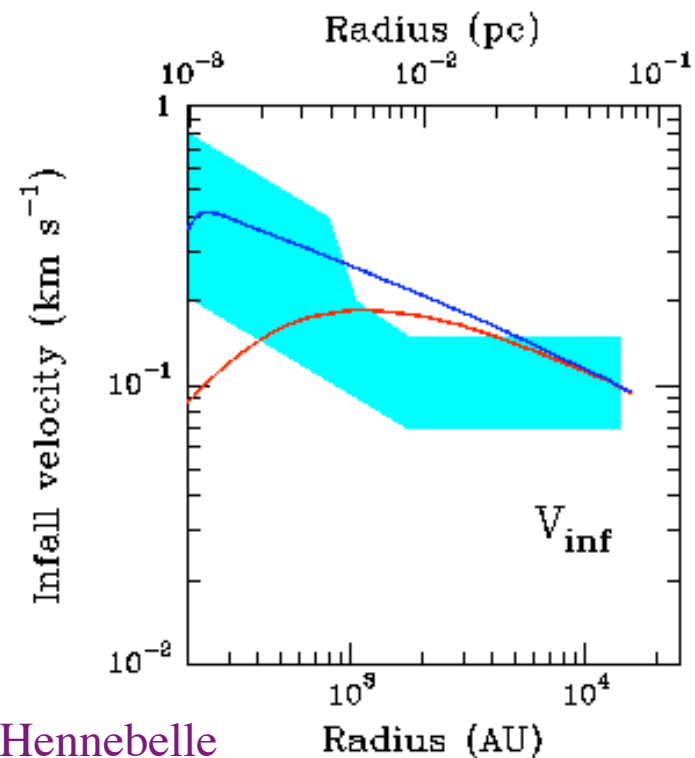
$\Omega_{rot} \sim 12$  km/s/pc  $\Omega_{rot} \sim 0.1$

# 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

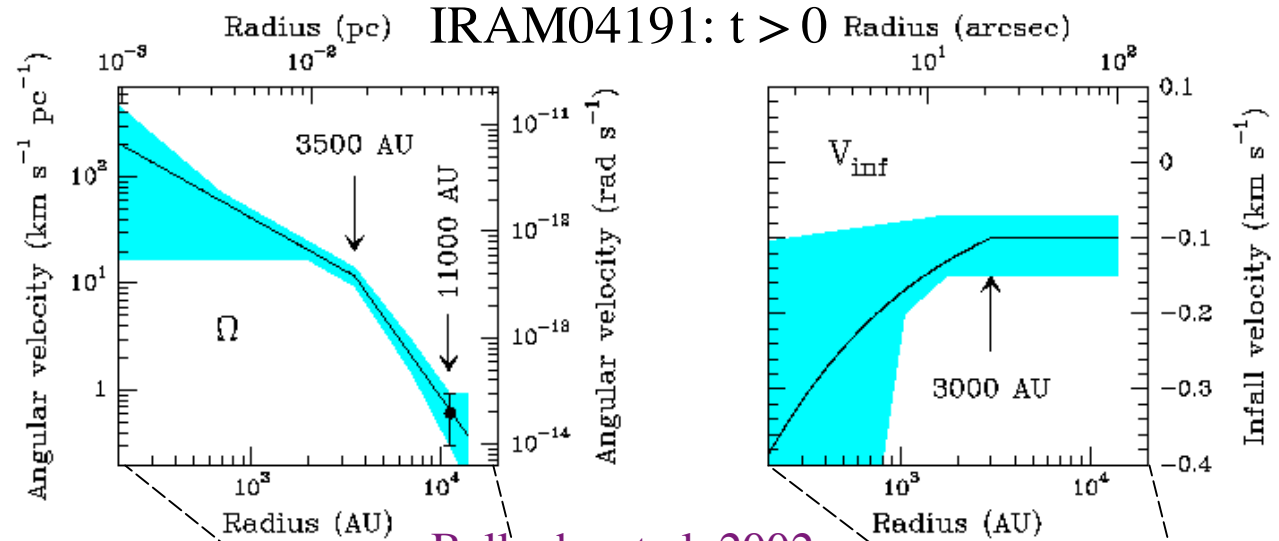


# Comparaison avec les modèles de diffusion ambipolaire

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

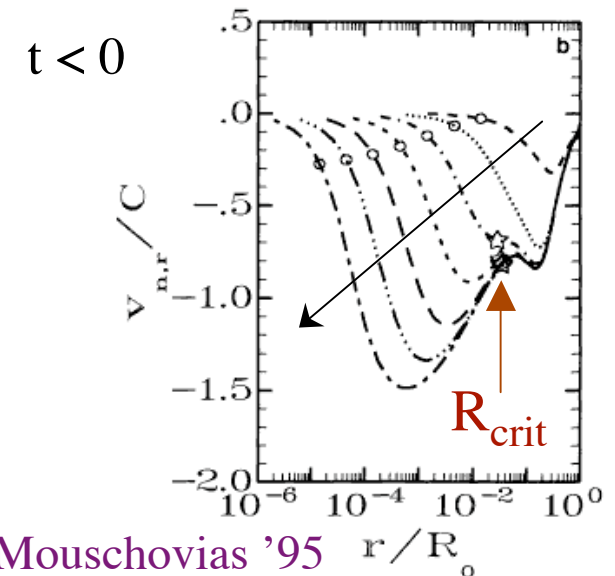
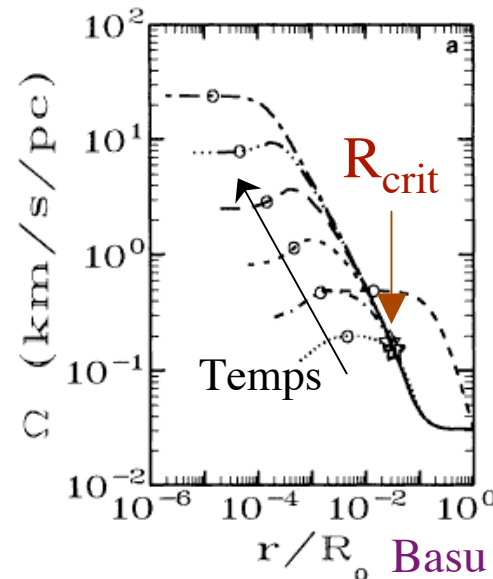
- Cœur interne «super-critique» se découplant d'une enveloppe externe ralentie par le champ B ambiant

- 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)



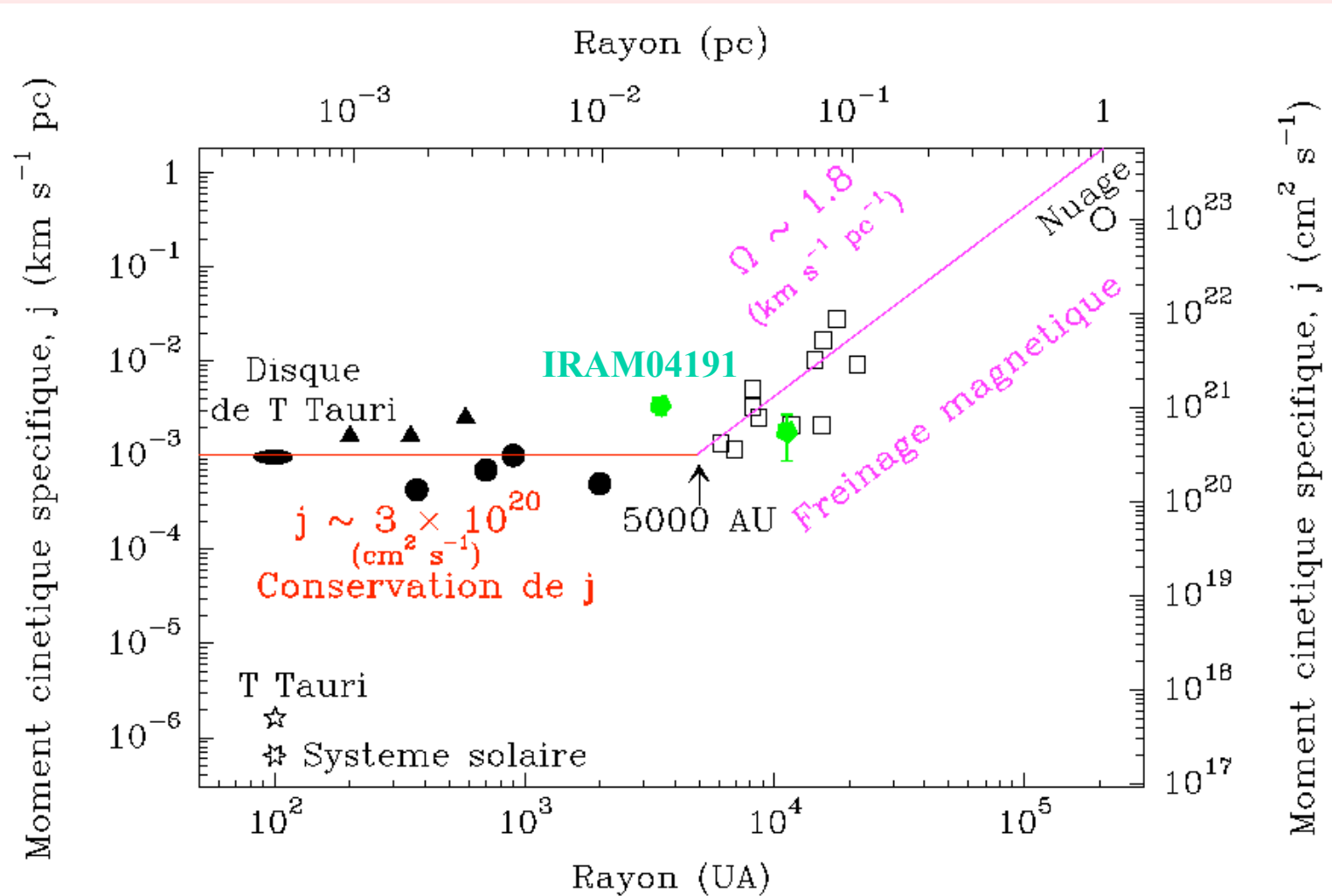
Belloche et al. 2002

## Modèles avec freinage magnétique



Basu & Mouschovias '95

# Evolution du moment cinétique au cours du processus de formation stellaire



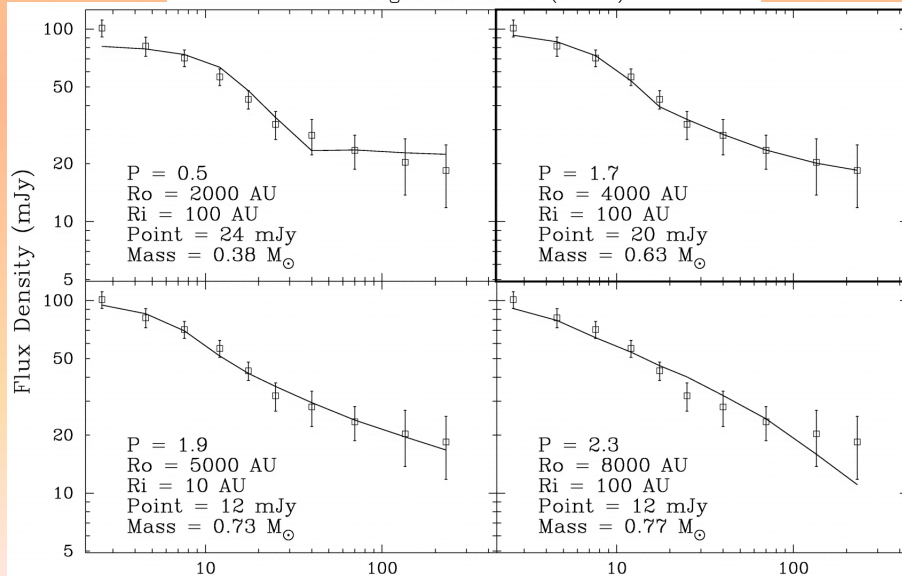
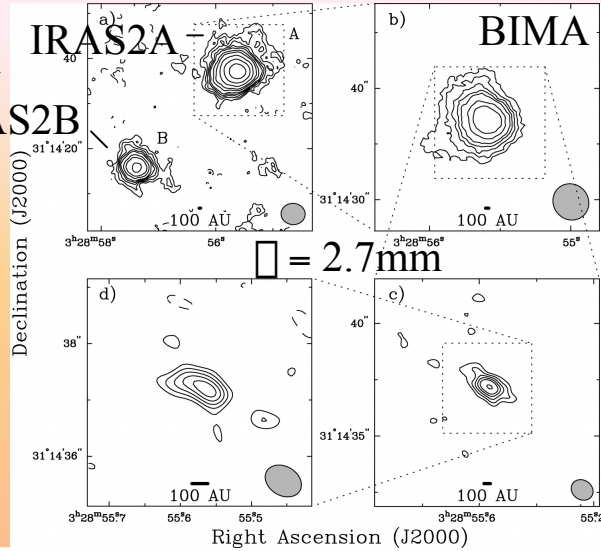
Ohashi et al. (1997) - Belloche et al. (2002)

# Recherche d'un disque centrifuge dans les proto-étoiles de Classe 0 par interférométrie millimétrique

Separation

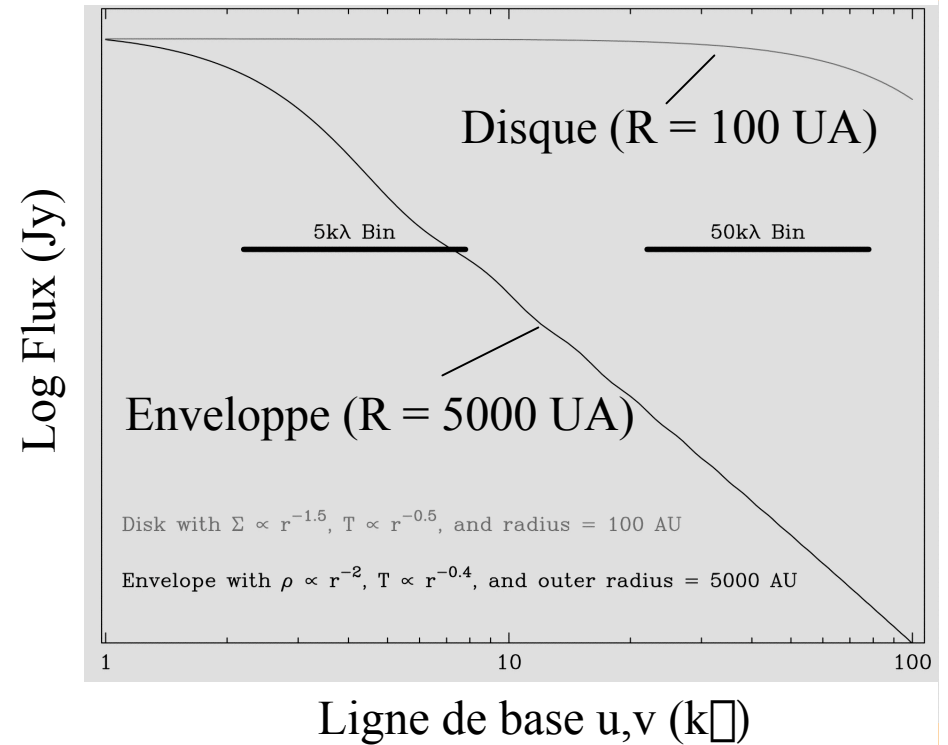
11000 UA

IRAS2B



Looney, Mundy, Welch 2000, 2003

Courbes de visibilité attendues



NGC1333-IRAS2A :  $M_{\text{disk}} = 0.06 M_{\odot}$

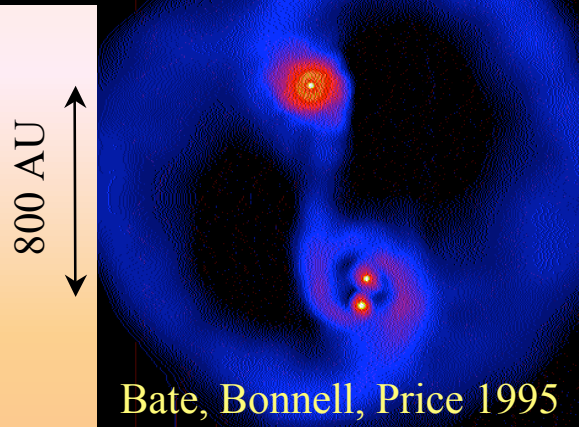
$M_{\text{env}} = 0.63 M_{\odot}$

## 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  $R_{\text{disk}}$  ont tendance à croître avec le temps

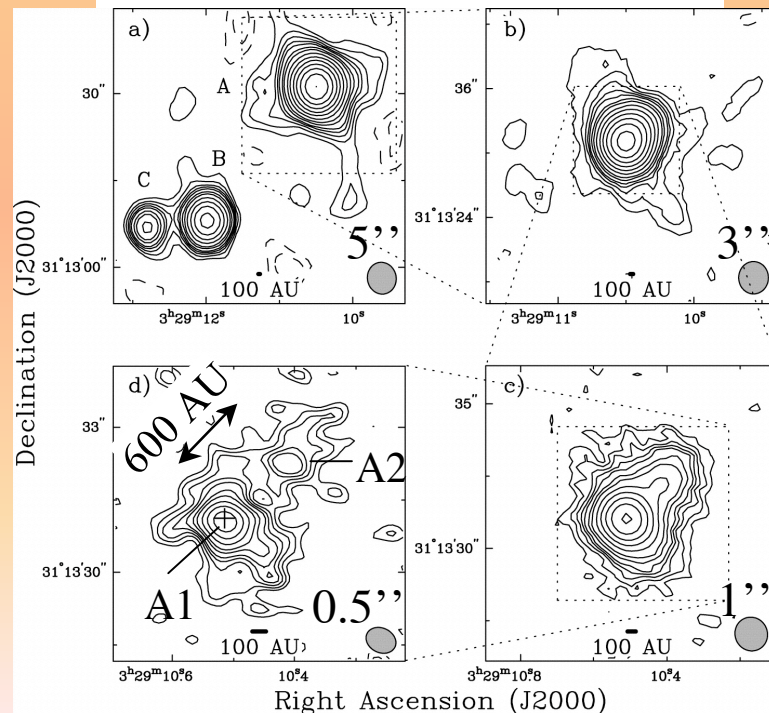
# Perspectives avec ALMA

## 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  $\sim 3$  UA et  $\sim 10000$  UA