

# Des nuages moléculaires aux cœurs denses et aux étoiles

Philippe André, CEA/SAp Saclay;  
Patrick Hennebelle, LERMA/ENS Paris

## Plan du cours

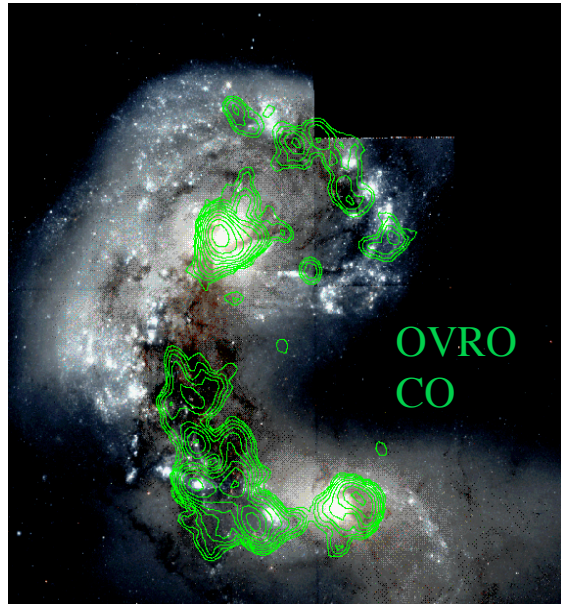
- I. Introduction générale, nuages moléculaires et origine des cœurs denses
- II. Structure et effondrement des cœurs denses
- III. Fragmentation dynamique en systèmes multiples et formation des disques

## Plan de la partie I-Observations

- 1. Introduction : Structure des nuages, formation stellaire en amas, scénario évolutif ‘standard’
- 2. Recensement et spectre de masse des cœurs pré-stellaires
- 3. Origine et propriétés globales des cœurs pré-stellaires

# Nuages moléculaires: les sites de formation stellaire

Galaxie des Antennes en CO(1-0)

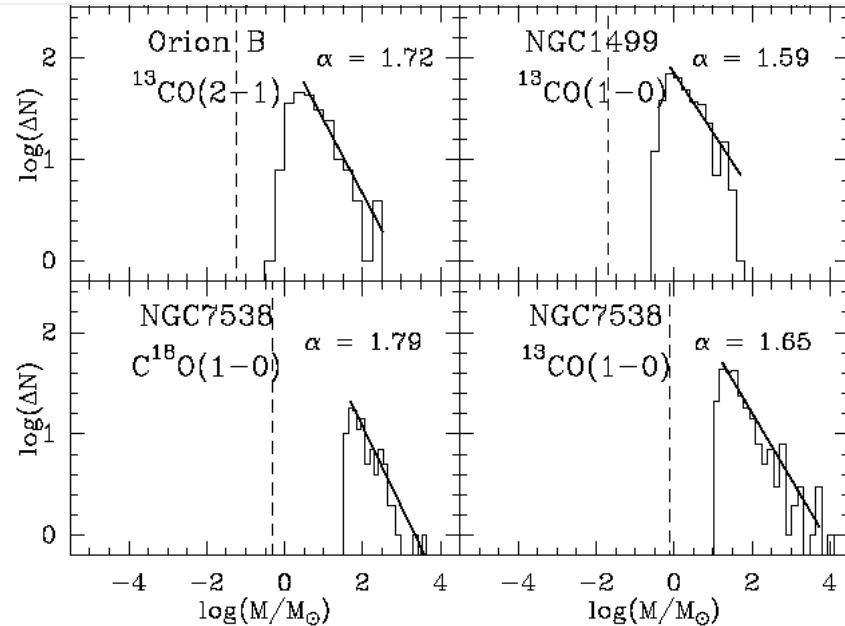


OVRO  
CO

Wilson et al. 2000

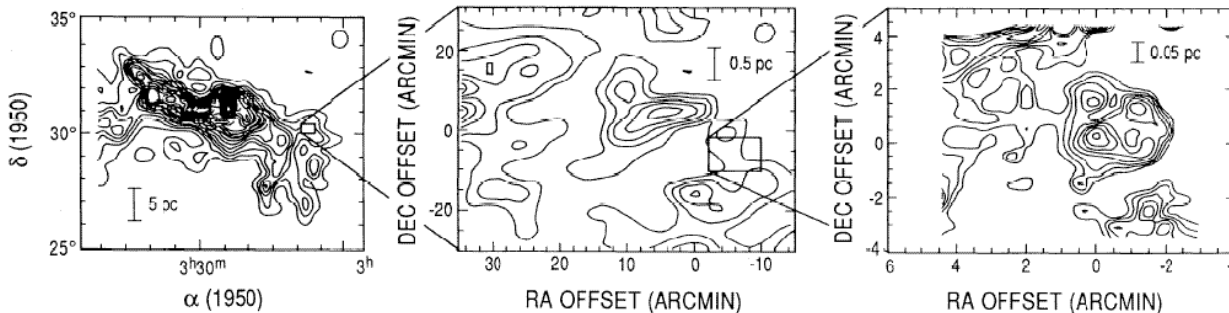
$$\langle n_{\text{H}_2} \rangle \sim 10^2 - 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

Spectre de masse universel:  $dN/dM \sim M^{-1.6}$



Kramer et al. 1998

Lois d'échelle (Larson 1981) et structure fractale, résultant probablement de leur nature turbulente



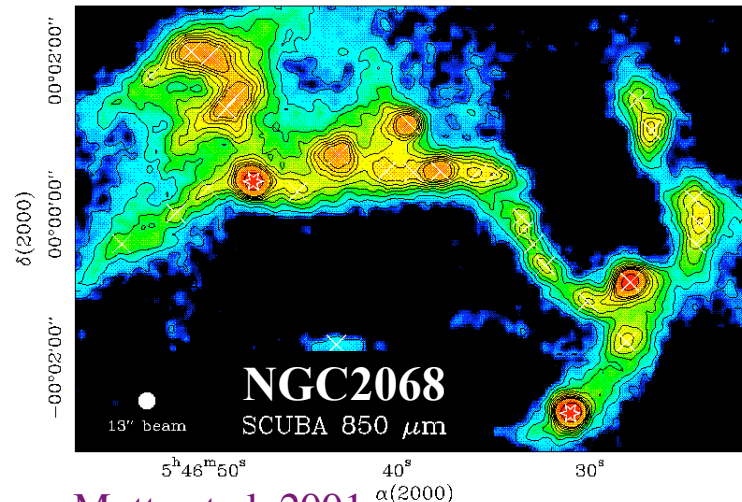
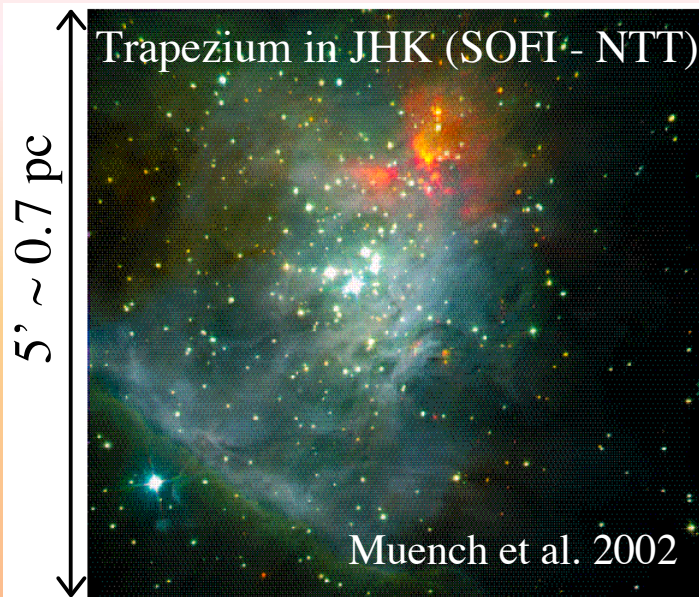
Falgarone et al. 1991

$$\square_{\text{NT}} \sim R^{0.4}$$

$$M \sim R^2$$

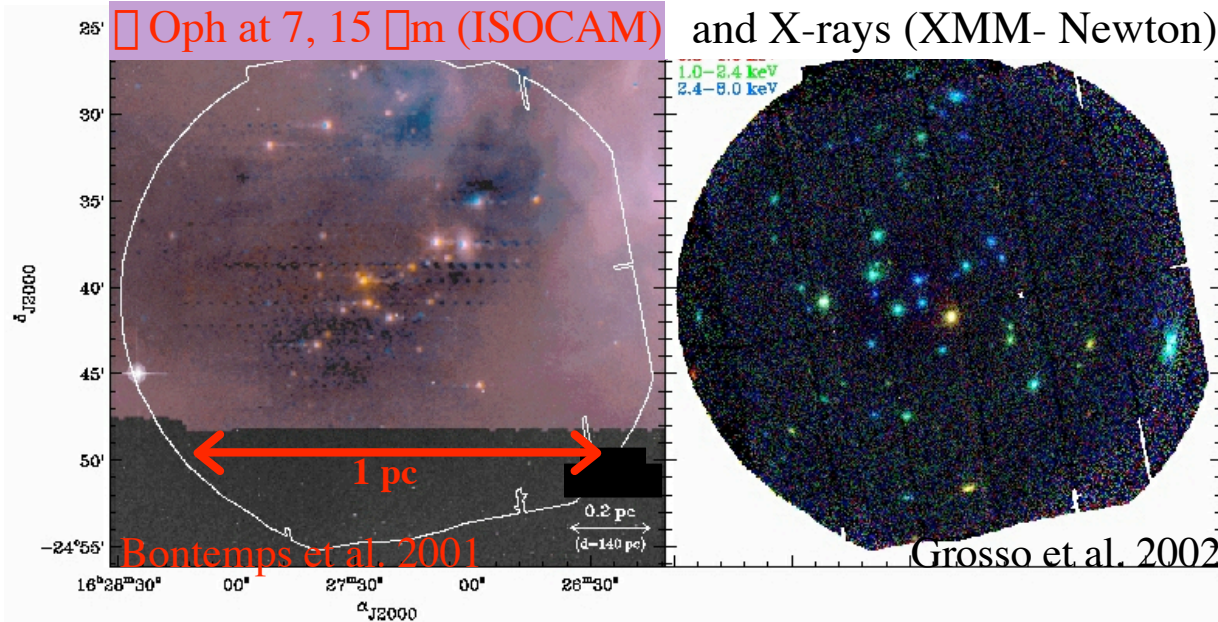
# La majorité des étoiles se forment dans des amas

(e.g. Adams & Myers 2001; Lada & Lada 2003 ARA&A)



Motte et al. 2001

**Orion**  
( $d = 450$  pc)



**Oph**  
( $d = 150$  pc)

X : activité magnétique  
de type solaire

IR proche : étoile jeune

IR moyen : disque

Submm : condensation/  
enveloppe

# La majorité des étoiles se forment dans des petits amas (e.g. Adams & Myers 2001; Lada & Lada 2003)

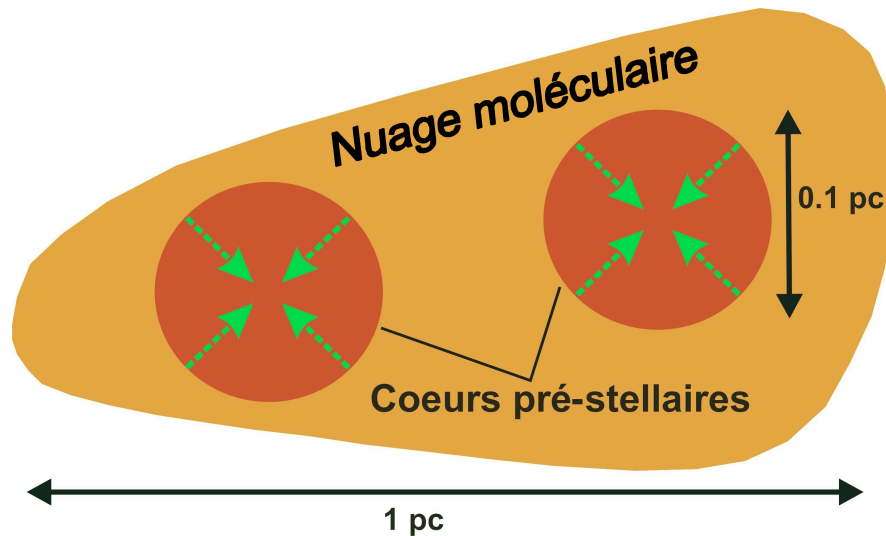
- 3 modes de formation : (a) étoiles isolées/binaires; (b) groupes de 10-100 objets; (c) amas de  $\gg 100$  objets
- Mode dominant : groupes ou petits amas de  $\sim 100$  objets (cf.  $\square$  Oph)
- La plupart de ces groupes se dissolvent lorsque le nuage de gaz parent se dissipe
- La majorité des étoiles de champ sont « $\square$ isolées $\square$ »

# Scénario pour la formation des étoiles de type solaire

(modifié à partir de Shu et al. 1987 ARA&A - cf. Protostars & Planets IV)

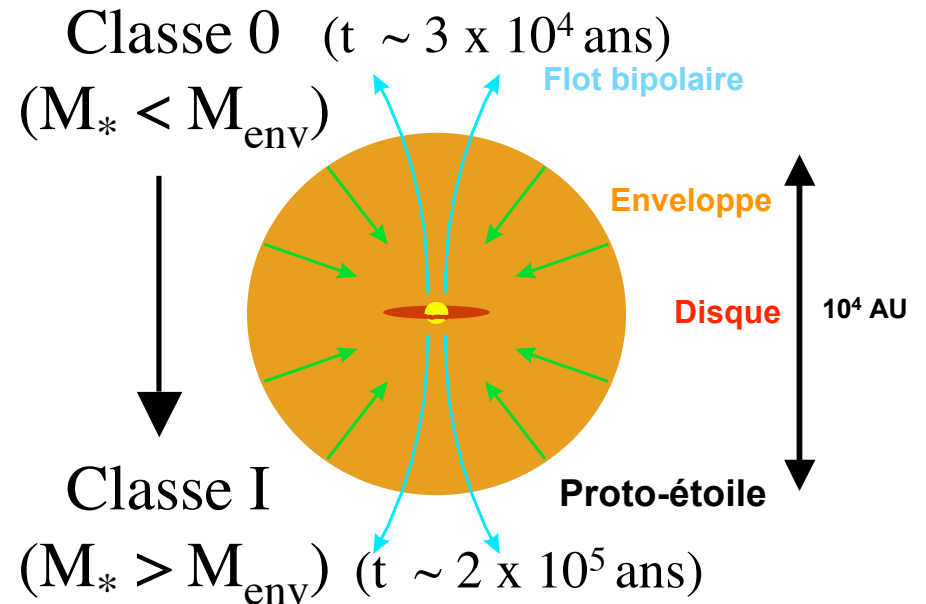
## A) Phase Pré-Stellaire ( $t \sim 10^6$ ans)

Fragmentation et effondrement



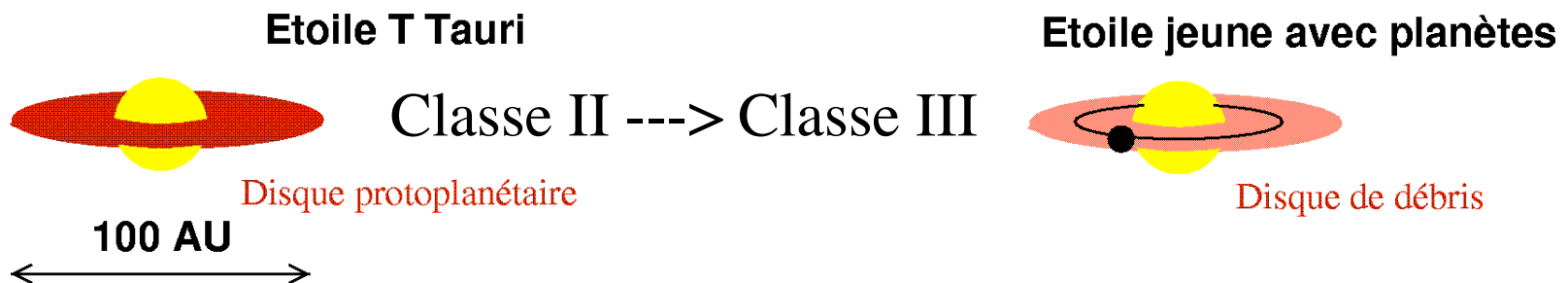
## B) Phase Protostellaire ( $t \sim 10^5$ ans)

Accrétion et éjection

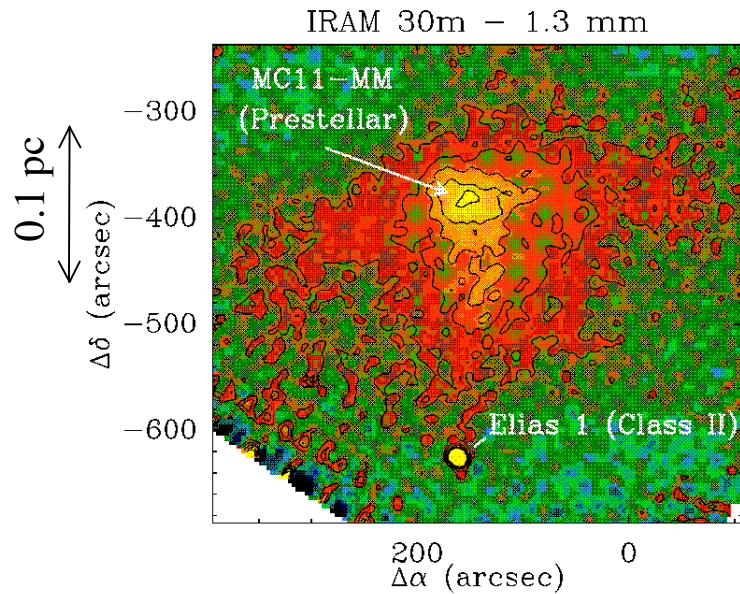


## C) Pré-Séquence Principale ( $t \sim 10^6$ - $10^7$ ans)

Contraction gravitationnelle



Cœurs pré-stellaires :  
Auto-gravitants ( $M \sim M_{\text{VIR}}, M_* = 0$ )

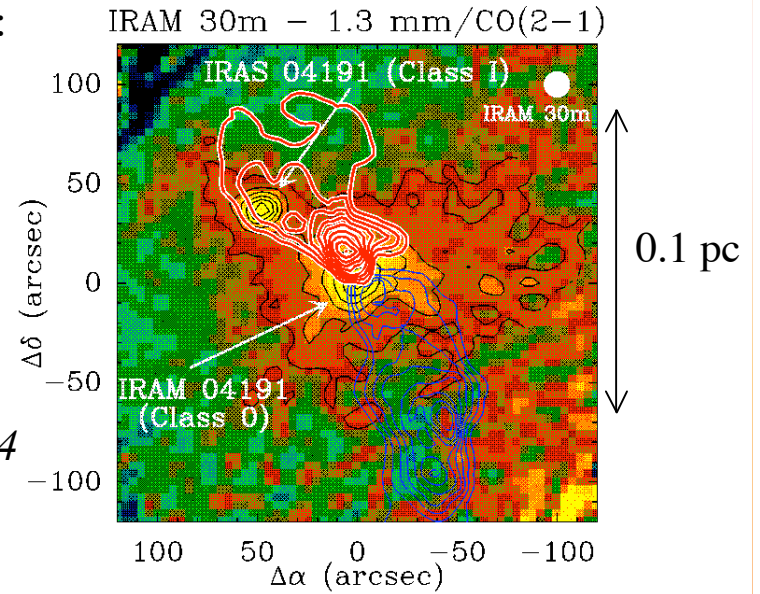


Traceurs d'évolution :

- Spectre d'énergie  
*Lada & Wilking '84;*  
*Lada 1987*
- Masse et distribution  
de la matière en  
continuum (sub)mm  
*André et al. '93;*  
*André & Montmerle '94*

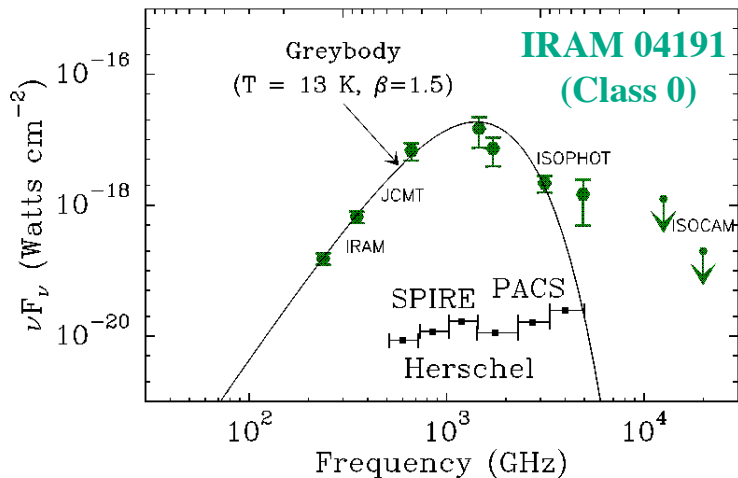
$$M = \frac{S_{1.3} d^2}{B_{1.3}(T) \Omega_{1.3}}$$

Protoétoiles de Classe 0 :  
Enveloppe massive ( $M_{\text{env}} > M_*$ )



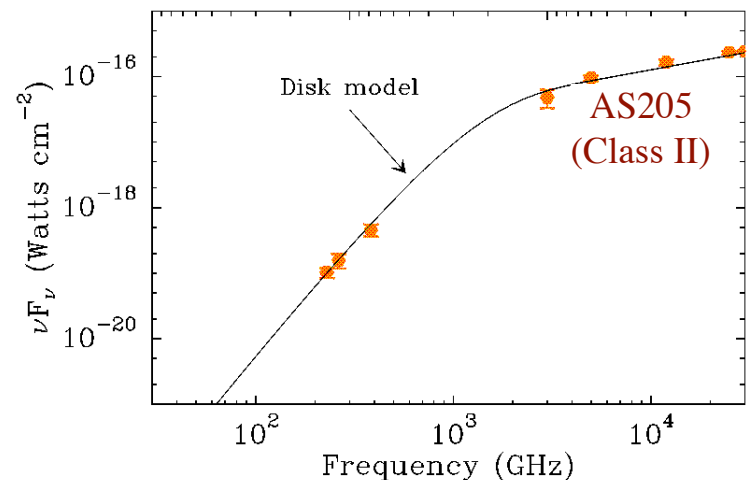
Classe I : Combinaison enveloppe + disque → Classe II :  $M_{\text{env}} \sim 0$ , disque dominant

'froides' Wavelength ( $\mu\text{m}$ ) (sub)mm  
 $10^4$   $10^3$   $10^2$   $10^1$



SEDs

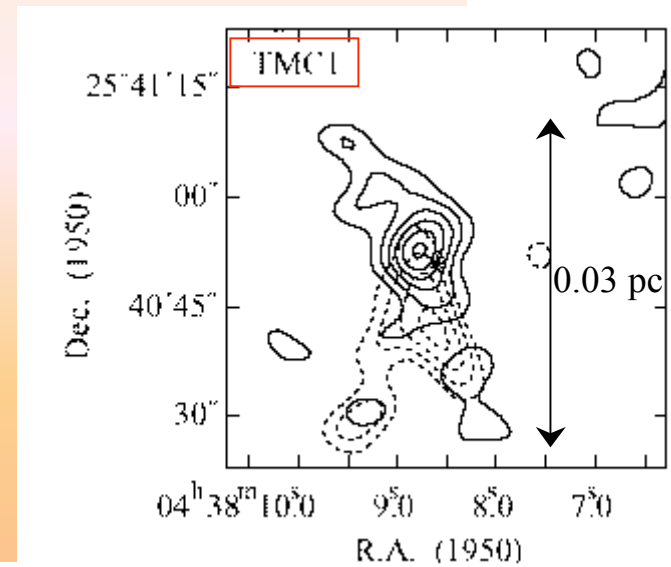
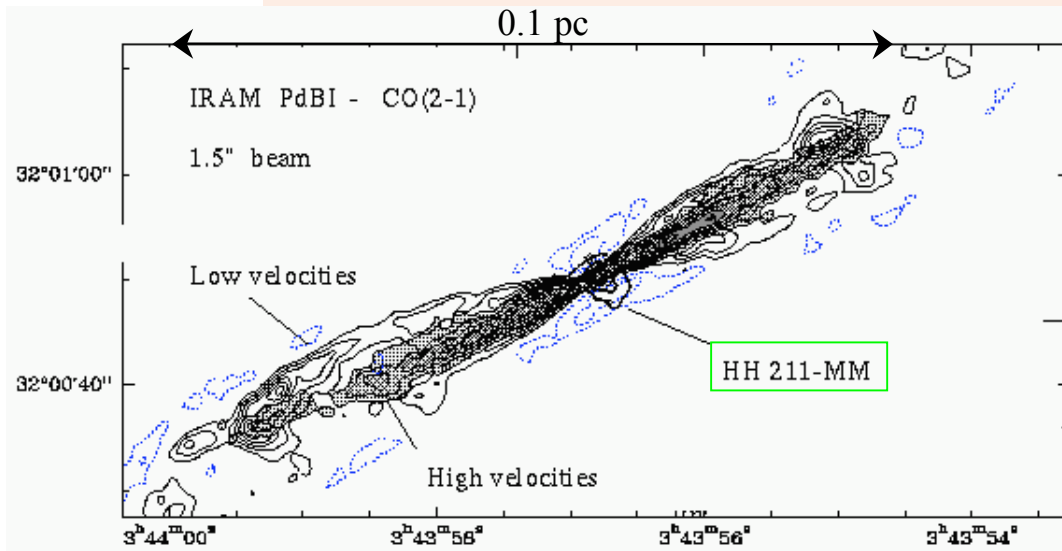
'chaudes' Wavelength ( $\mu\text{m}$ ) IR/visible  
 $10^4$   $10^3$   $10^2$   $10^1$



# Evolution des flots moléculaires

Classe 0

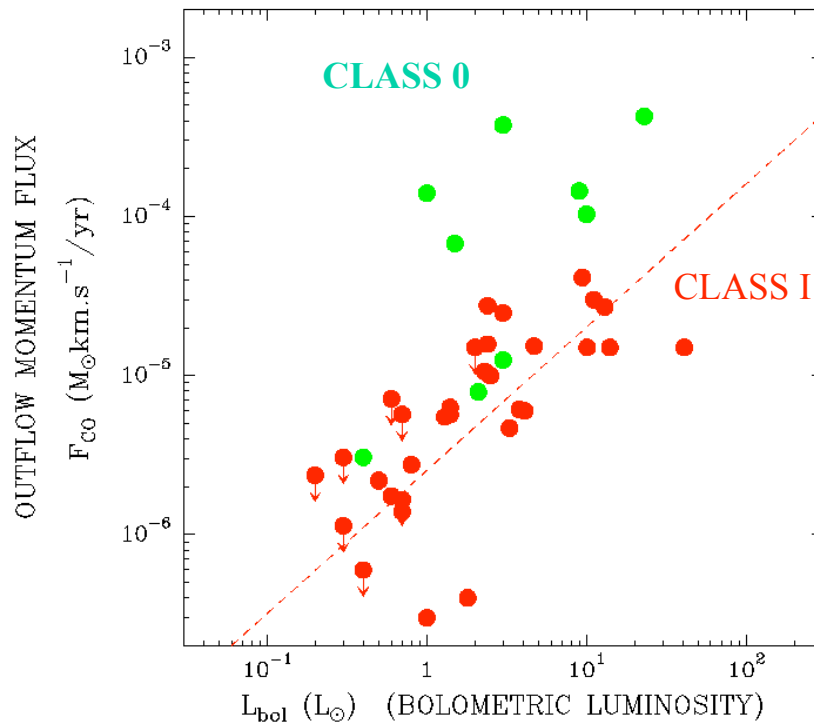
Classe I



Gueth & Guilloteau (1999)

Flots plus puissants  
au stade Classe 0

Bontemps et al. (1996)

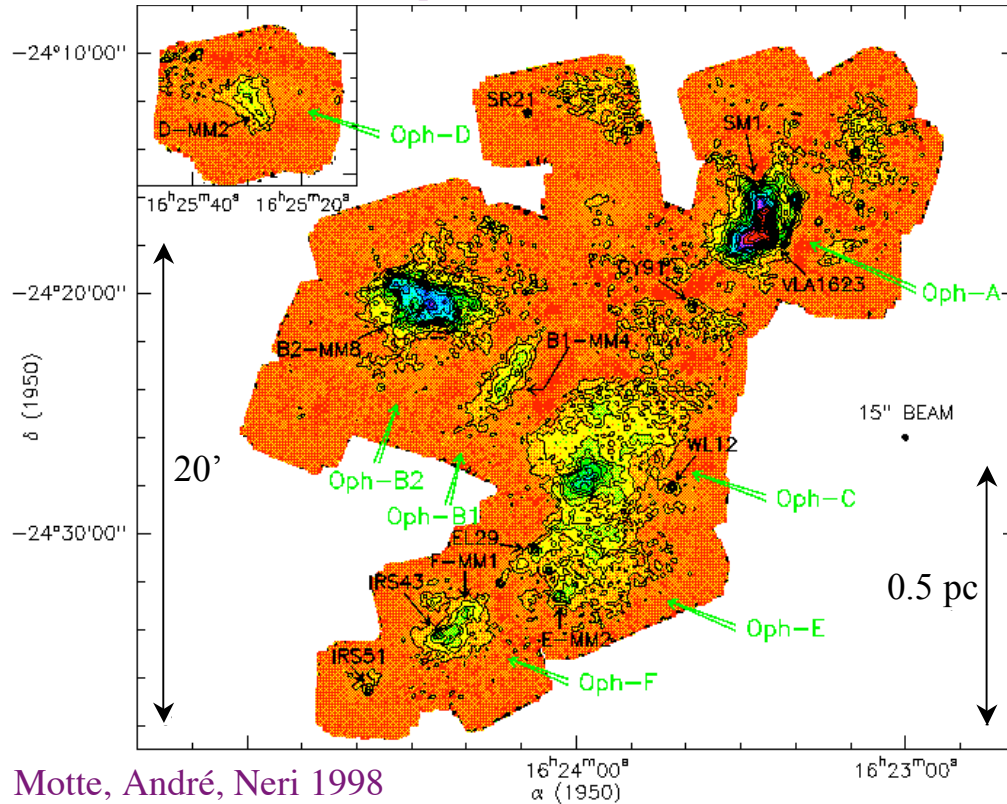


Chandler et al. (1996)

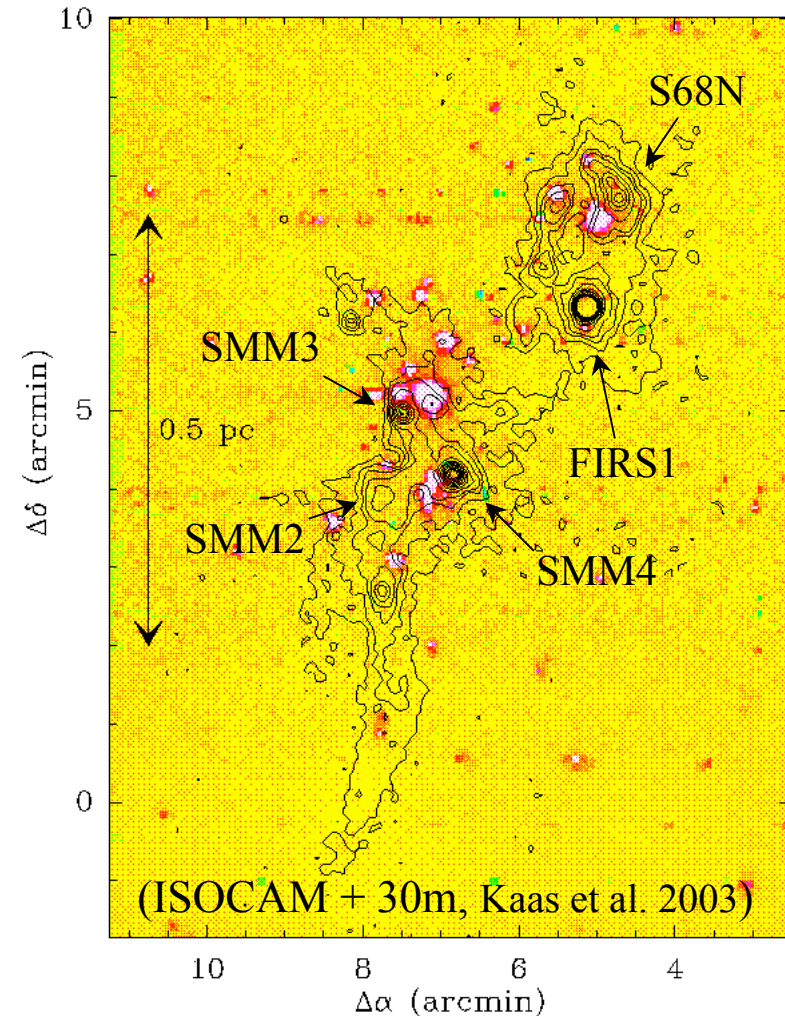
'Force' d'un flot :  
 $F_{CO} \sim \dot{M}_{CO} V_{CO}$   
(Cabrit & Bertout 92)

# Recensements de proto-étoiles de «Classe 0» et condensations «pré-stellaires» en continuum (sub)-millimétrique

1.3mm mosaic of  $\square$  Oph main cloud (IRAM 30m + MAMBO)



The Serpens Core (d = 310pc) at 7  $\mu$ m and 1.3 mm



## Statistique :

Préstellaire / Classe 0 / Classe I / Classe II

$\square$ Oph : 0.52 / 0.02 / 0.13 / 1

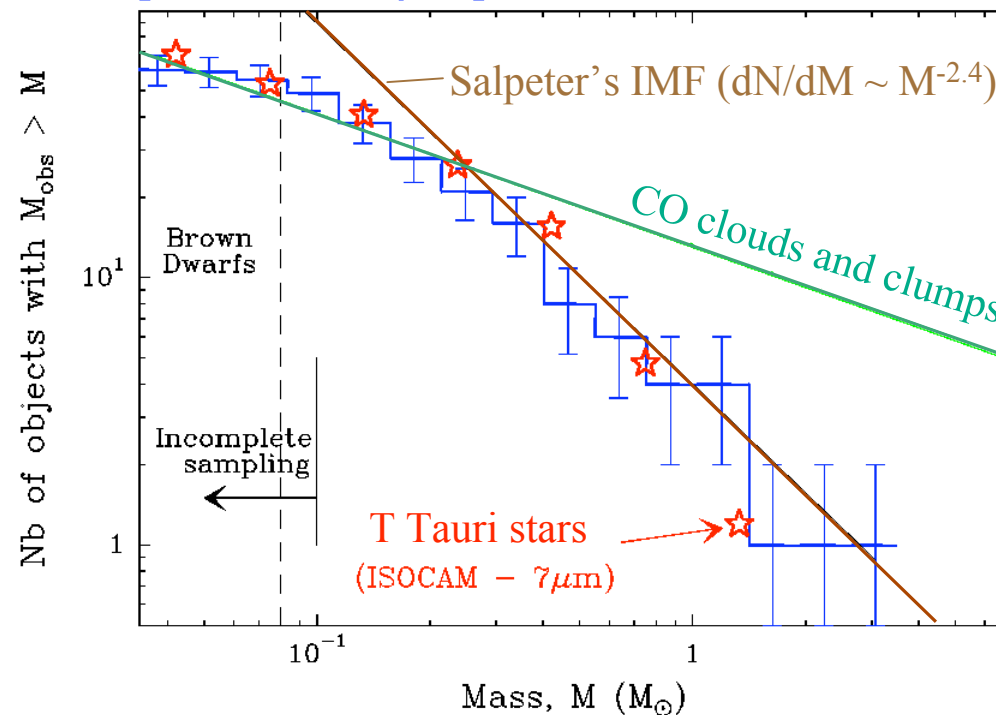
Serpent : 0.46 / 0.09 / 0.36 / 1

Durée de vie de la Classe II  $\sim 10^6$  ans



# La distribution de masse des condensations pré-stellaires est compatible avec l'«IMF» des étoiles

Mass Spectrum of  $\rho$  Oph Prestellar Condensations



Motte, André, Neri 1998 + Bontemps et al. 2001

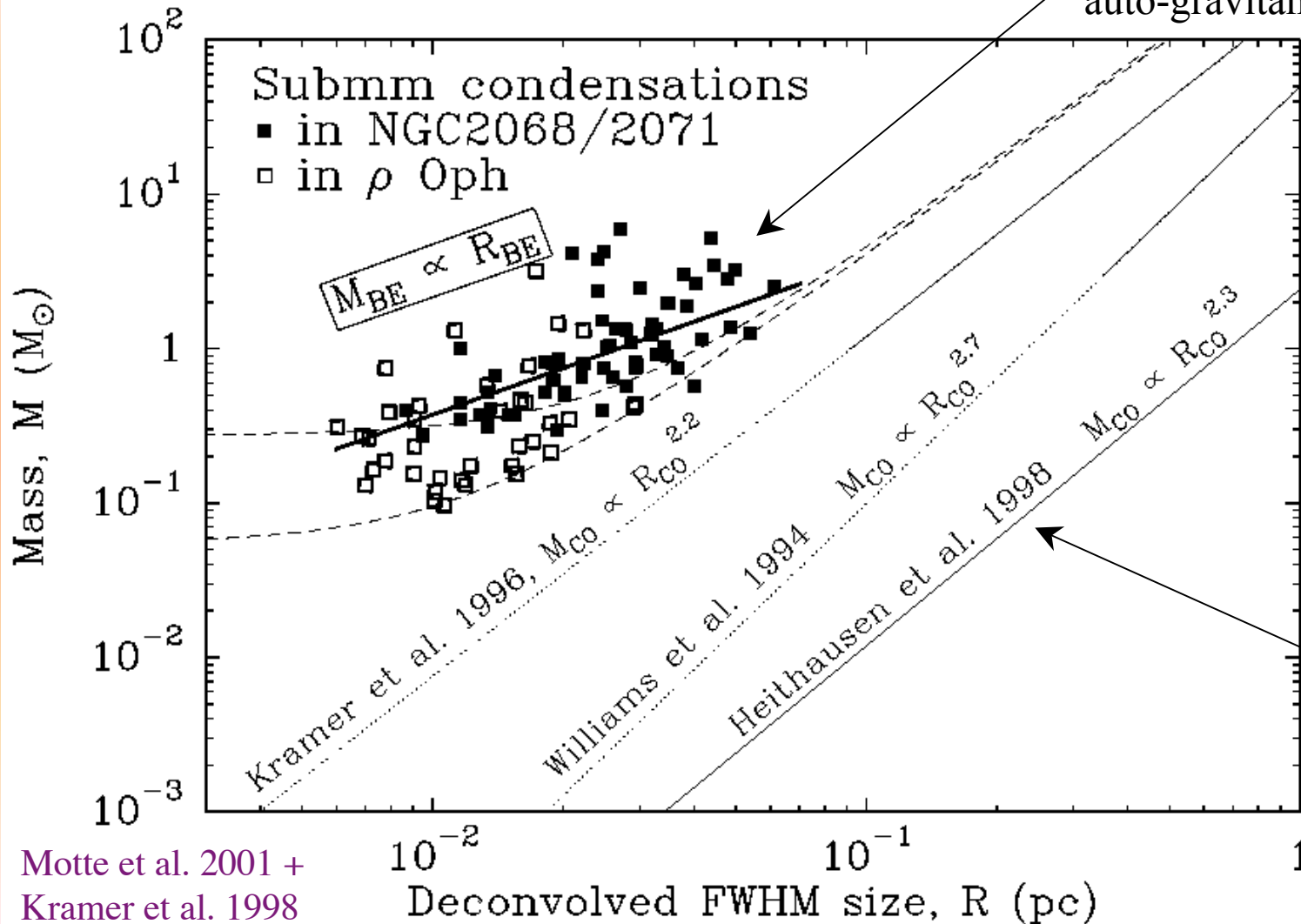
Voir aussi Testi & Sargent 1998, Johnstone et al. 2000 et Motte et al. 2001

→ Suggère que l'IMF est en grande partie déterminée par fragmentation au stade pré-stellaire + conversion masse pré-stellaire -> stellaire élevée  
A confirmer et étendre vers les petites/grandes masses avec ALMA et Herschel

# Différence entre les «clumps» diffus vus en CO et les condensations pré-stellaires identifiées en continuum (sub)mm

Plan Masse-Rayon

Condensations pré-stellaires :  
auto-gravitantes, peu turbulentes



$\langle n_{H_2} \rangle$   
 $\sim$   
 $10^5 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$



«Clumps» CO:  
non liées, dominées  
par la turbulence

$\langle n_{H_2} \rangle$   
 $\sim$   
 $10^2 - 10^3 \text{ cm}^{-3}$

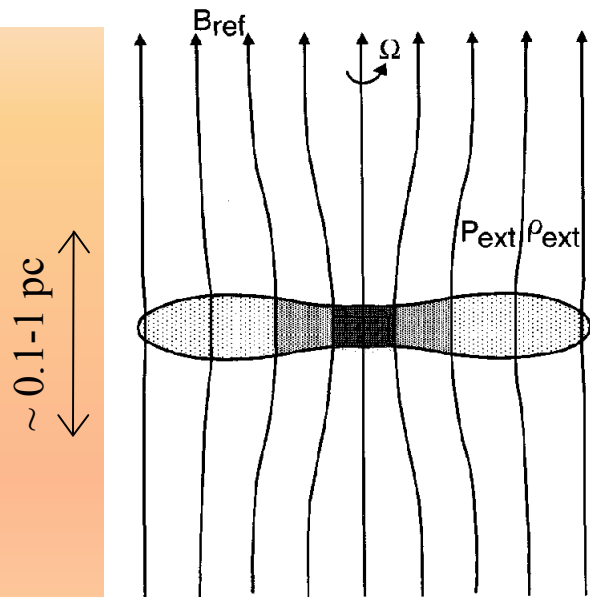
Motte et al. 2001 +  
 Kramer et al. 1998

# Du nuage moléculaire aux proto-étoiles :

## Deux écoles de pensée pour la formation des coeurs pré-stellaires

### Le scénario classique:

diffusion ambipolaire (e.g. Shu et al. 1987, 2003; Mouschovias & Ciolek 1999)



Initialement:  $M/\square \sim N/B < 0.12/ G^{1/2}$

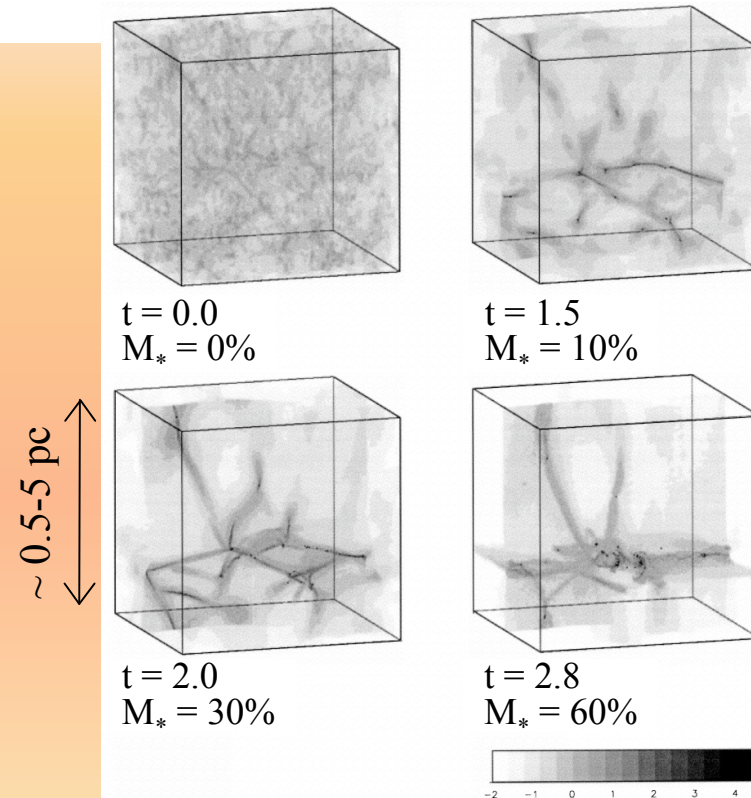
$B > B_{crit} \sim 10 \square G \times (N_{H_2}/10^{21} \text{ cm}^{-2})$

Formation 'lente' de coeurs 'super-critiques' qui se découplent du nuage ambiant soutenu par B

B orthogonal au grand axe des coeurs

### Le scénario turbulent/dynamique

(e.g. Klessen et al. 2000; Padoan & Nordlund 2002)



Formation rapide de coeurs proto-stellaires en interaction à partir de fluctuations de densité turbulentes  
B désordonné, ~ le long des

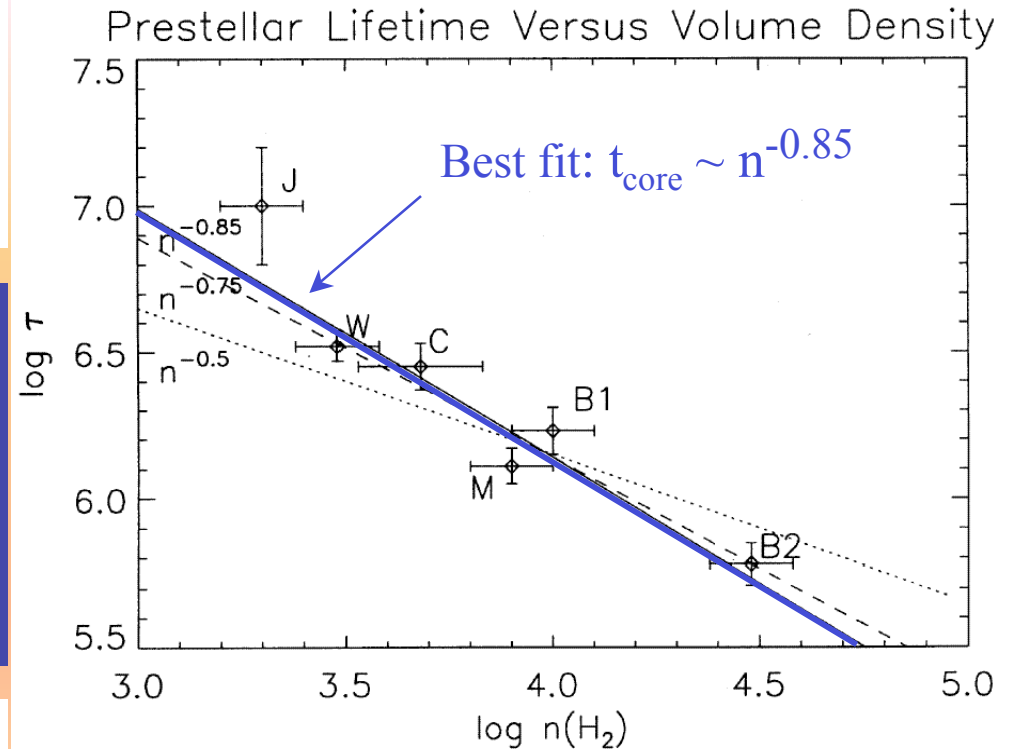
# Durée de vie des cœurs pré-stellaires «isolés»

Estimé en comparant le nombre de cœurs pré-stellaires au nombre de cœurs ayant formé au moins une étoile (e.g. Beichman et al. 1986)

- La durée de vie décroît avec la densité  $t \sim n^{-0.85}$  (Jessop & Ward-Thompson 00)
- Durée de vie typique  $\sim 1.5 \times 10^6$  ans à  $n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$  (e.g. Lee & Myers 1999)  
 $\Leftrightarrow \sim 4 \times t_{\text{ff}} < 10 \times t_{\text{ff}} \sim t_{\text{AD}}$

Suggère que les cœurs pré-stellaires sont proches de l'équilibre pour  $n < 1-5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$

En accord avec l'équilibre viriel approximatif observé (e.g. Myers et al. 1991)

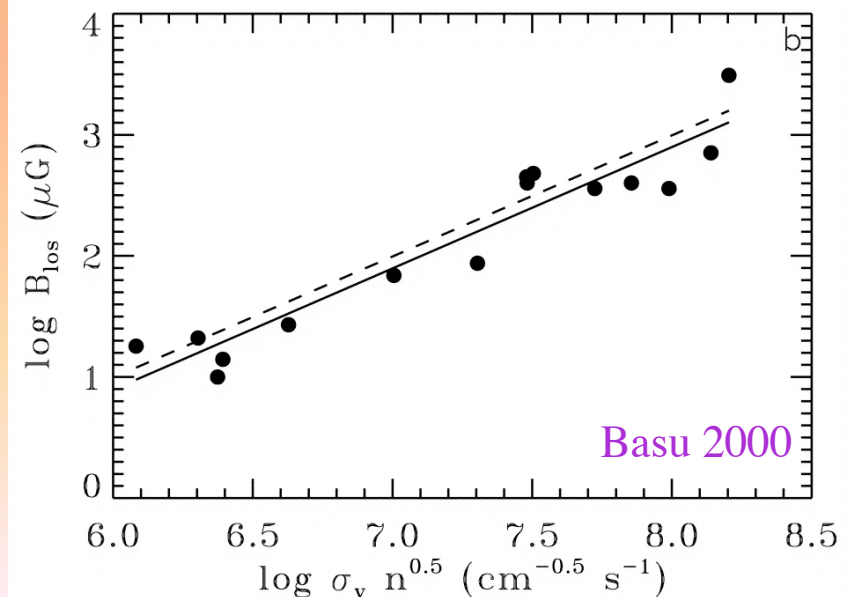
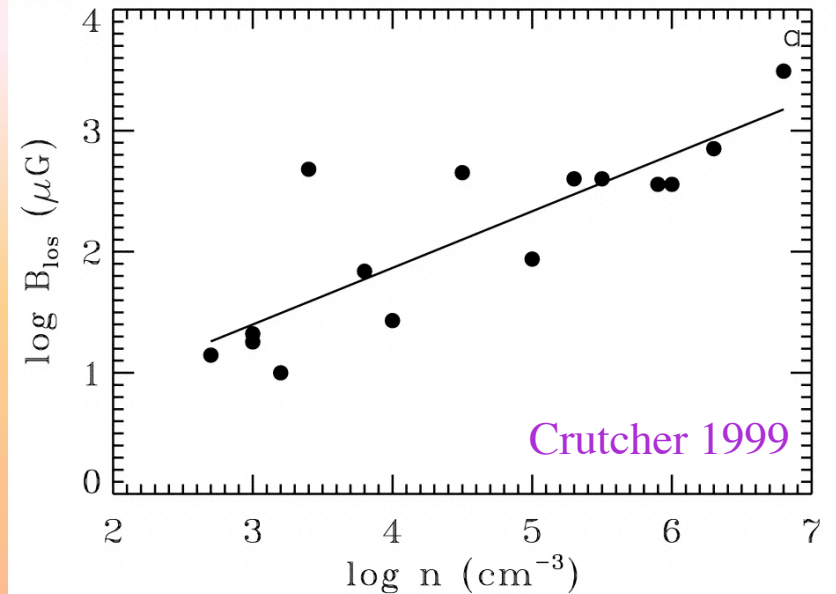


Jessop & Ward-Thompson 2000

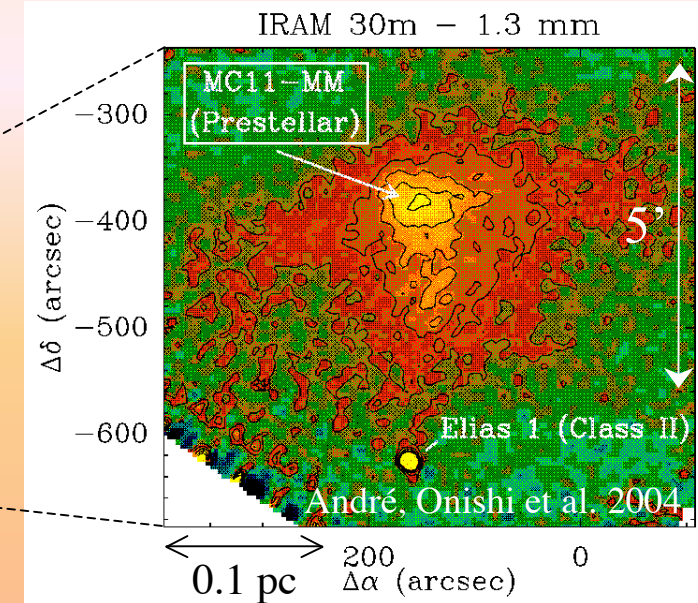
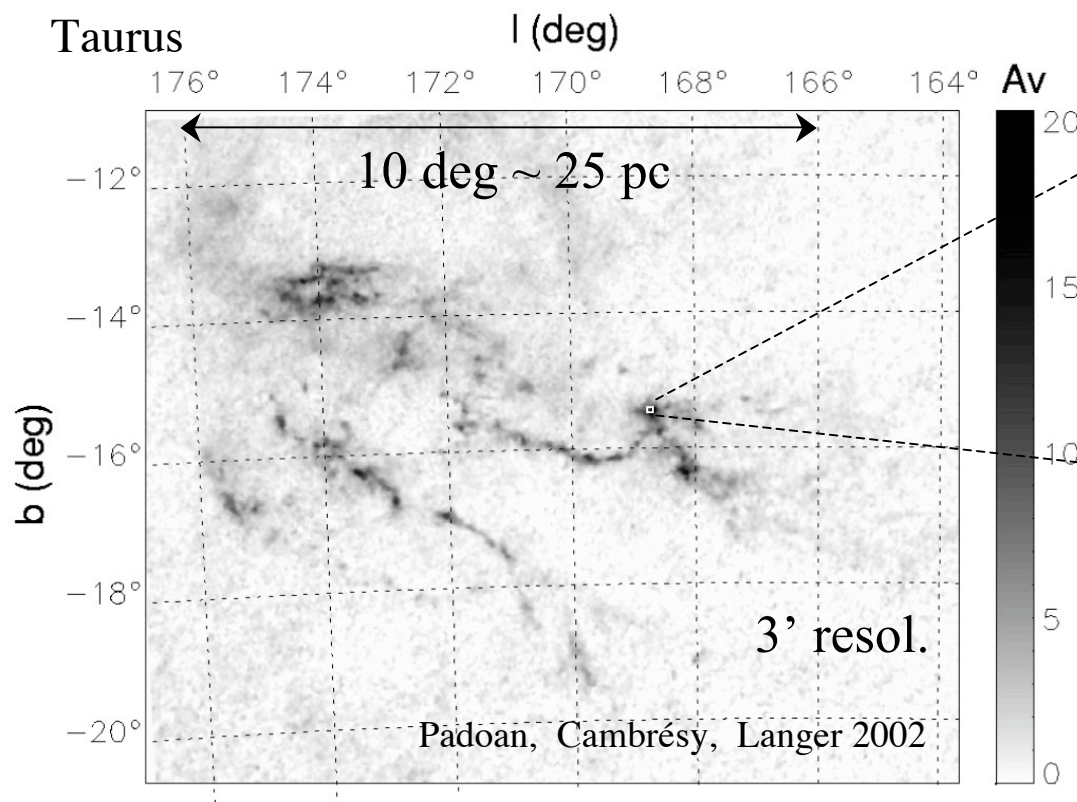
- Le scénario turbulent pur est trop rapide
- La diffusion ambipolaire est trop lente pour expliquer la formation des cœurs

# Mesures de la force du champ magnétique dans les cœurs denses

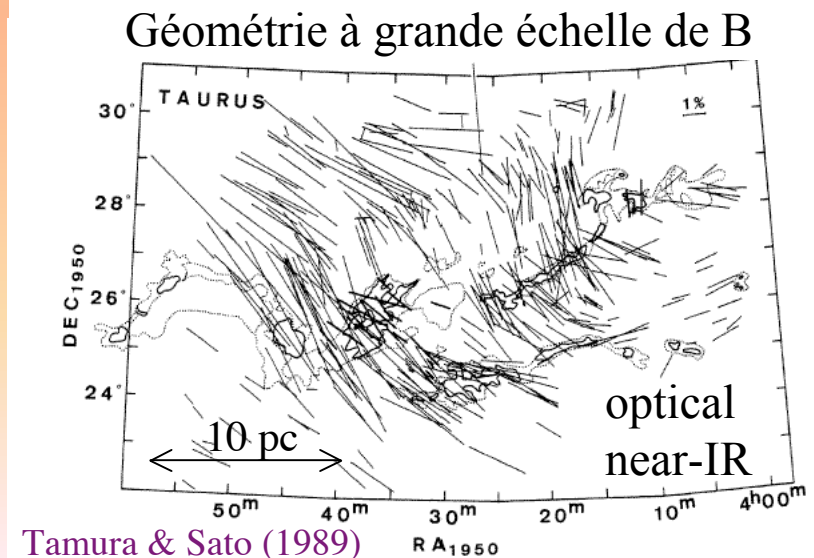
- Très peu (15) de détections de  $B_{\text{los}}$  par effet Zeeman (Crutcher 1999)
- Corrélation trouvée :  $B \sim n^{0.5}$   
 →  $B$  important (sinon  $B \sim n^{2/3}$ ), compatible avec diffusion ambipolaire mais aussi avec turbulence Alfvénique ( $\Sigma_{\text{turb}} \sim V_A \sim B \cdot n^{-0.5}$ )
- Meilleure corrélation :  $B \sim \Sigma \cdot n^{0.5}$   
 → suggère que le support turbulent est significatif
- Valeurs absolues de  $B_{\text{los}}$  suggèrent  $M/\Sigma \approx (M/\Sigma)_{\text{crit}}$



# Distribution des cœurs pré-stellaires le long de filaments: L'exemple du nuage du Taureau

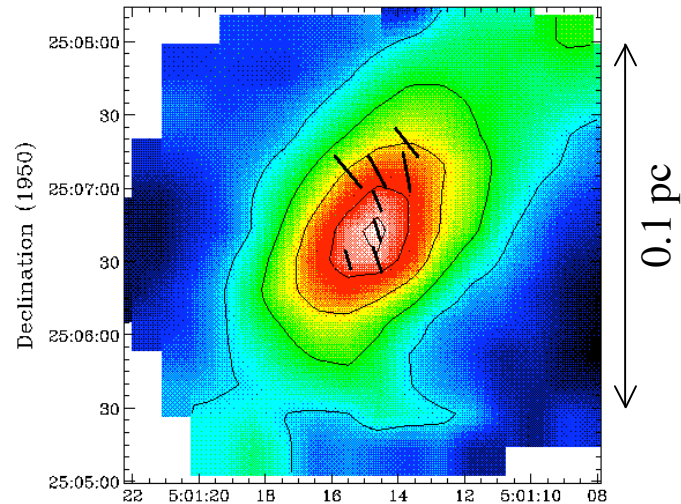


- Le mécanisme de formation des cœurs pré-stellaires est intimement relié au processus de formation des filaments dans les nuages
- Importance d'une compréhension globale des nuages incluant une grande gamme d'échelles spatiales



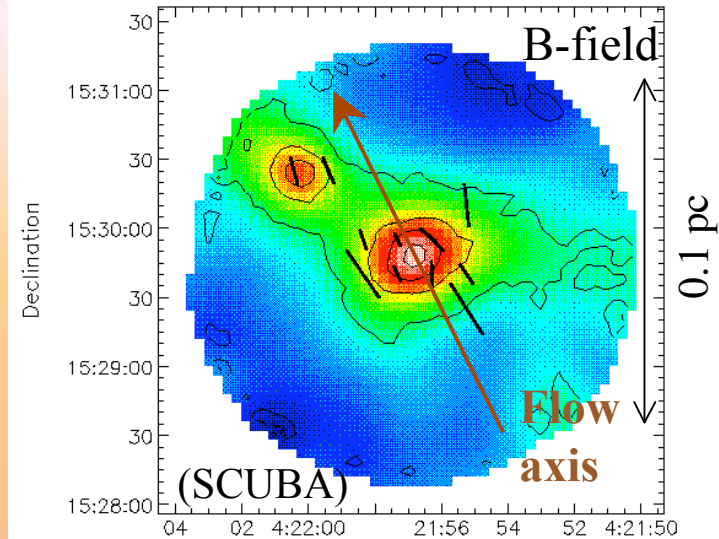
# Indications de l'importance dynamique du champ magnétique dans le nuage du Taureau à partir de cartes de polarisation

L1544 (prestellar) 850  $\mu$ m B-field



Ward-Thompson et al. (2000)

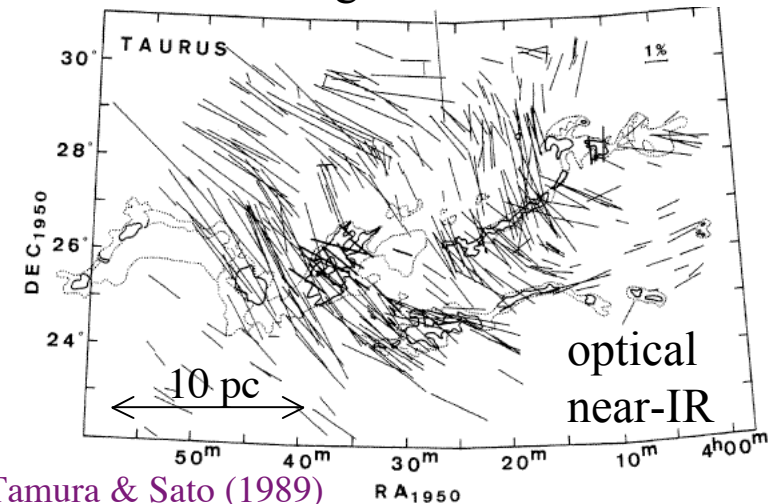
IRAM04191 (Class 0) 850  $\mu$ m



André, Nutter, Ward-Thompson (2003)

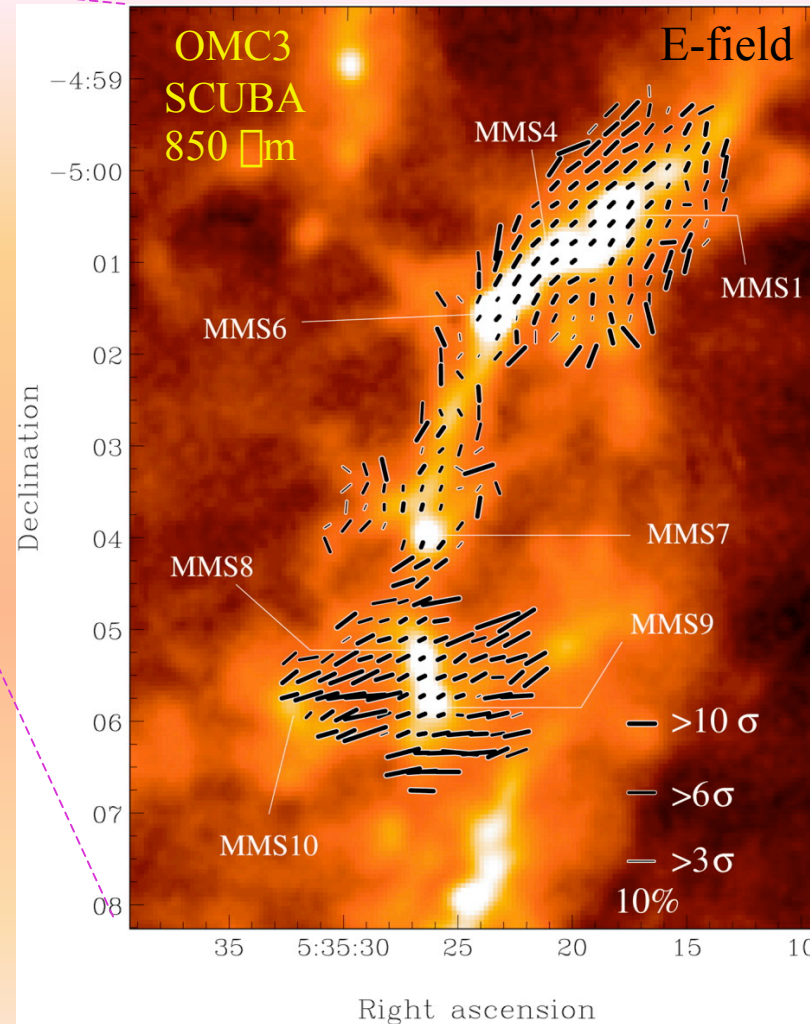
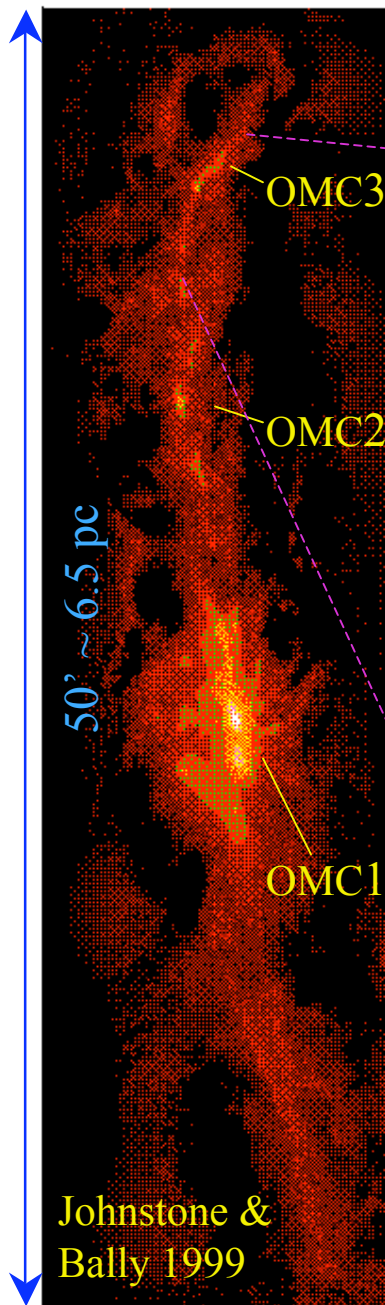
- Champ magnétique bien organisé,  
 $\sim$  orthogonal au grand axe des coeurs  
 $\sim$  parallèle à l'axe des flots/jets
- Champ  $\sim 140 \mu\text{G}$  à  $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  par la méthode de Chandrasekhar-Fermi (Crutcher et al. 2003)

Géométrie à grande échelle de B



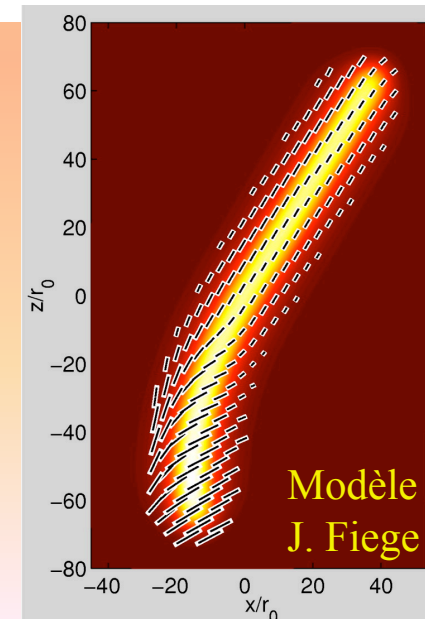
Tamura & Sato (1989)

# L'exemple des filaments d'Orion : un champ magnétique hélicoïdal ?



Matthews et al. 2001

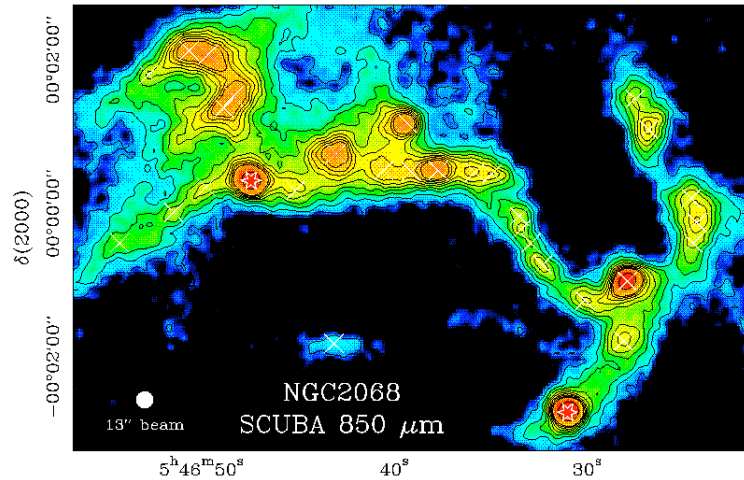
- Filaments avec un champ magnétique très organisé d'après les cartes de polarisation à 850  $\mu\text{m}$  (Matthews et al. 2001, 2002)
- Dépolarisation vers le centre
- Peut s'expliquer avec un modèle de filament confiné par un champ B hélicoïdal (Fiege & Pudritz 2001)





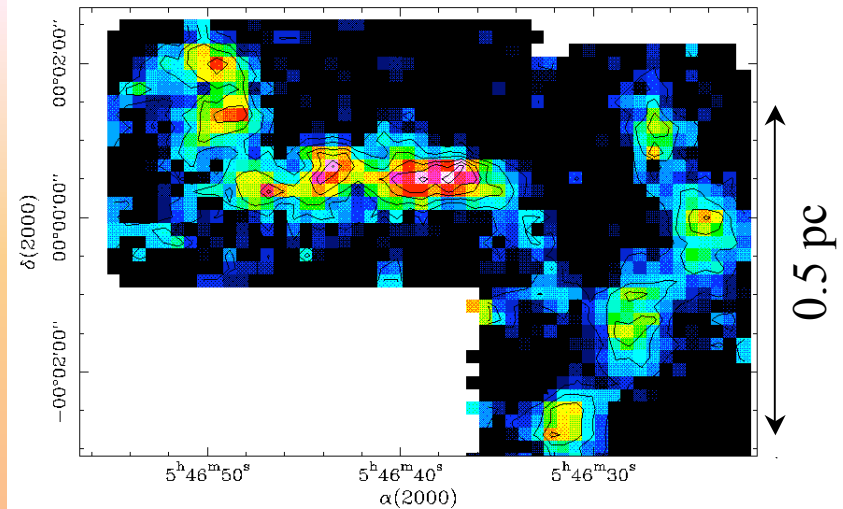
# Constraints on the relative motions between condensations from $N_2H^+$ maps

NGC2068 - 850  $\mu$ m continuum (JCMT)



Motte et al. (2001)

NGC2068 in  $N_2H^+(1-0)$  (IRAM 30m)



Global velocity dispersion in the protoclusters:

$$\Delta_{1D} \sim 0.37 \text{ km/s} \Leftrightarrow \Delta_{3D} \sim 0.65 \text{ km/s}$$

for both NGC 2068 and  $\square$  Oph

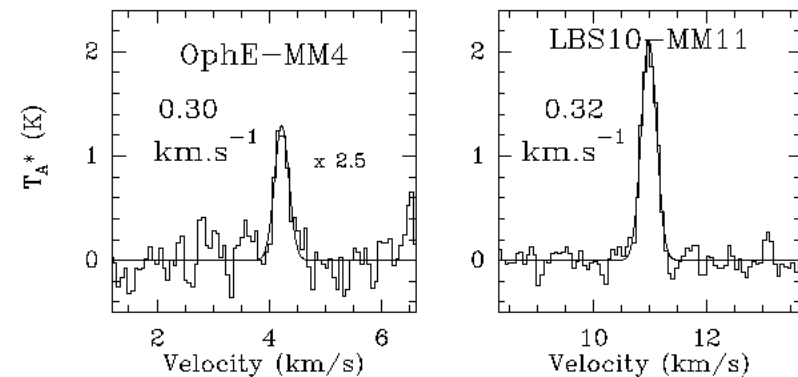
→ Crossing time of the protoclusters:

$$D/\Delta_{3D} \sim 1-2 \times 10^6 \text{ yr}$$

> condensation lifetime  $\sim 1-5 \times 10^5 \text{ yr}$

→ Not enough time for dynamical interactions to play a role prior to PMS stage ?

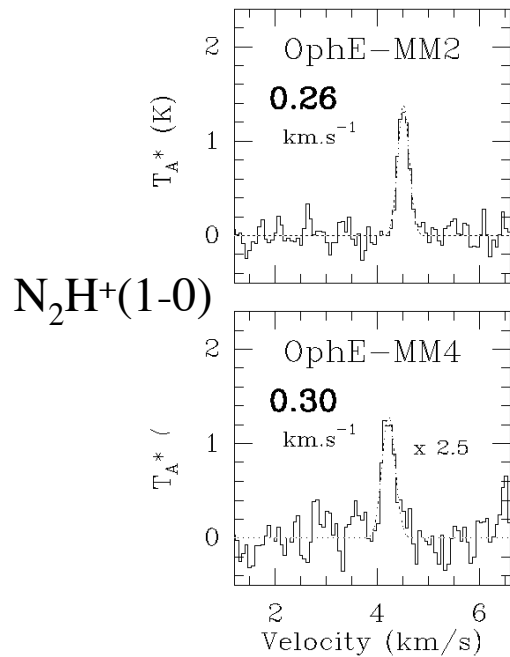
Narrow  $N_2H^+(101-012)$  lines ( $\Delta V < 0.5 \text{ km/s}$ )



Belloche, André, Motte 2003

# Structure en vitesse interne des condensations pré-stellaires

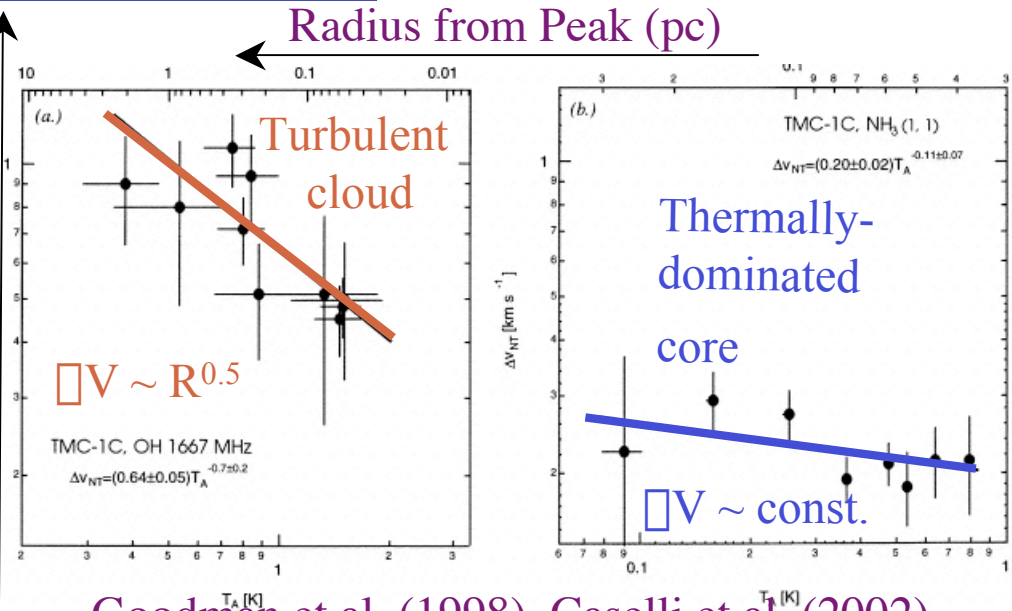
Très peu de turbulence interne



$$\Delta v_{NT} \approx \Delta v_T / 2$$

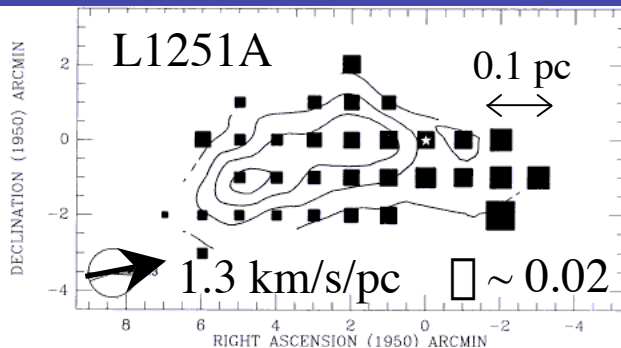
Belloche et al. (2001)

Nonthermal Linewidth (km/s)



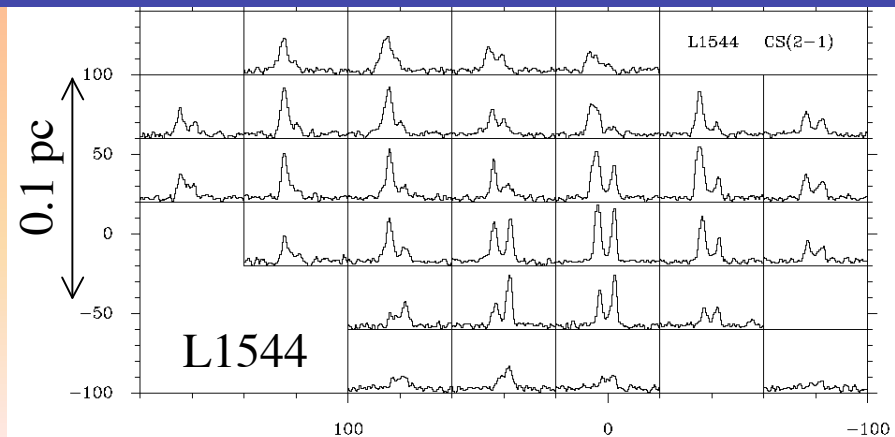
Goodman et al. (1998), Caselli et al. (2002)

Rotation lente, dynamiquement négligeable



Goodman et al. (1993)

Mouvements d'effondrement étendus



Tafalla et al. (1998)

# Résumé des propriétés «globales» des condensations pré-stellaires

- Structures denses ( $n_{\text{H}_2} > 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ), froides ( $T \sim 8\text{-}15 \text{ K}$ ), auto-gravitantes, formant  $\sim 1\text{-}3$  étoiles
- Spectre de masse compatible avec l'IMF des étoiles (e.g. Motte et al. 1998)
- Peu turbulentes ( $\beta_{\text{NT}} < \beta_{\text{T}}$  - e.g. Goodman et al. 1998)
- Partiellement ionisées ( $n_e/n_{\text{H}_2} \sim 10^{-8} - 10^{-6}$  - Caselli et al. '98) et influencées par le champ magnétique (Crutcher '99)
- Souvent organisées le long de filaments et apparemment elles-mêmes de forme allongée ou «tri-axiale» plutôt qu'aplatie (Myers et al. 1991, Basu 2000)
- En rotation lente ( $\beta = E_{\text{rot}}/E_{\text{grav}} \sim 0.02$  - Goodman et al. '93) et parfois déjà en effondrement (e.g. Tafalla et al. '98)
- Mécanisme de formation mal compris