

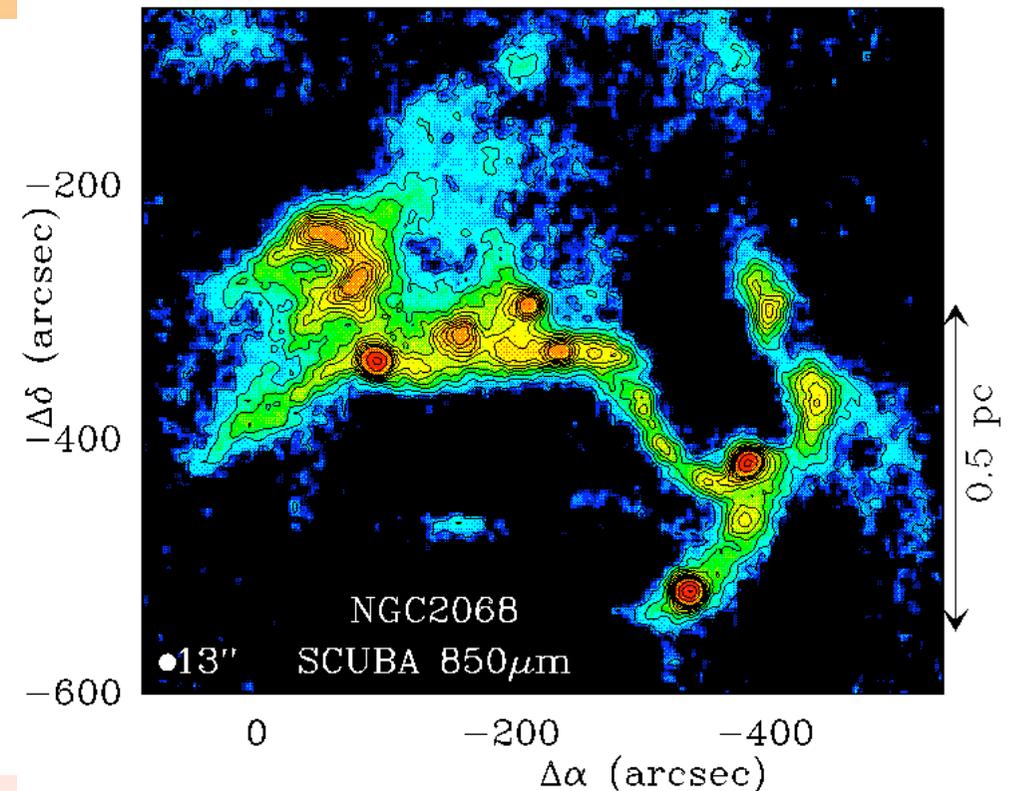
Des nuages moléculaires aux étoiles :

II - Structure interne et effondrement des cœurs denses

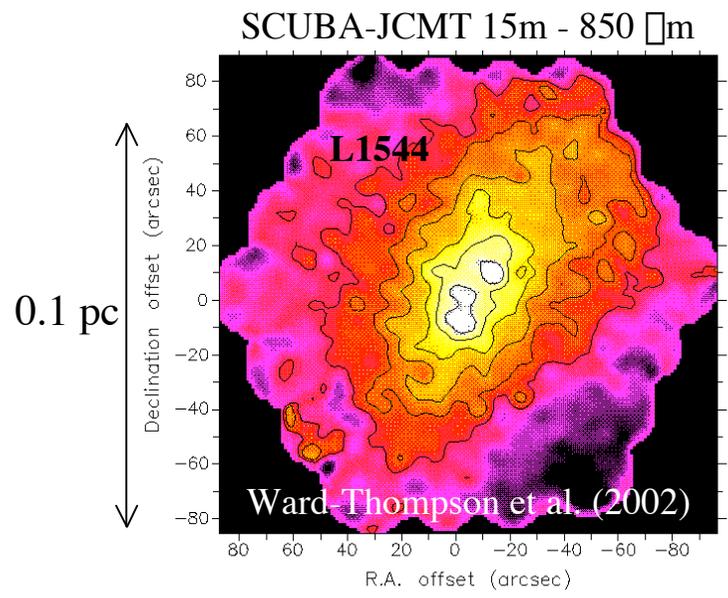
Philippe André, CEA/SAp Saclay,
Patrick Hennebelle, LERMA/ENS Paris

Plan de la partie observationnelle :

- Structure en densité des cœurs pré-stellaires
- Conséquences pour l'évolution protostellaire
- Structure en vitesse et comparaison avec les modèles d'effondrement

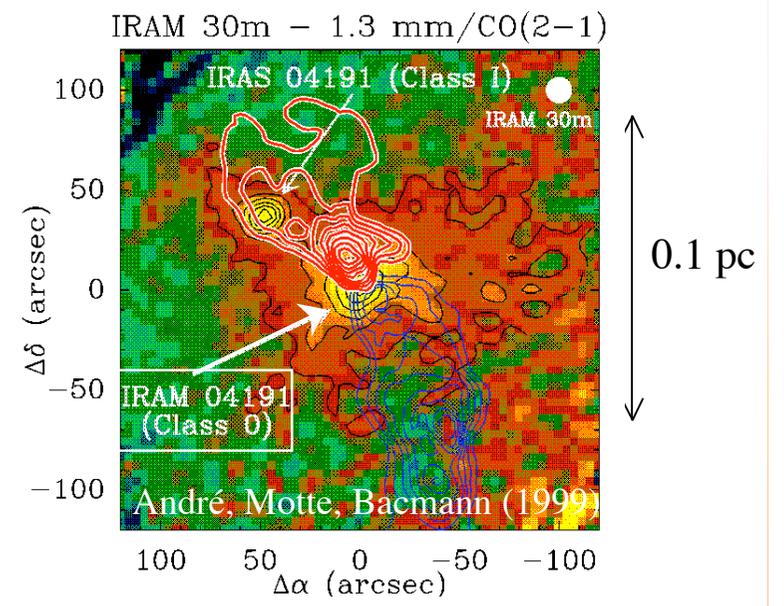


Prestellar Cores (t < 0)
The progenitors of protostars



Representative of the collapse initial conditions

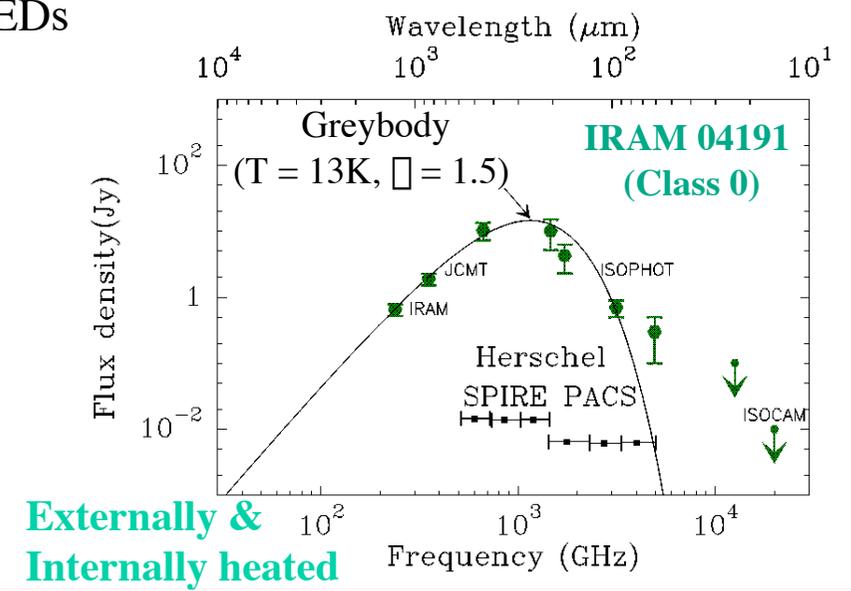
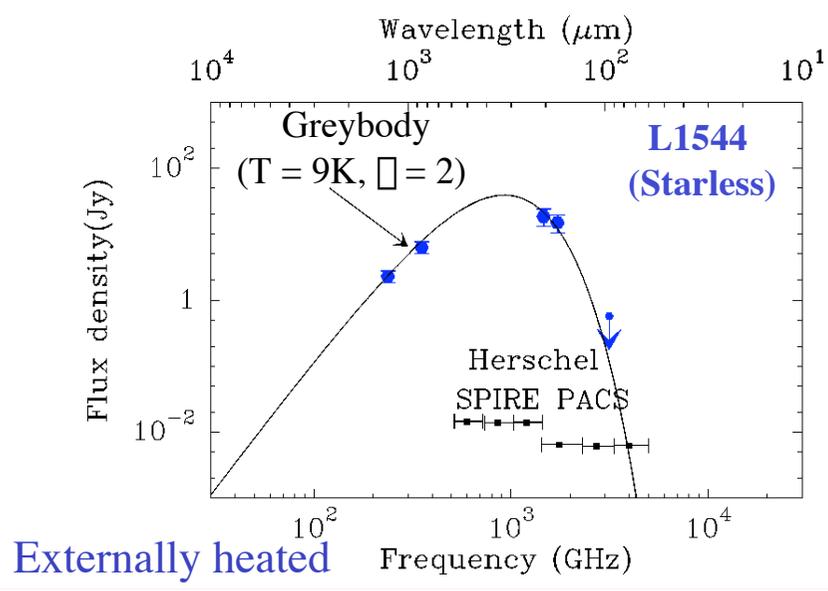
Class 0 protostars (t > 0)
Protostars in the build-up phase



Gravitationally bound ($M \sim M_{VIR}$, $M_* = 0$)

Massive envelopes ($M_{env} > M_*$)

Cold SEDs



Structure en densité des cœurs pré-stellaires ($t < 0$)

L1689B vu

en absorption par ISOCAM à 7 μ m

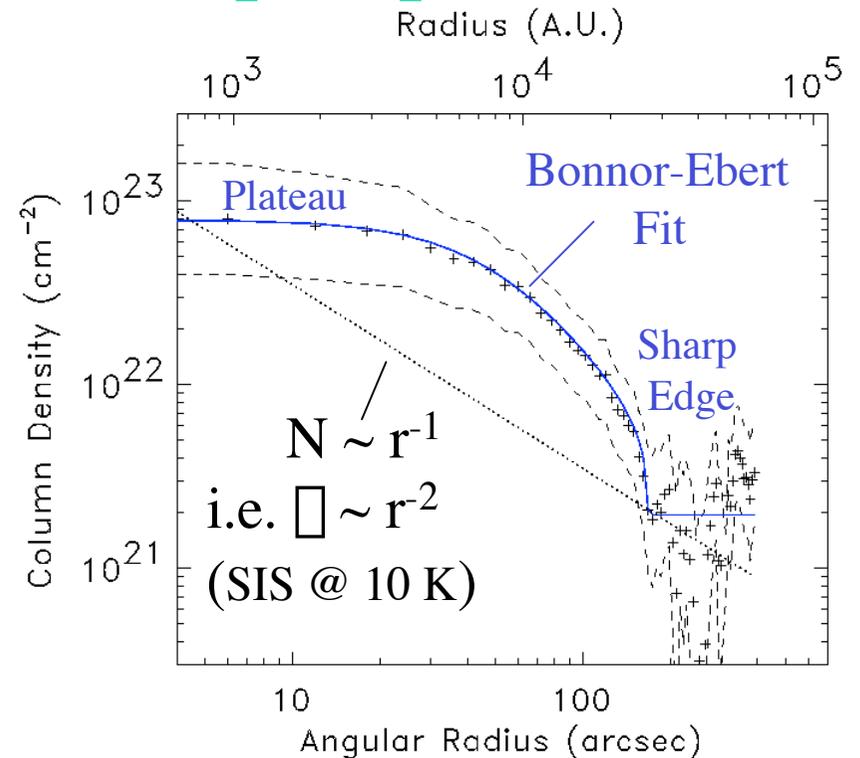
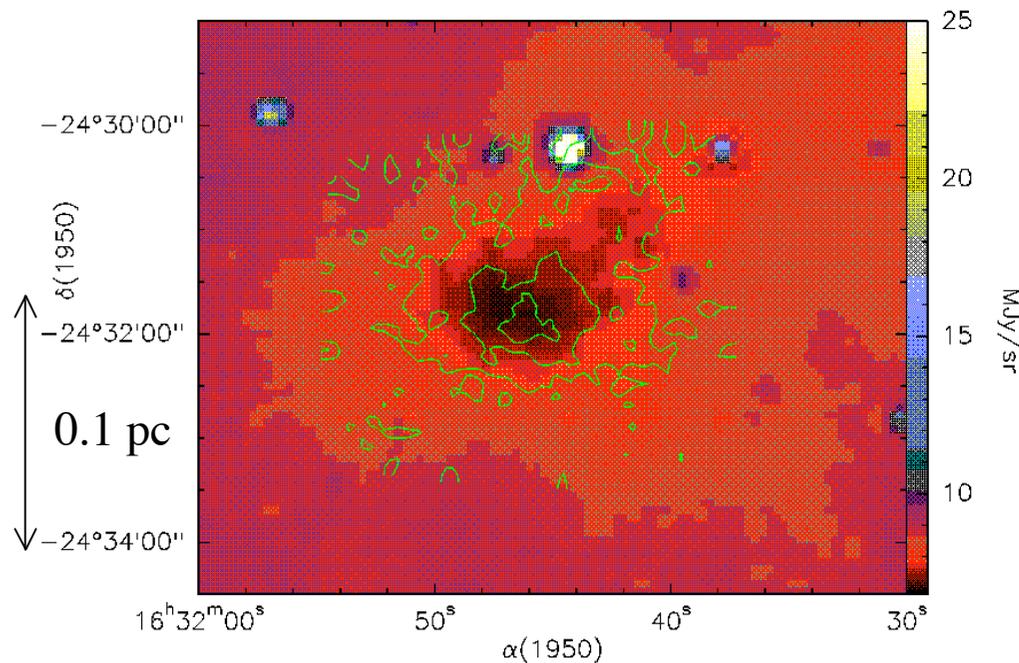
en émission par IRAM (30m) à 1.3mm

$$(I_{\text{obs}} = I_{\text{back}} e^{-\tau_{\text{abs}}} + I_{\text{fore}})$$



$$(I_{\square} \sim N_{\text{H}_2} \times B_{\square}(T) \tau_{\square})$$

Profil de densité de
colonne



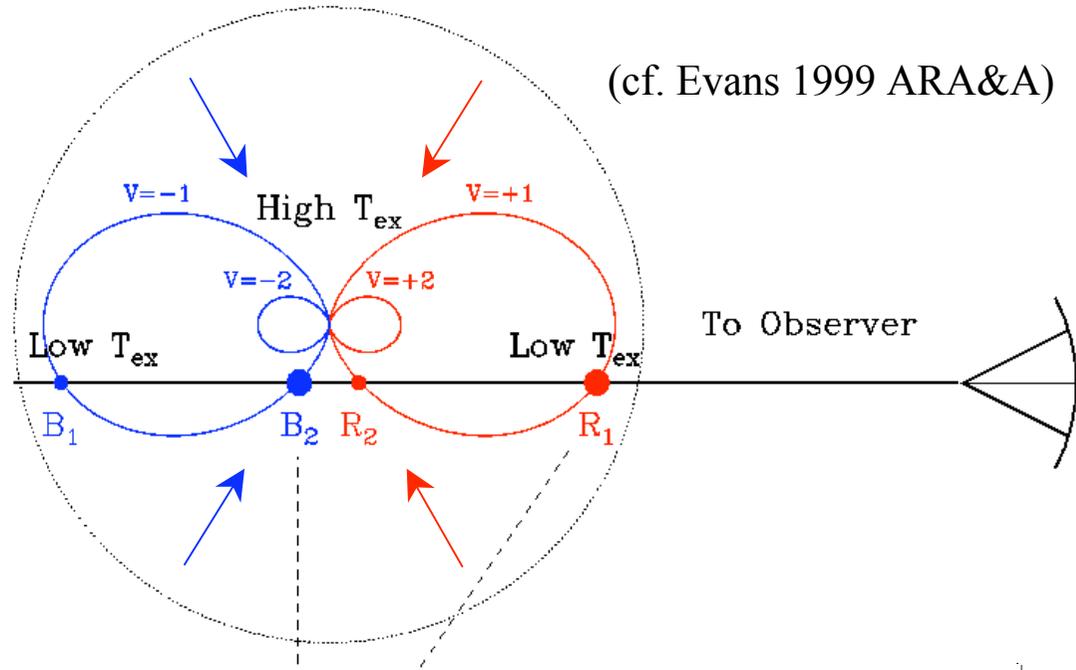
Ward-Thompson et al. 1999; Bacmann et al. 2000

- Forme des profils de densité compatible avec modèles de sphères autogravitantes isothermes confinées par pression extérieure. (cf. Alves et al. 2001 pour B68)
- Les conditions initiales de l'effondrement diffèrent de la sphère singulière isotherme (SIS) du modèle standard de Shu et al. (1987).

Effondrement dans les coeurs pré-stellaires

Asymétrie bleue caractéristique de mouvements de contraction

observée dans 50% des coeurs pré-stellaires isolés (e.g. Gregersen & Evans 2000)

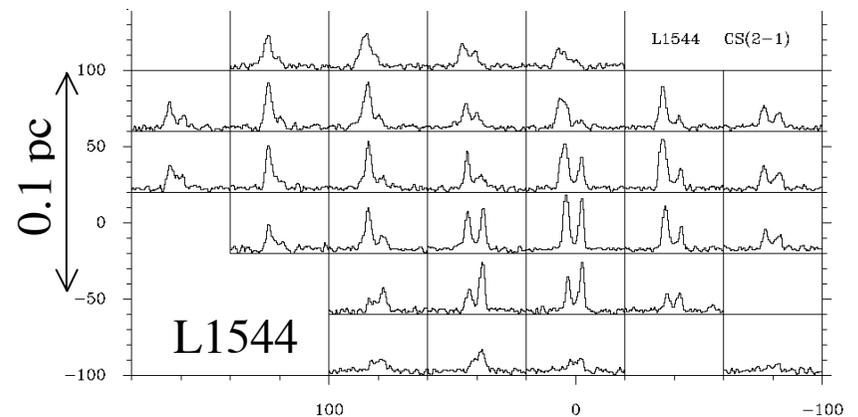
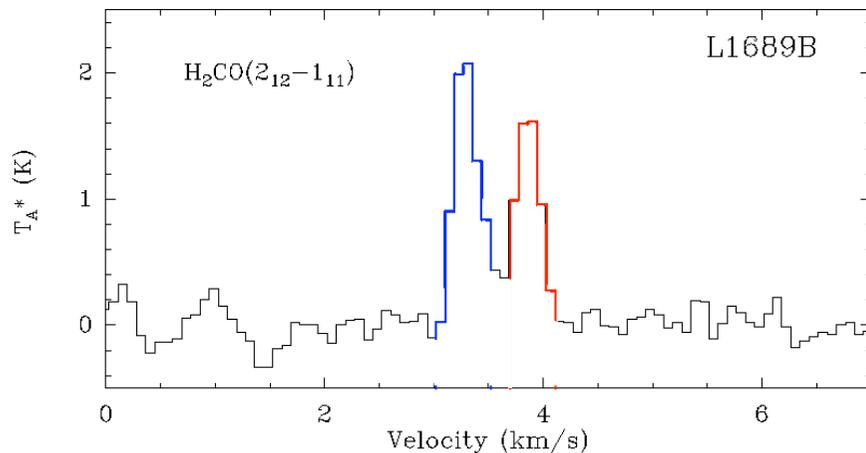


- Raie optiquement épaisse ($\tau \gg 1$)
- Gradient de T_{ex} vers l'intérieur

$$T_{ex}(B_2) > T_{ex}(R_1)$$

Pic \downarrow Pic
bleu $>$ rouge

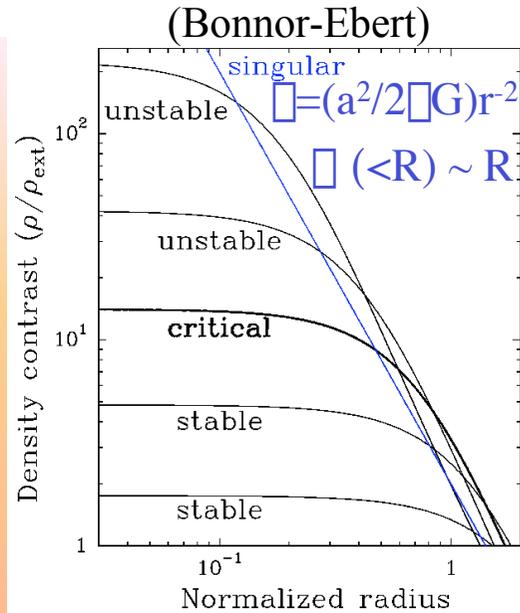
Effondrement étendu



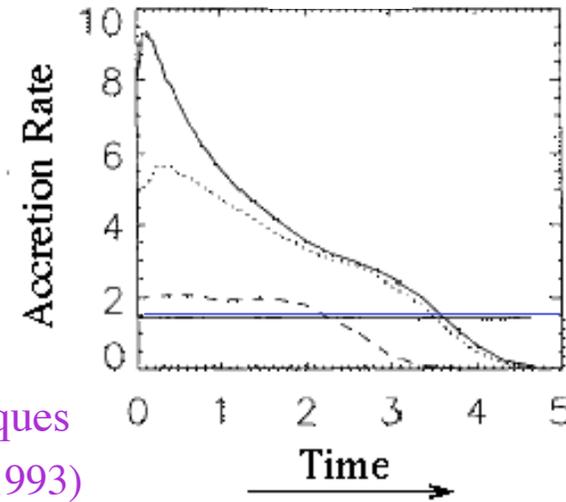
Tafalla et al. (1998)

Conséquences pour l'évolution protostellaire

Profil de densité initial

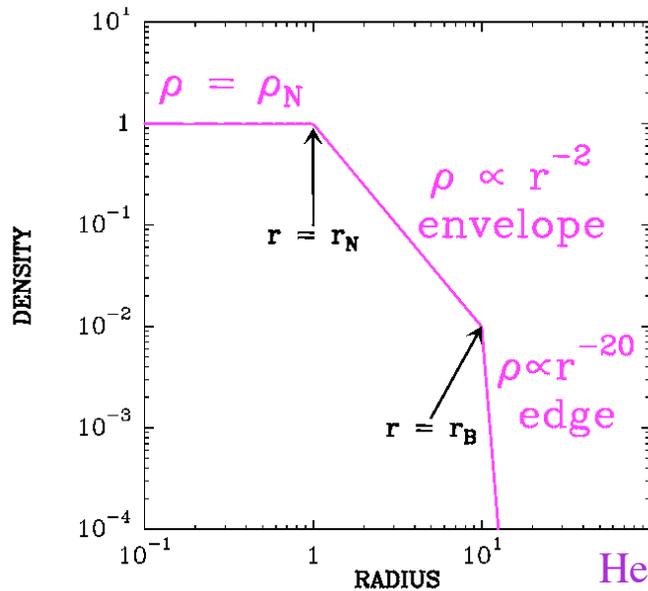


Evolution du taux d'accrétion



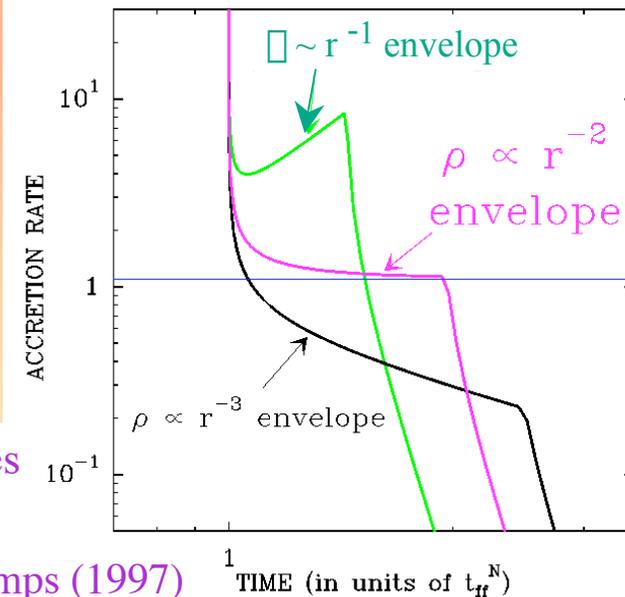
$\sim a^3/G$
(Shu 77)

Simulations numériques
Foster & Chevalier (1993)



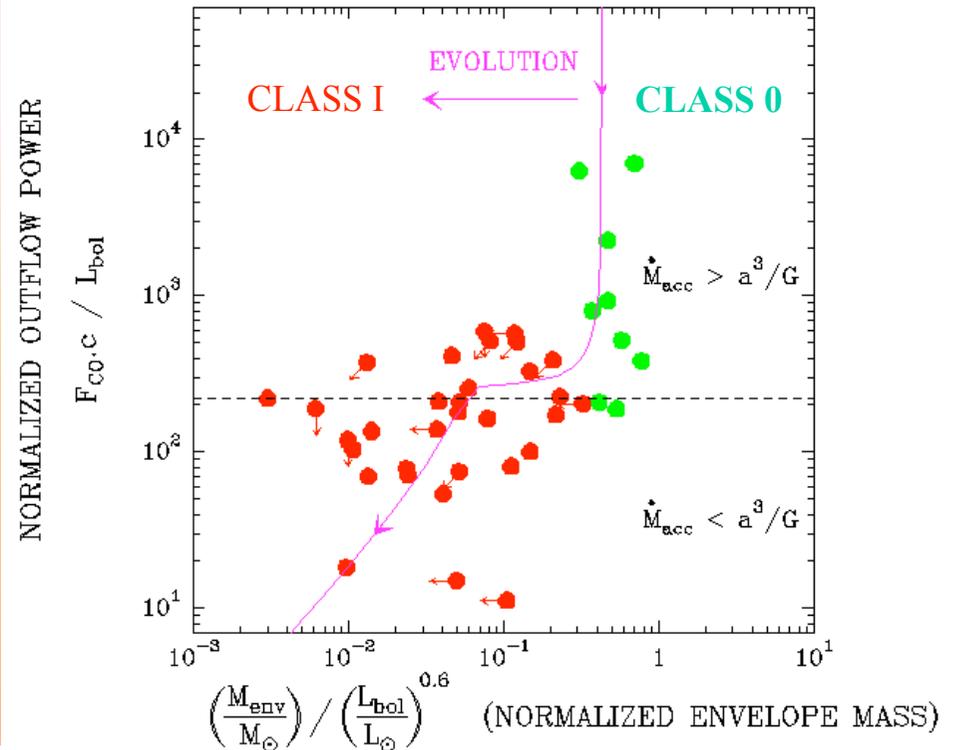
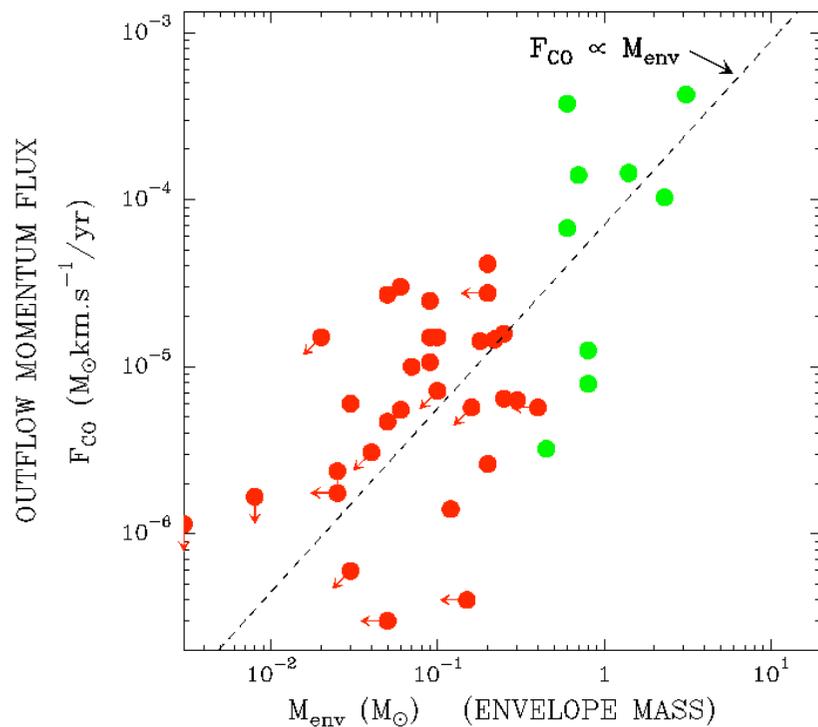
Calculs analytiques
(sans pression)

Henriksen, André, Bontemps (1997)



$\sim a^3/G$

Décroissance de l'accrétion/éjection



(Bontemps et al. 1996, Henriksen et al. 1997)

$$F_{\text{CO}} = f_{\text{ent}} \times (\dot{M}_{\text{jet}} / \dot{M}_{\text{acc}}) V_{\text{jet}} \times \dot{M}_{\text{acc}} \quad ; \quad \dot{M}_{\text{jet}} \sim 0.1 \dot{M}_{\text{acc}}$$

(e.g. Konigl & Pudritz 2000)

$$\langle \dot{M}_{\text{acc}} \rangle \sim 10^{-5} M_{\odot} / \text{an} \text{ (Classe 0)} \rightarrow \langle \dot{M}_{\text{acc}} \rangle \sim 2 \times 10^{-7} M_{\odot} / \text{an} \text{ (Classe I)}$$

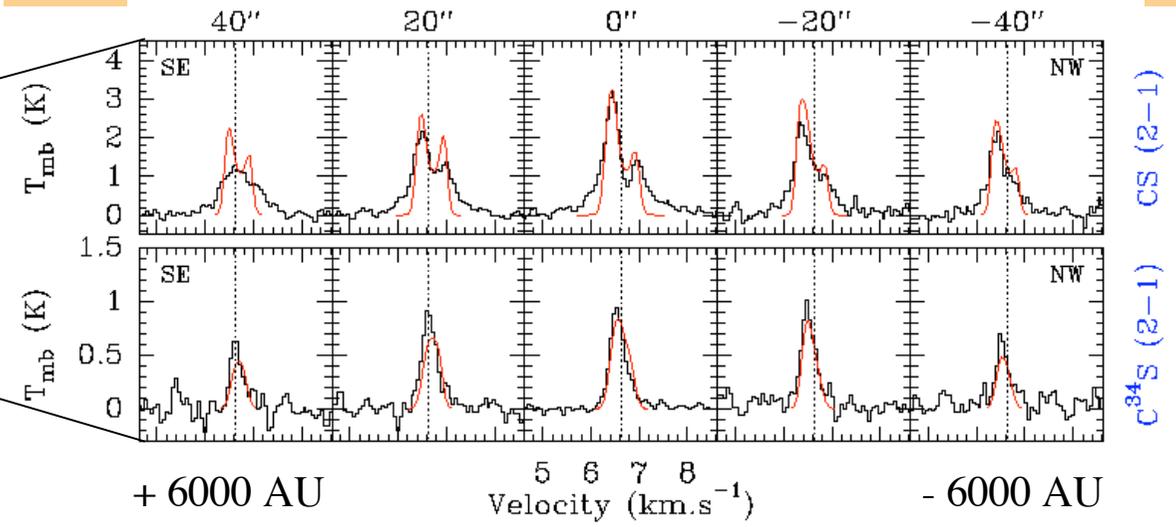
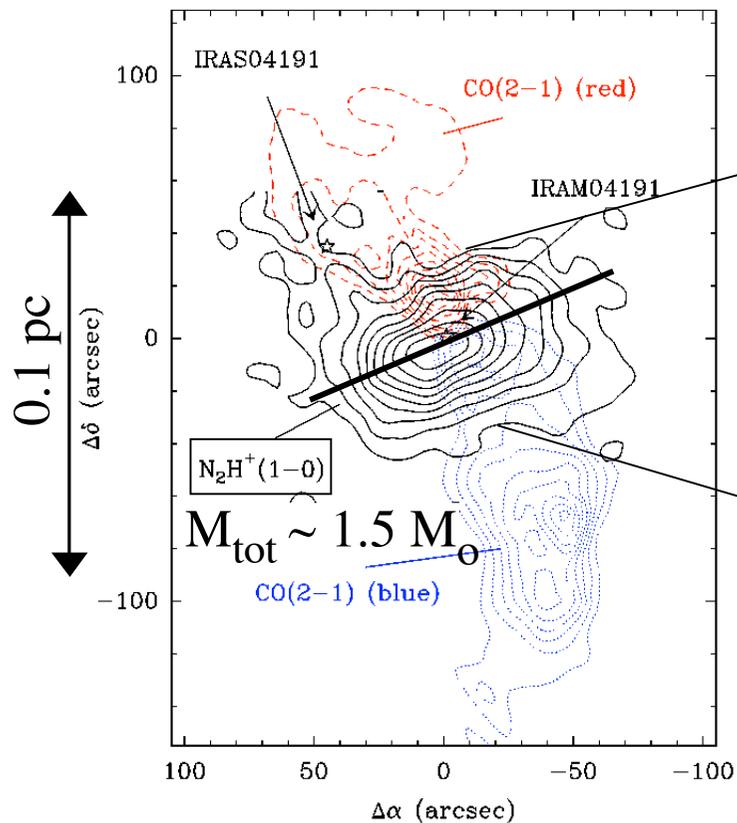
$$\text{Scénario: } F_{\text{CO}} \sim M_{\text{env}} \rightarrow \dot{M}_{\text{acc}} = -\dot{M}_{\text{env}} = M_{\text{env}} / \tau \rightarrow M_{\text{env}} = M_{\text{frag}} e^{-t/\tau}$$

Structure en vitesse des enveloppes protostellaires

Exemple : IRAM 04191 dans
le Taureau

Cœur dense bien visible en N_2H^+

Signature de l'effondrement sur toute
l'étendue du cœur dense protostellaire



A. Belloche : Modélisation des spectres avec le code
de transfert radiatif MAPYSO (Blinder & Despois)

$$\rightarrow V_{\text{inf}} \sim 0.15 \text{ km/s} ; \dot{M}_{\text{inf}} \sim 3 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$$

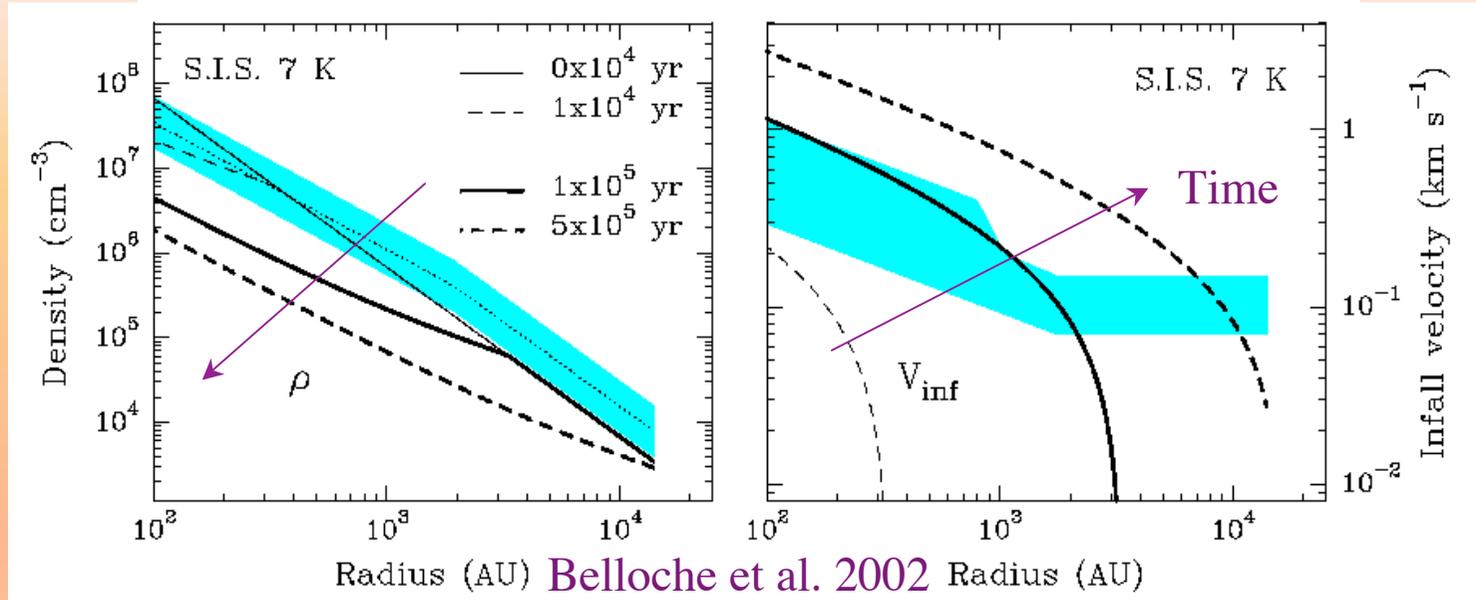
$$\lesssim a_s \quad \sim 2-3 \times a_s^3 / G$$

André, Motte, Bacmann 1999

Belloche, André, Despois, Blinder 2002

Contraintes quantitatives sur les modèles d'effondrement (1)

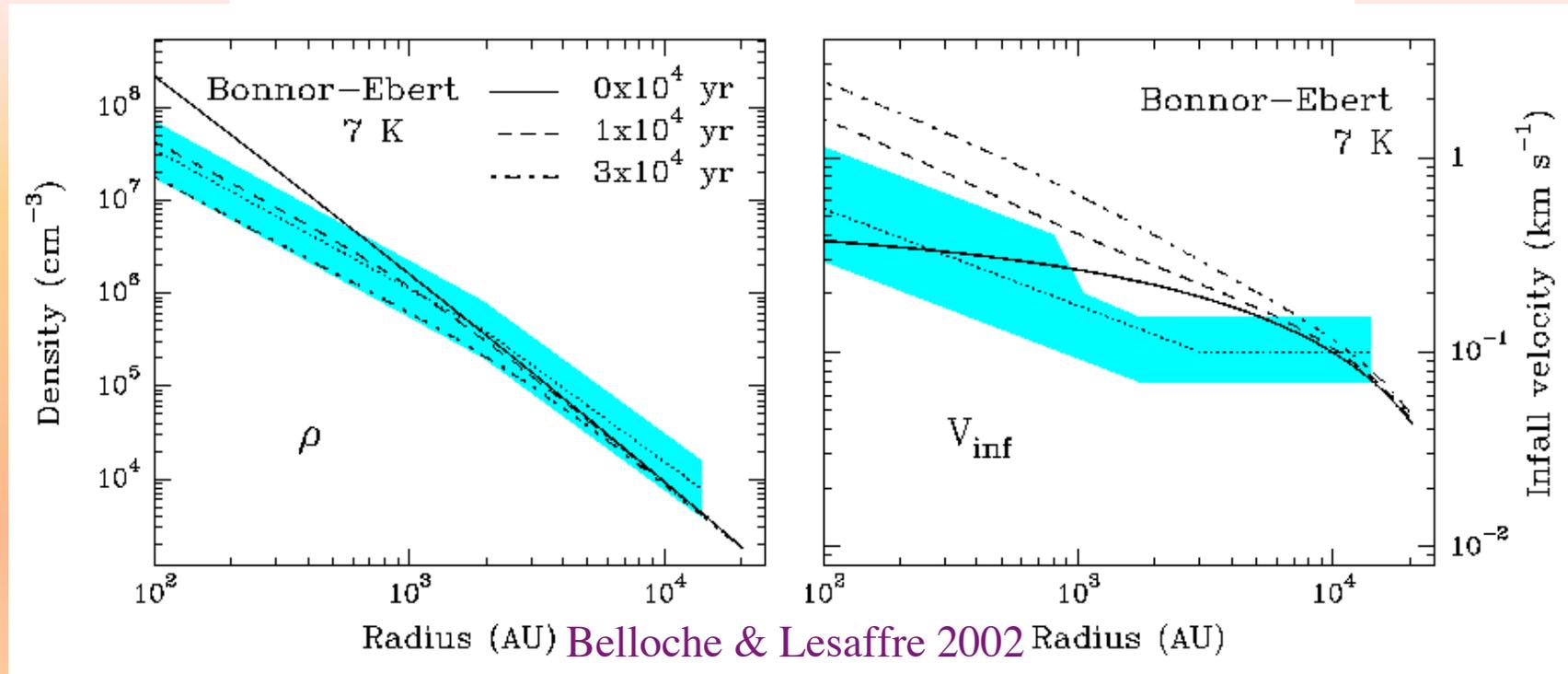
Profils de densité et de vitesse d'effondrement



- Profils de densité et de vitesse incompatibles avec un effondrement de type «inside-out» (Shu 1977)
- Même conclusion à partir de l'effondrement étendu observé sur les coeurs pré-stellaires (e.g. Tafalla et al. 1998)

Contraintes quantitatives sur les modèles d'effondrement (2)

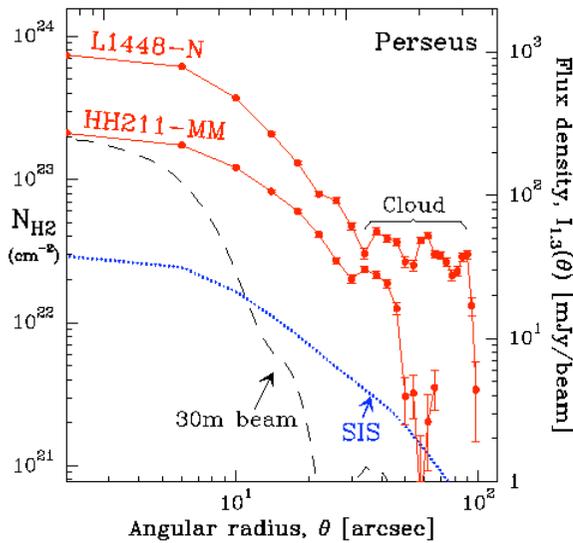
Profils de densité et de vitesse d'effondrement



- Meilleur accord avec les modèles d'effondrement isothermes partant de sphères de Bonnor-Ebert en équilibre hydrostatique stable (e.g. Foster & Chevalier 1993; Lesaffre 2002; Hennebelle et al. 2003)

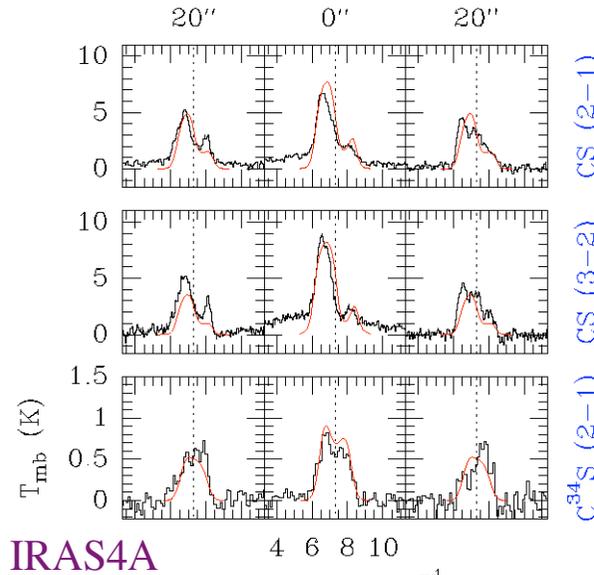
Effondrement plus violent dans les proto-amas (e.g. \square Oph, Persée)

Enveloppes plus denses : au stade Classe 0, ~ 3 -12 fois plus denses qu'une SIS à $T = 10$ K



(Motte & André 2001)

Vitesses d'effondrement supersoniques



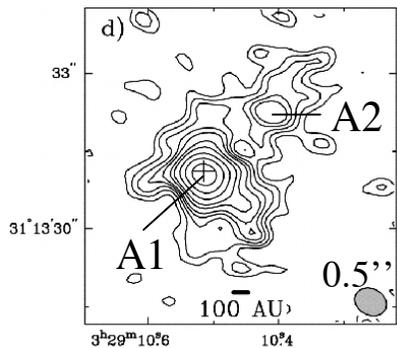
IRAS4A

$V_{\text{inf}} \sim 0.7$ -1.3 km/s, $\dot{M}_{\text{inf}} \sim 1$ -5 $\times 10^{-4}$ M_{\odot} /yr à 2000 AU (Di Francesco et al. 2001; Belloche et al., in prep.)

→ Taux d'accrétion très élevés ($\gg a^3/G$) qui peuvent s'expliquer dans le cas d'une augmentation forte et rapide de la pression extérieure

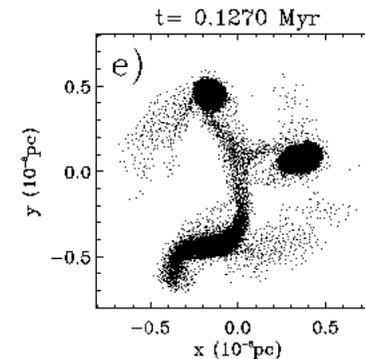
↓ Favorise la formation des systèmes multiples

IRAS4A est une protobinaire ~ 600 AU



Obs. BIMA - 2.7 mm (Looney et al. 2000)

Simulations SPH d'effondrement avec compression et rotation: Hennebelle et al. 2004



Spéculations sur les conditions initiales de l'effondrement

Conditions initiales
et déclenchement de
l'effondrement

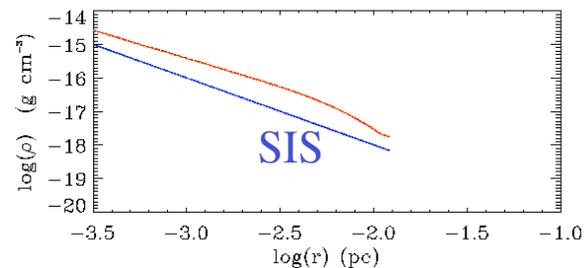
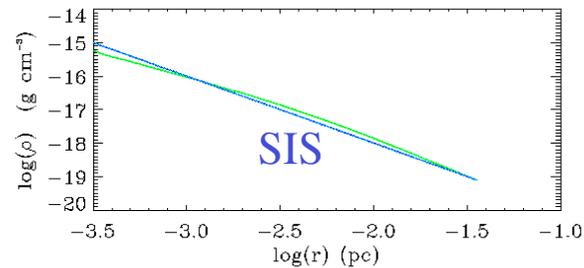
Formation stellaire 'isolée' (Taureau)

- Condensation proche de l'équilibre (cf. Bonnor-Ebert) mais magnétisée et 'super-critique'
- Effondrement 'spontané', influencé par le champ magnétique

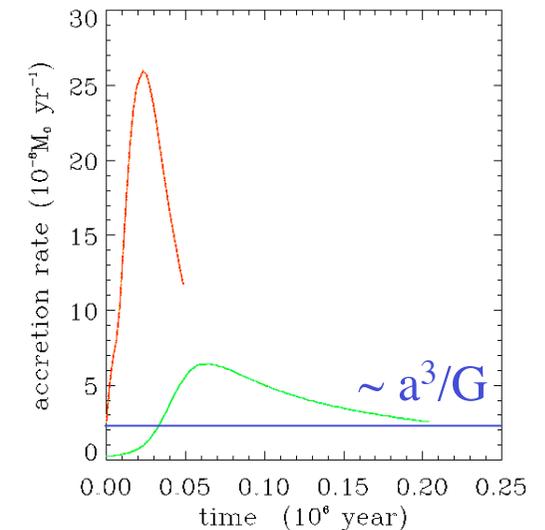
Formation stellaire 'en amas' (Persée)

- Condensation hors équilibre ?
- Effondrement induit par compression extérieure

Profil de densité au
moment de la formation
de la proto-étoile



Evolution du taux
d'accrétion



Simulations numériques SPH
Hennebelle, Whitworth et al. (2003)