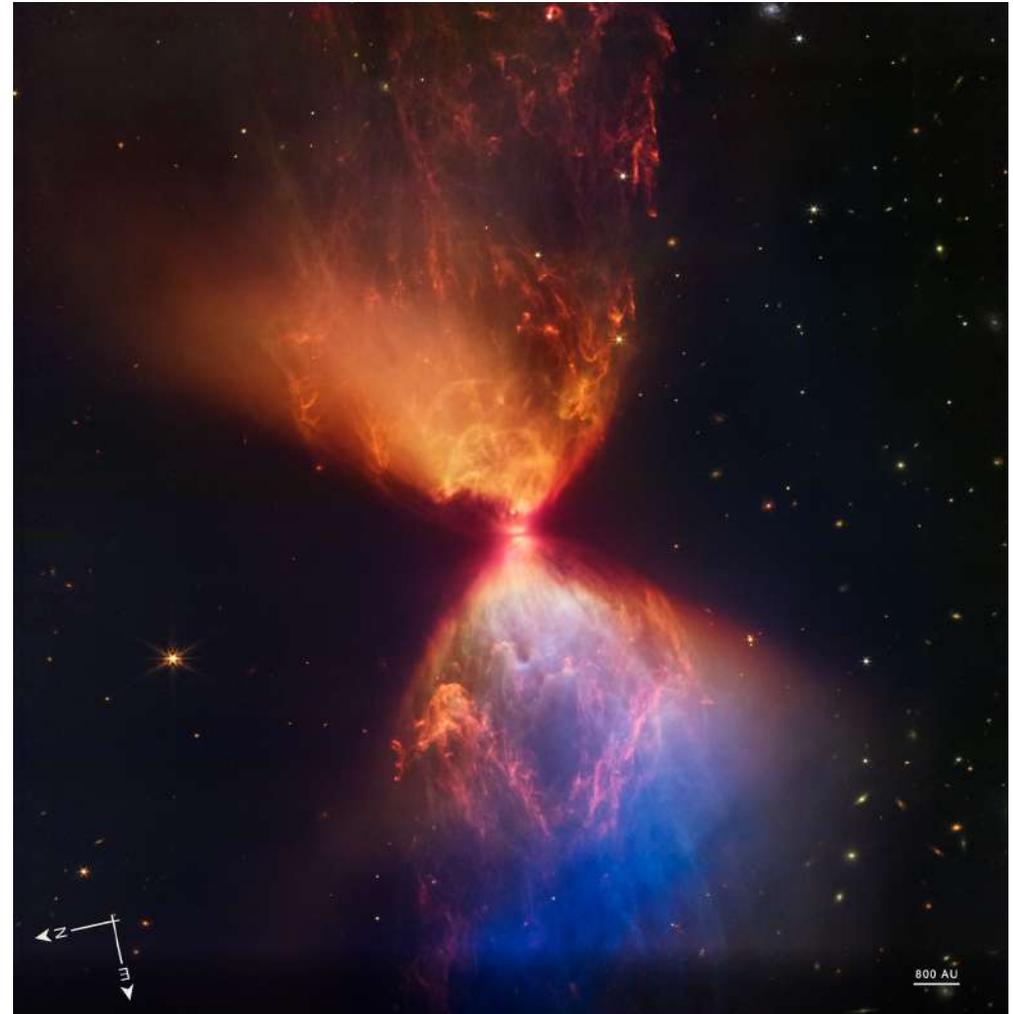
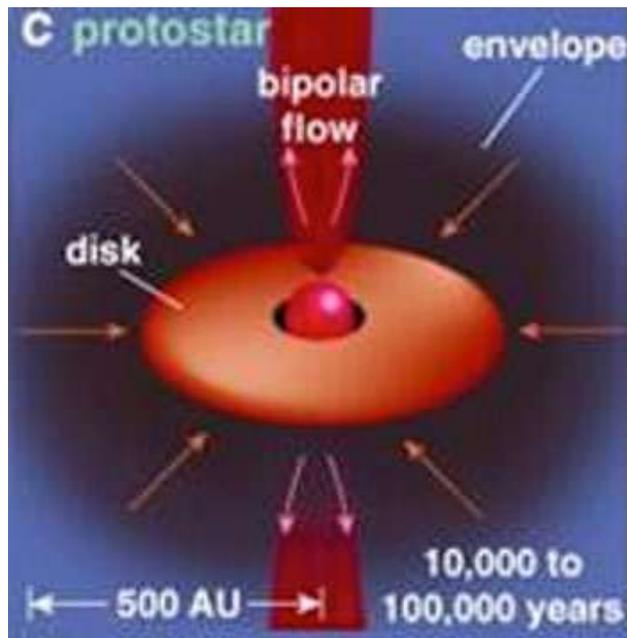


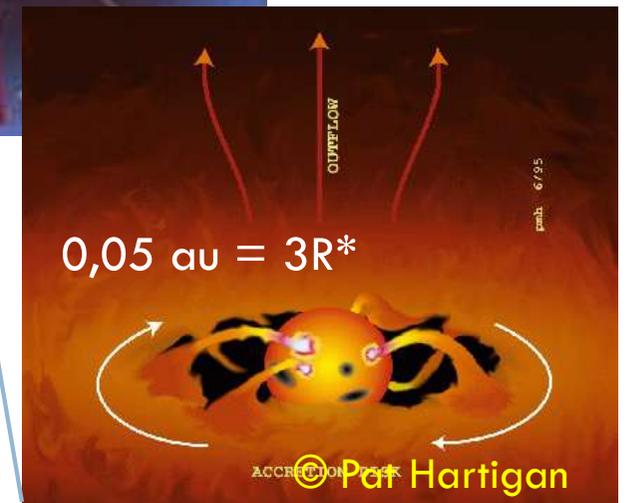
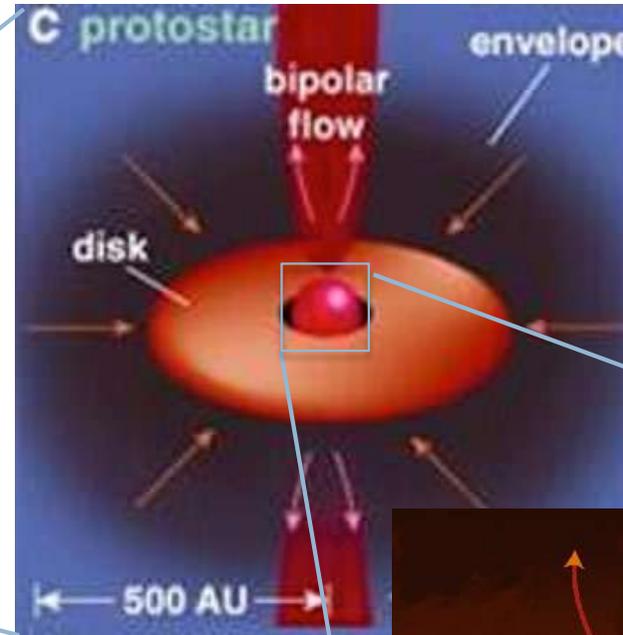
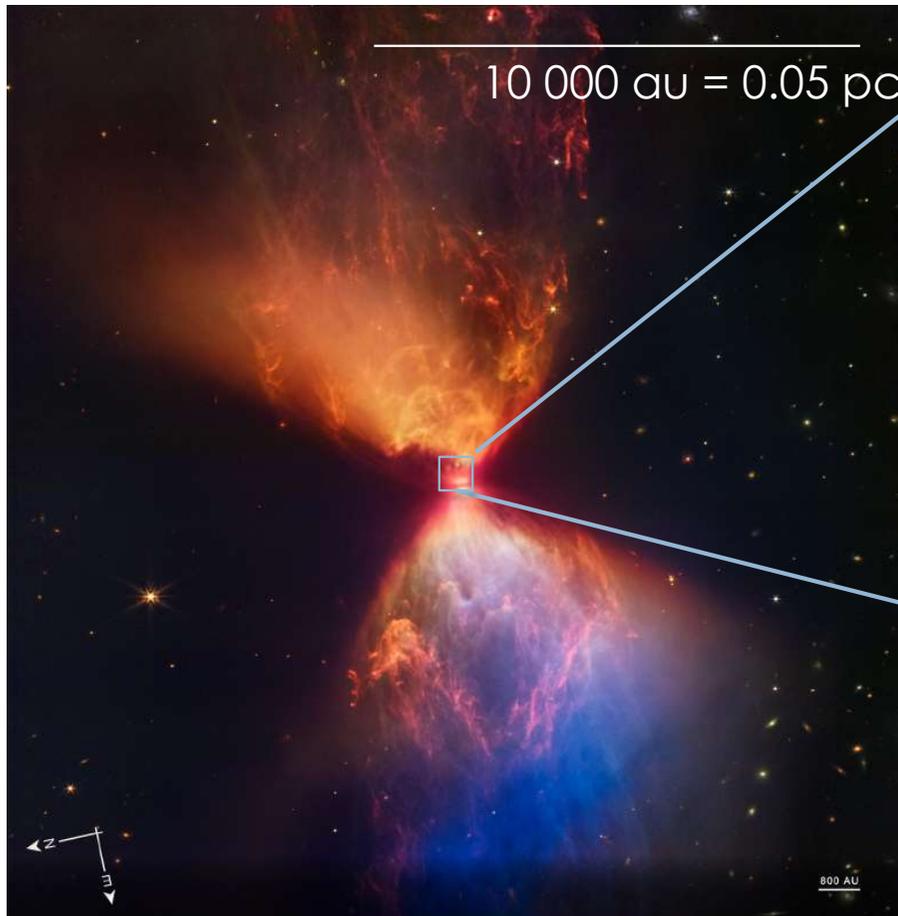
Protoétoiles et flots bipolaires

S. Cabrit

LERMA, Observatoire de Paris-PSL



Une vaste gamme d'échelles
($0.05\text{pc} = 10\,000\text{ au} = 2\,000\,000\text{ R}_{\odot}$)



Plan du séminaire

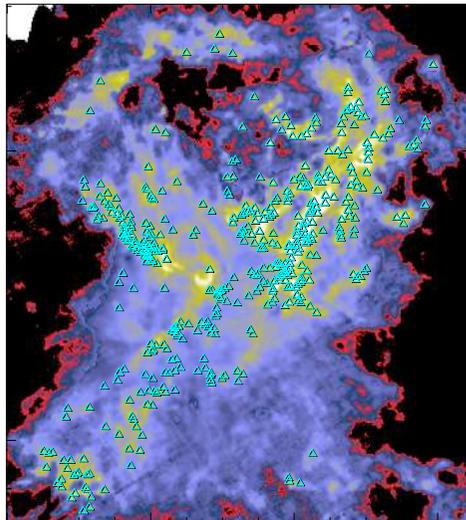


- Le problème de l'inefficacité de formation stellaire
- Le problème du moment cinétique
- Les phénomènes d'éjection: solutions aux deux problèmes ?
 - ▣ Flots bipolaires moléculaires
 - ▣ Jets de plasma à haute vitesse
 - ▣ Vents de disque
- Conclusions et perspectives

Taux de formation d'étoiles de faible masse

A haute résolution, dans notre Galaxie
Nuages résolus (Orion, Taureau..)
Étoiles et proto-étoiles détectées
en infrarouge → Pente 2.3

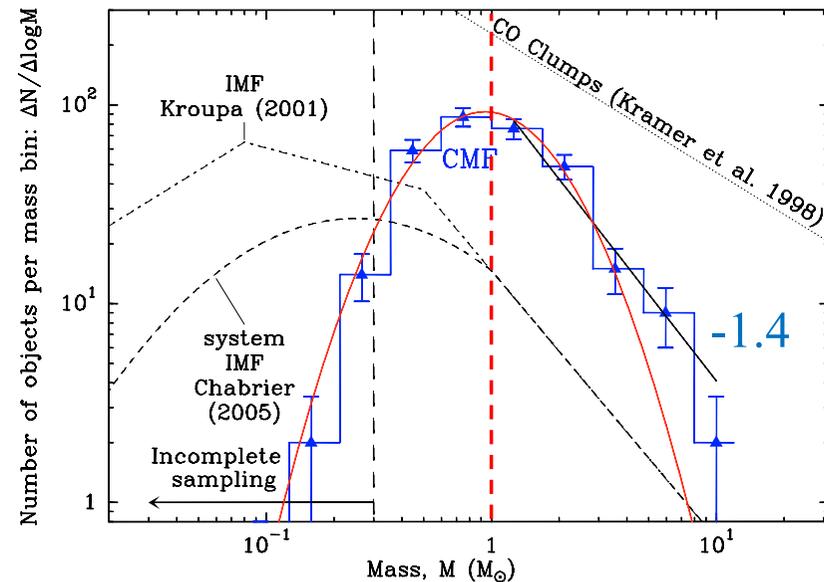
Efficacité de formation d'étoiles
dans les nuages denses 3-6%
25% dans les cœurs



Aquila avec Herschel



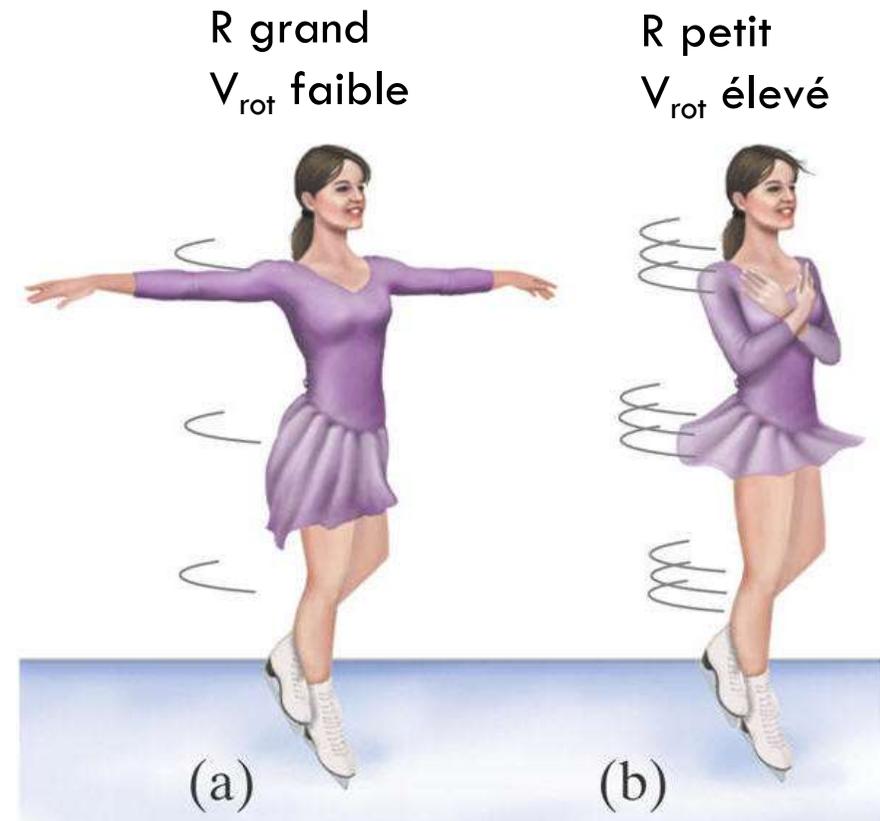
CMF = distribution en masse des cœurs
préstellaires individuels ($\sim 0,05\text{pc} = 10000\text{ au}$)
IMF = distribution en masse des étoiles

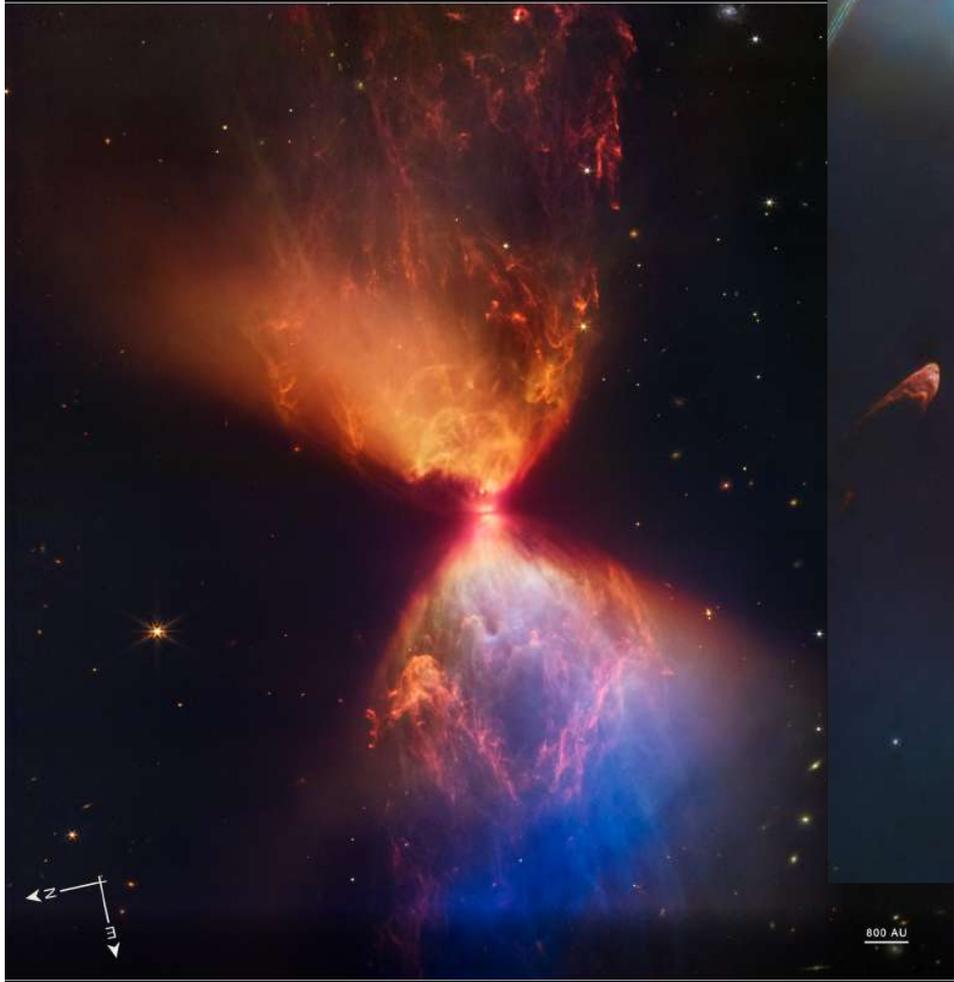


Könyves+2010

Le problème du moment cinétique

- $F_{\text{gravité}} = GM_{\star}/R^2$
- $F_{\text{centrifuge}} = V_{\text{rot}}^2/R$
- Moment cinétique: $J = V_{\text{rot}} R$ conservé
 - $F_{\text{centrifuge}} = J^2/R^3$
 - $R_{\text{cent}} = J^2 / GM_{\star}$
- Si cœur initial en rotation solide, $R_{\text{cent}} \propto t^3$
 - Formation d'un disque
 - comment accréter sur l'étoile ?



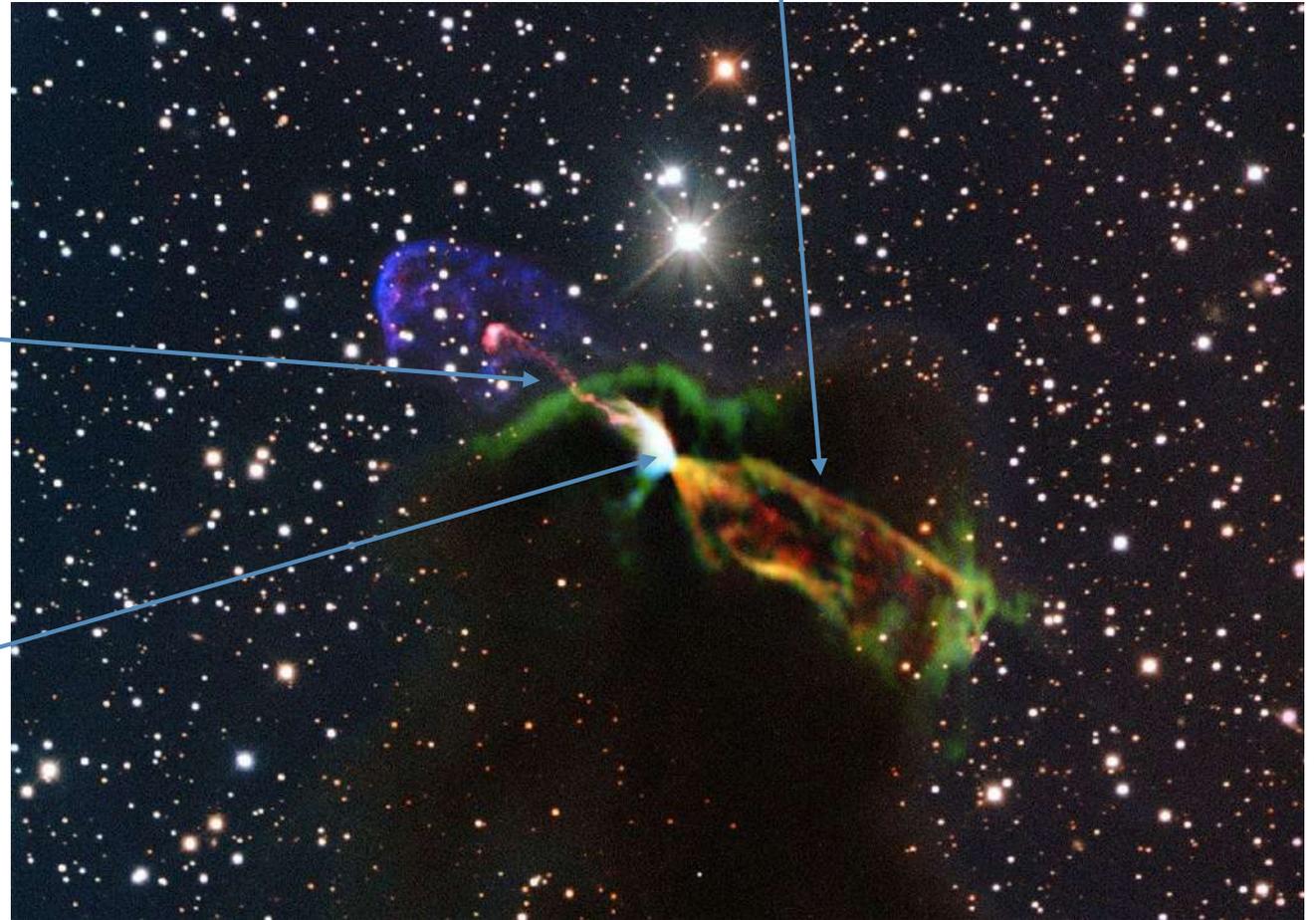


De multiples signatures d'éjection

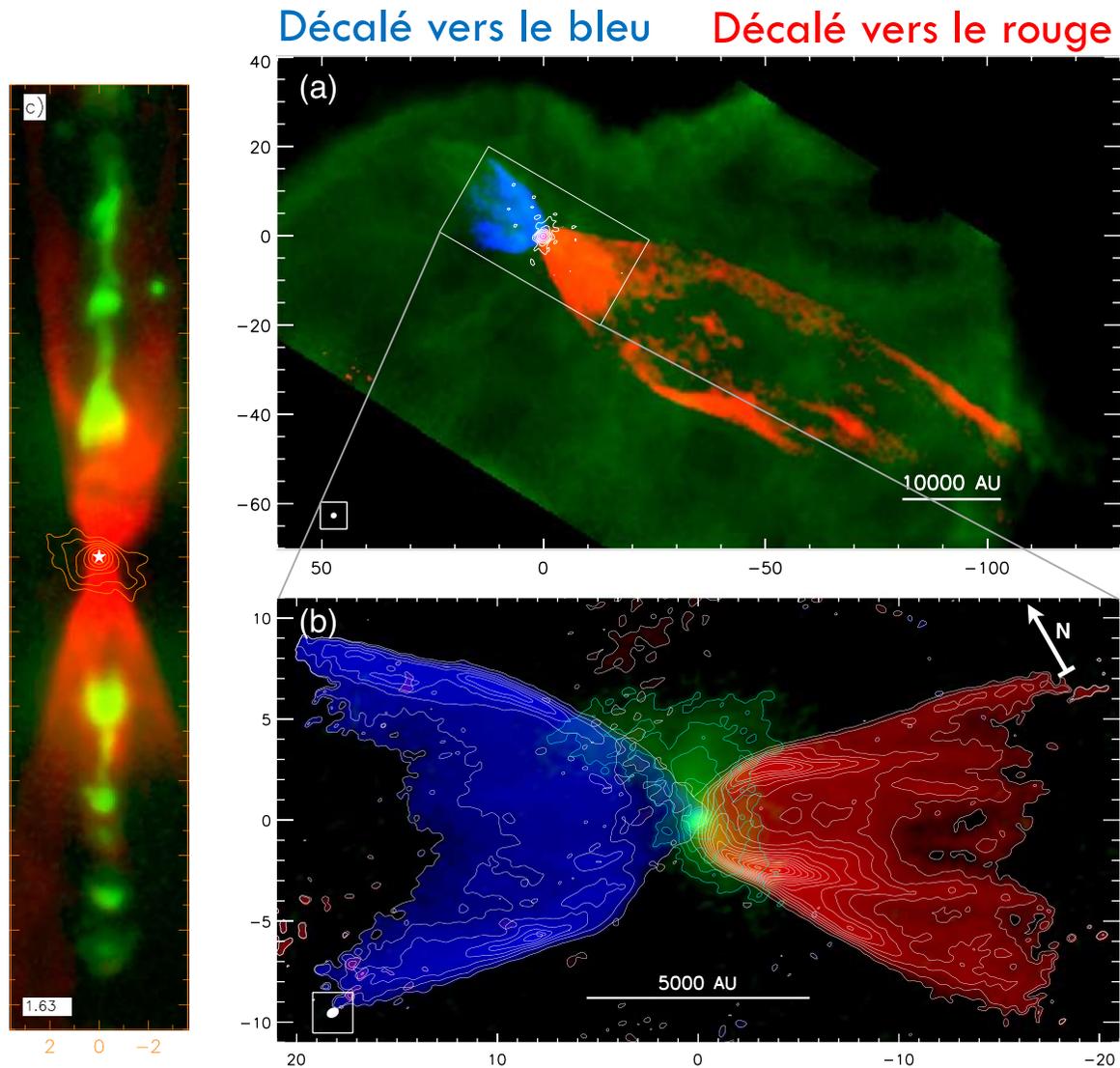
1) Les flots CO, $V < 10$ km/s

2) Les jets de plasma, $V > 100$ km/s

3) Les vents de disque (?)



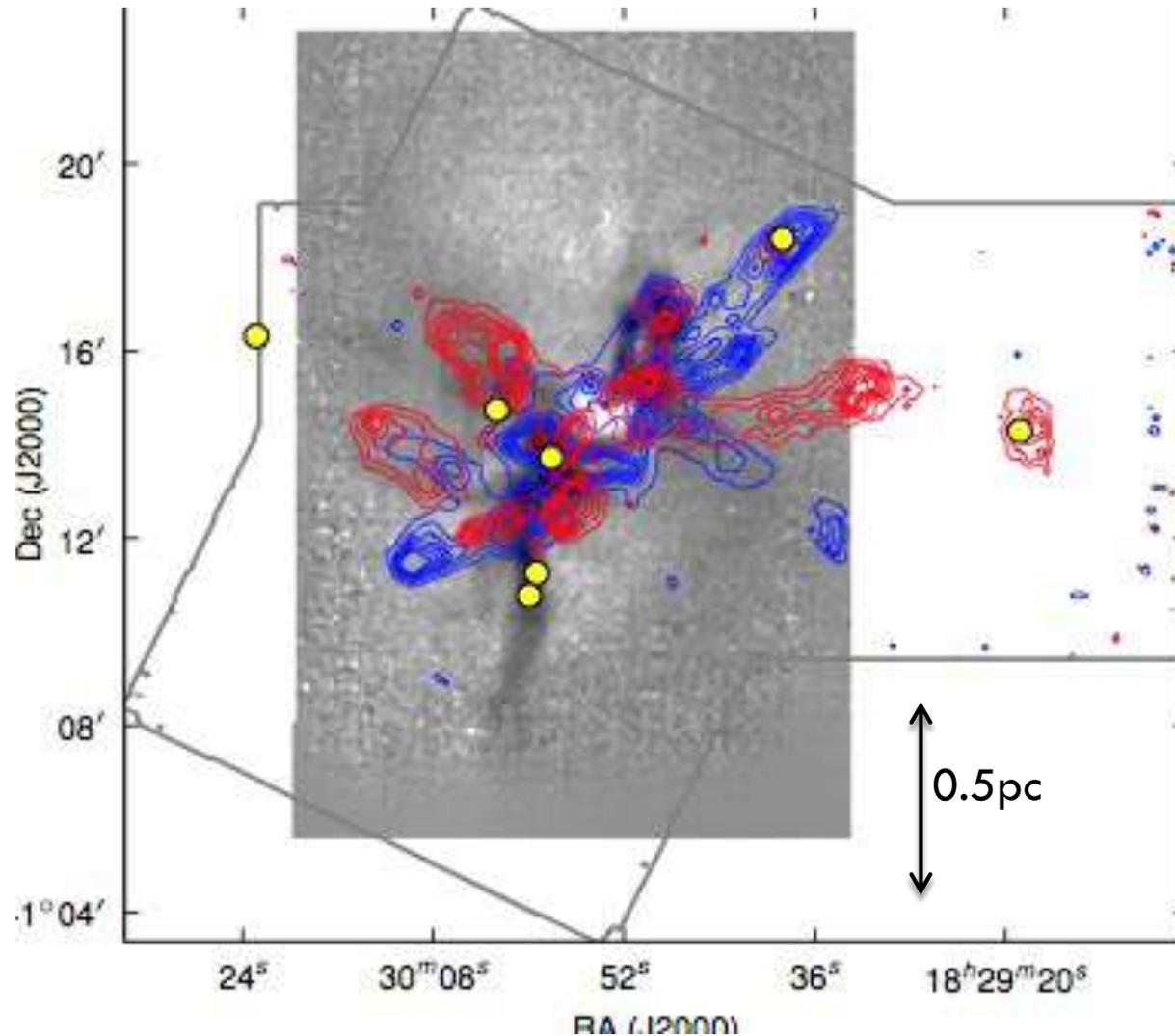
Flots bipolaires moléculaires



Découverts par effet Doppler de la molécule CO

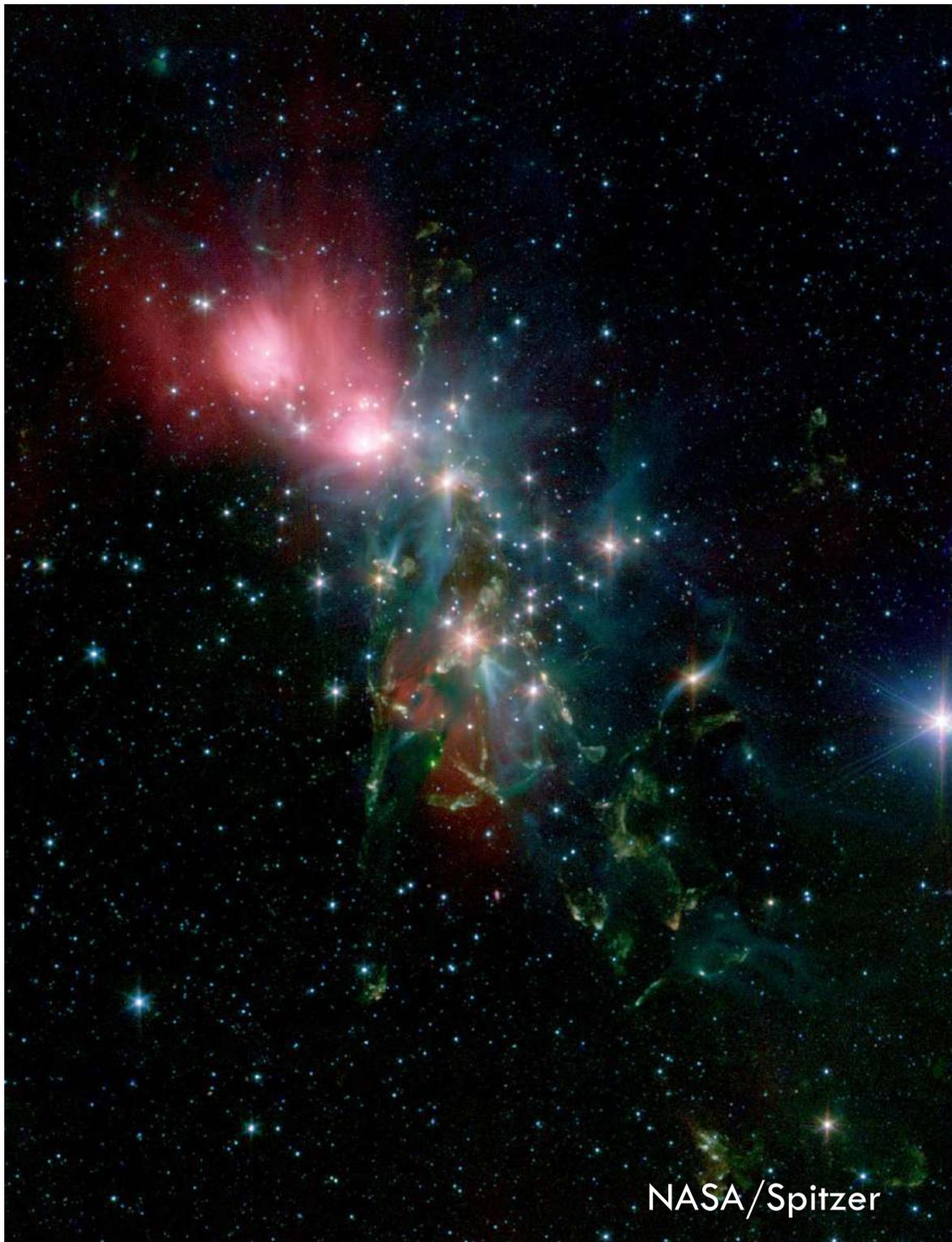
- $V \sim 1-10$ km/s
- $T \sim 10$ K
- Lents, massifs, froids, et creux
 - **matière ambiante entraînée** (par un vent protostellaire collimaté)

Flots bipolaires moléculaires



- Nombreux & très étendus → qq pc
- Impulsion totale ~ dissipation de la turbulence
- **Agent de régulation de la formation stellaire ?**

Superposition de flots dans le nuage de Serpens
(Graves et al 2010)

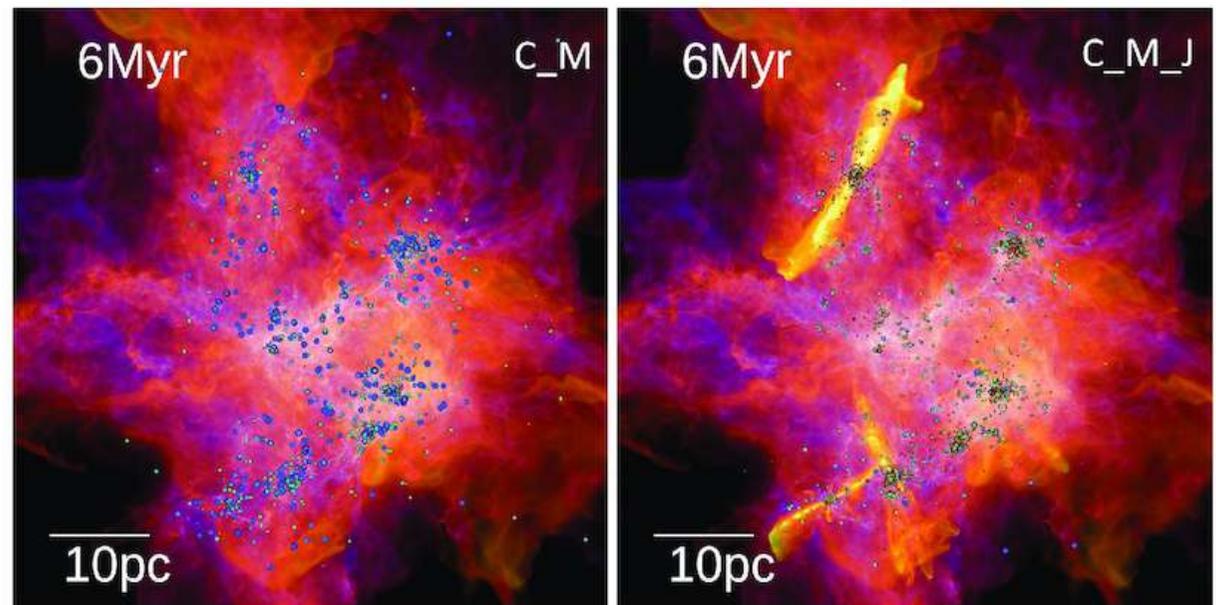


Flots entrecroisés dans
l'amas NGC1333

Rétroaction sur la formation stellaire

- ▣ Réduit le nombre et la masse des étoiles formées
 - ▣ Meilleur accord avec l'IMF et la SFE observés
- (cf. séminaire de P. Hennebelle sur l'IMF)

Simulation d'un nuage magnétisé turbulent (Guszejnov et al. 2021)



Sans flots

Avec flots

Luminosité = densité de surface Σ (M_{\odot}/pc^2)

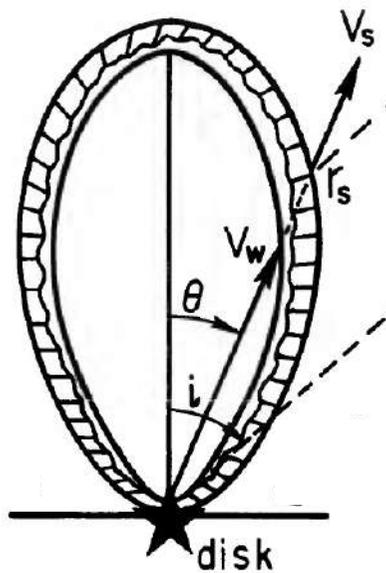
Couleurs = v_{obs} : 0.1 km/s (violet) à 10 km/s (orange)

Entrainement des flots CO: deux modèles concurrents

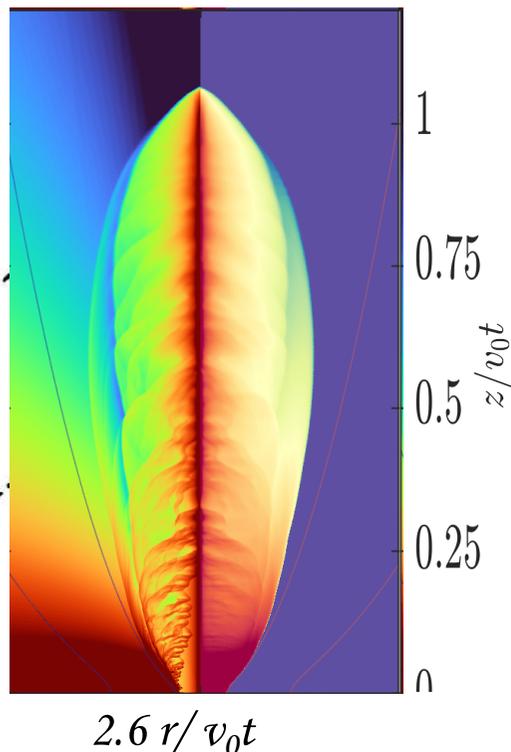
12

1) Vent X radial, très ouvert et plus dense sur l'axe

→ Expansion auto-similaire $R_s(\theta) \sim f(\theta) v_w t$

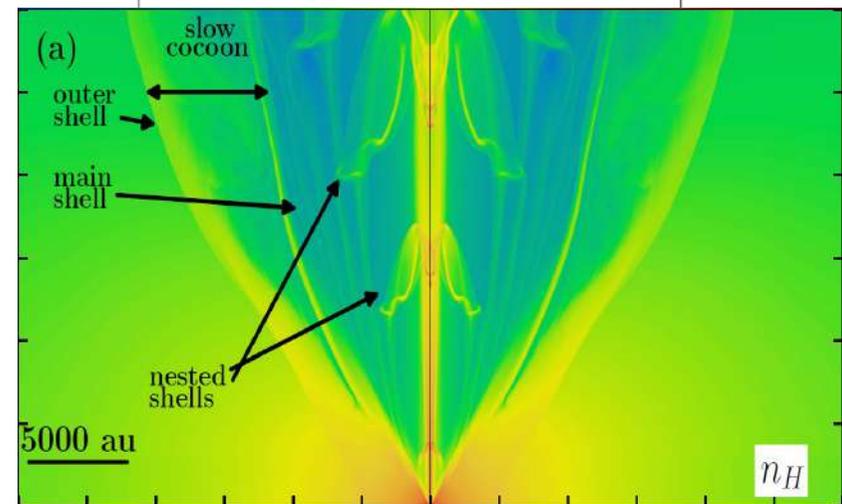
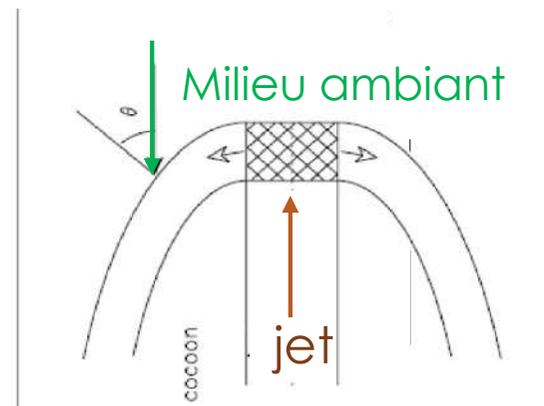


Shu+91



Shang+23

2) Jet variable: Chocs d'étrave
→ taille transverse finie ~ obs



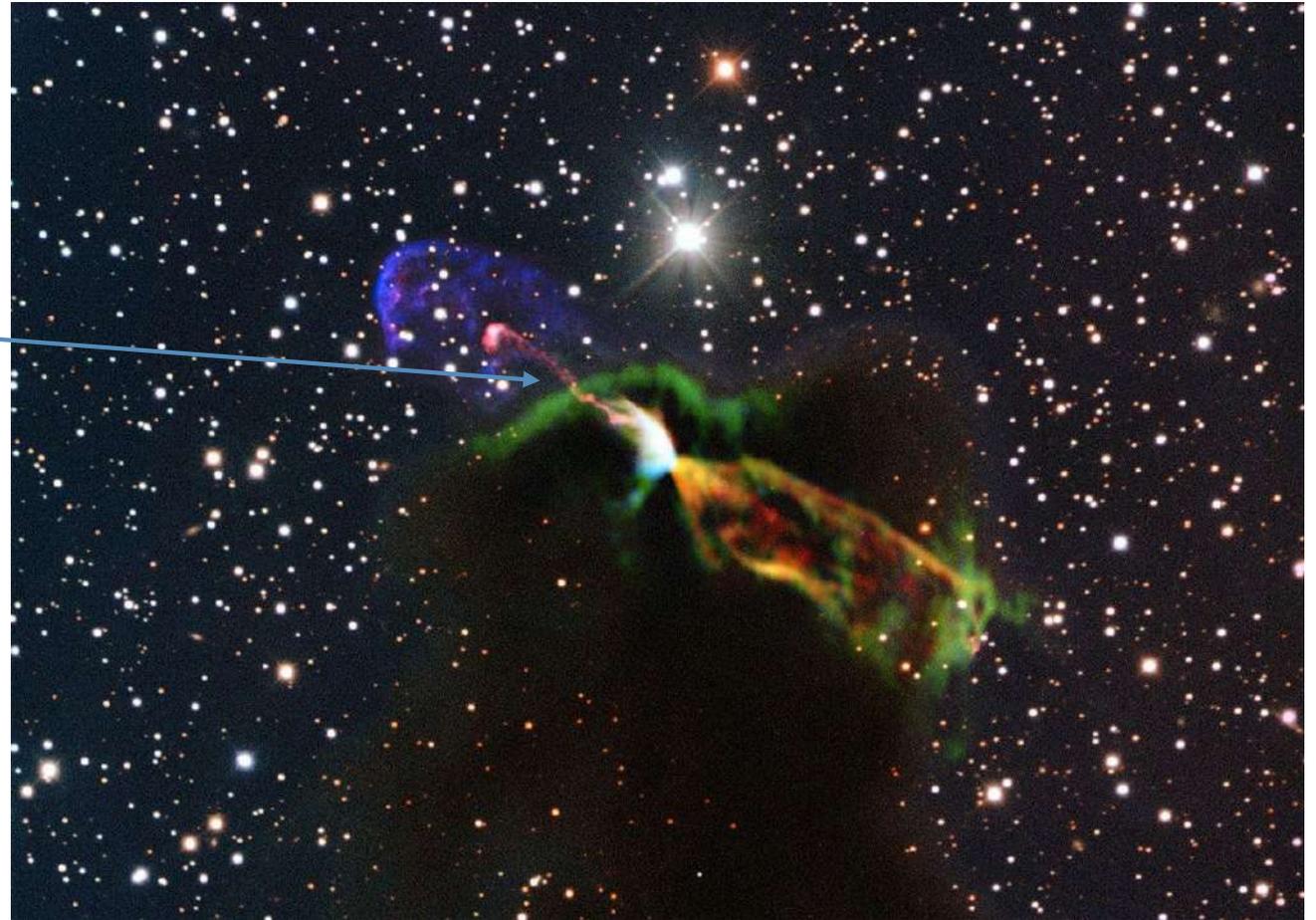
Raga & Cabrit 1993, Rabenanahary+2022

De multiples signatures d'éjection

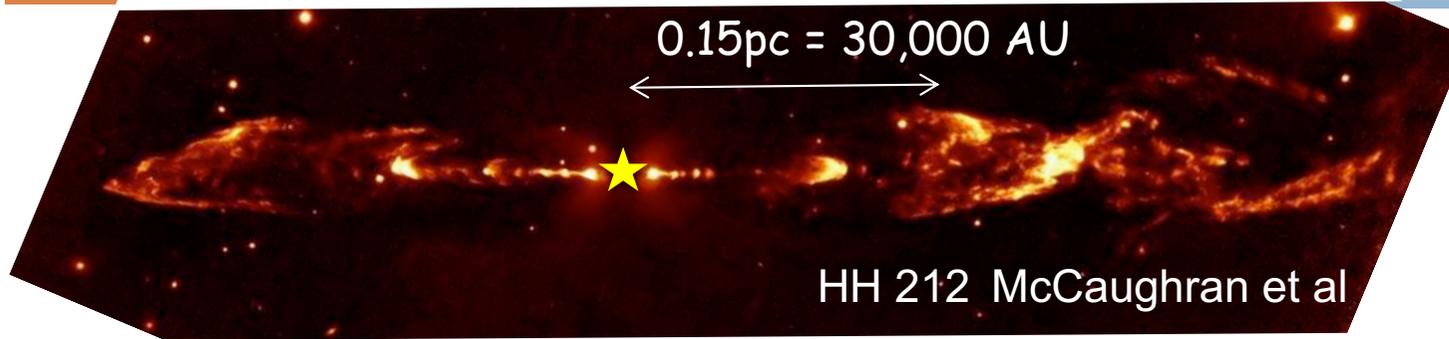
1) Les flots CO, $V < 10$ km/s

2) Les jets de plasma, $V > 100$ km/s

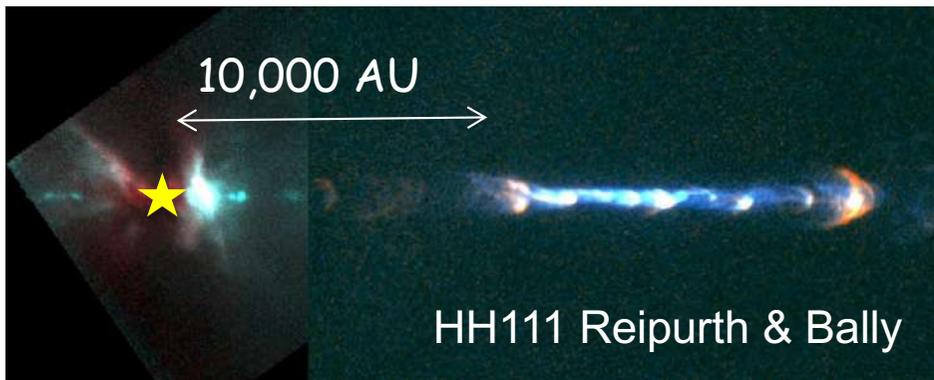
3) Les vents de disque (?)



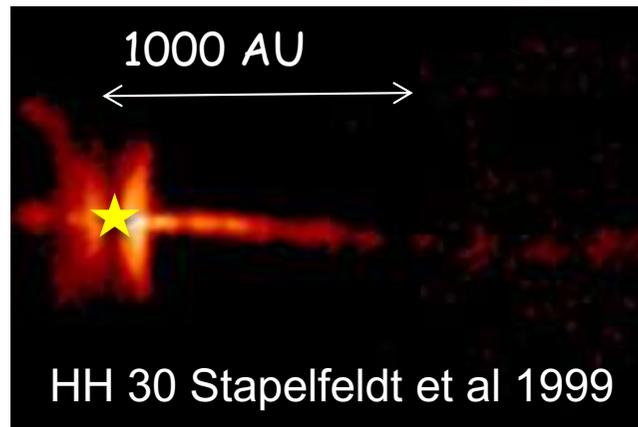
Un processus inattendu et universel



**Protoétoiles jeunes
(Class 0) $M_{\text{env}} > M_{\star}$
 $\approx 10,000$ ans**



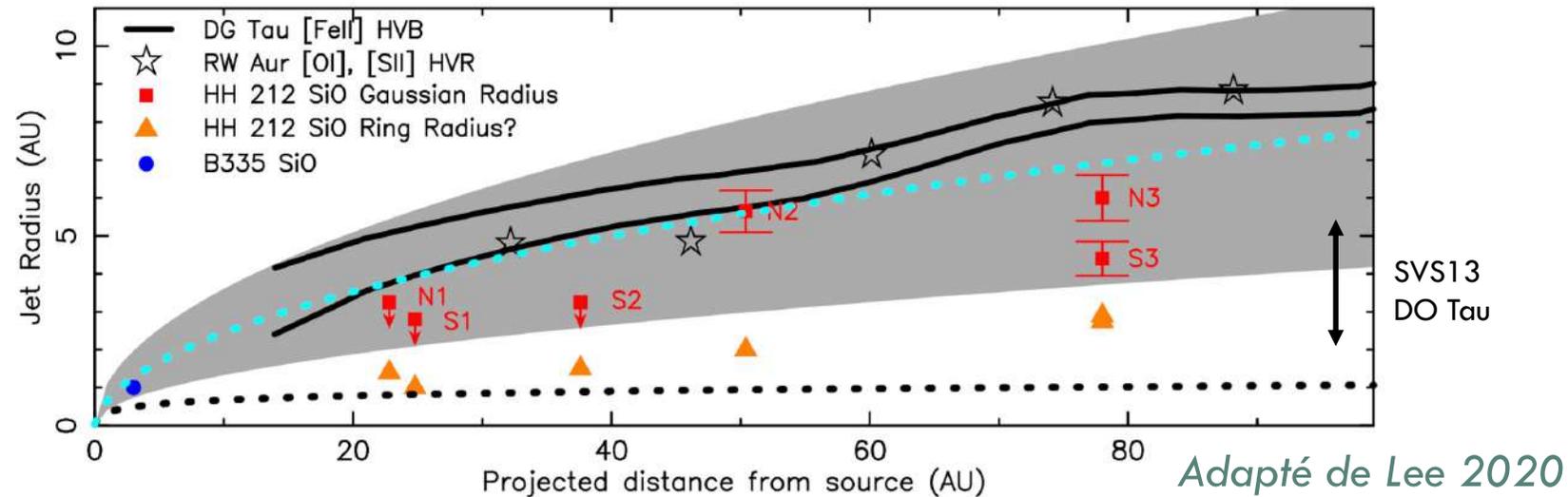
**Protoétoiles évoluées (Class 1)
 $M_{\text{env}} < M_{\star} \approx 100,000$ ans**



**Etoiles T Tauri avec disque d'accrétion
(Class 2) $\approx 10^6$ ans**

Très similaire à travers les âges et les masses ($M_{\star} = 0.02 - 10 M_{\odot}$): ingrédient essentiel de la formation stellaire

Collimation des jets

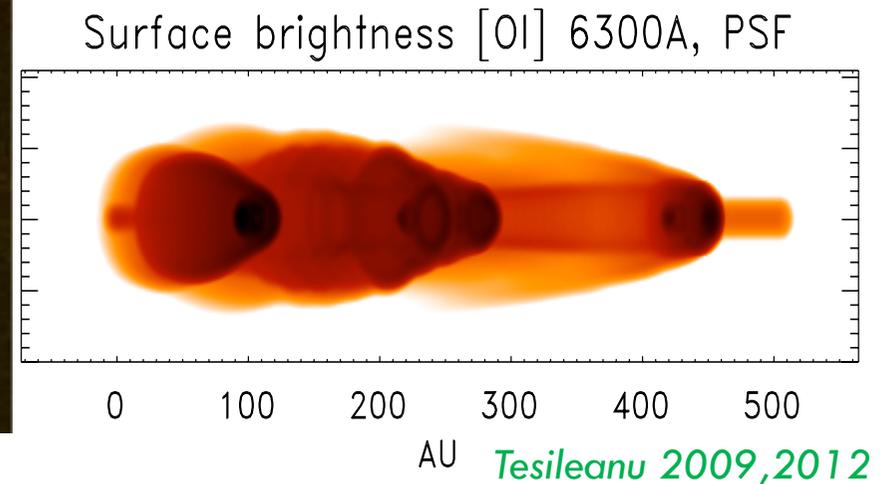
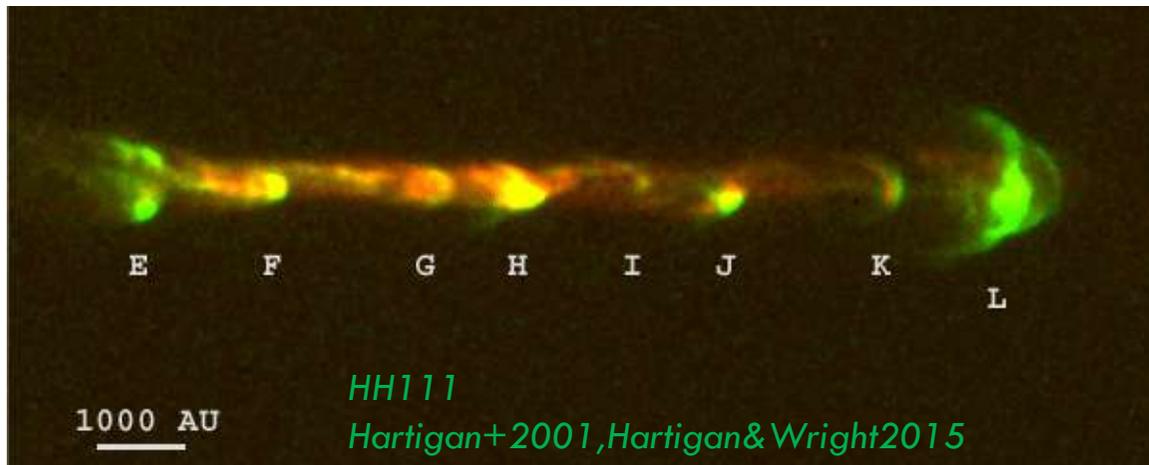


Collimation à petite échelle < 1 au

Identique entre Class 0 et Class 2

- ➔ Pas d'influence de l'enveloppe parente
- ➔ Collimation magnétique

Champ magnétique des jets

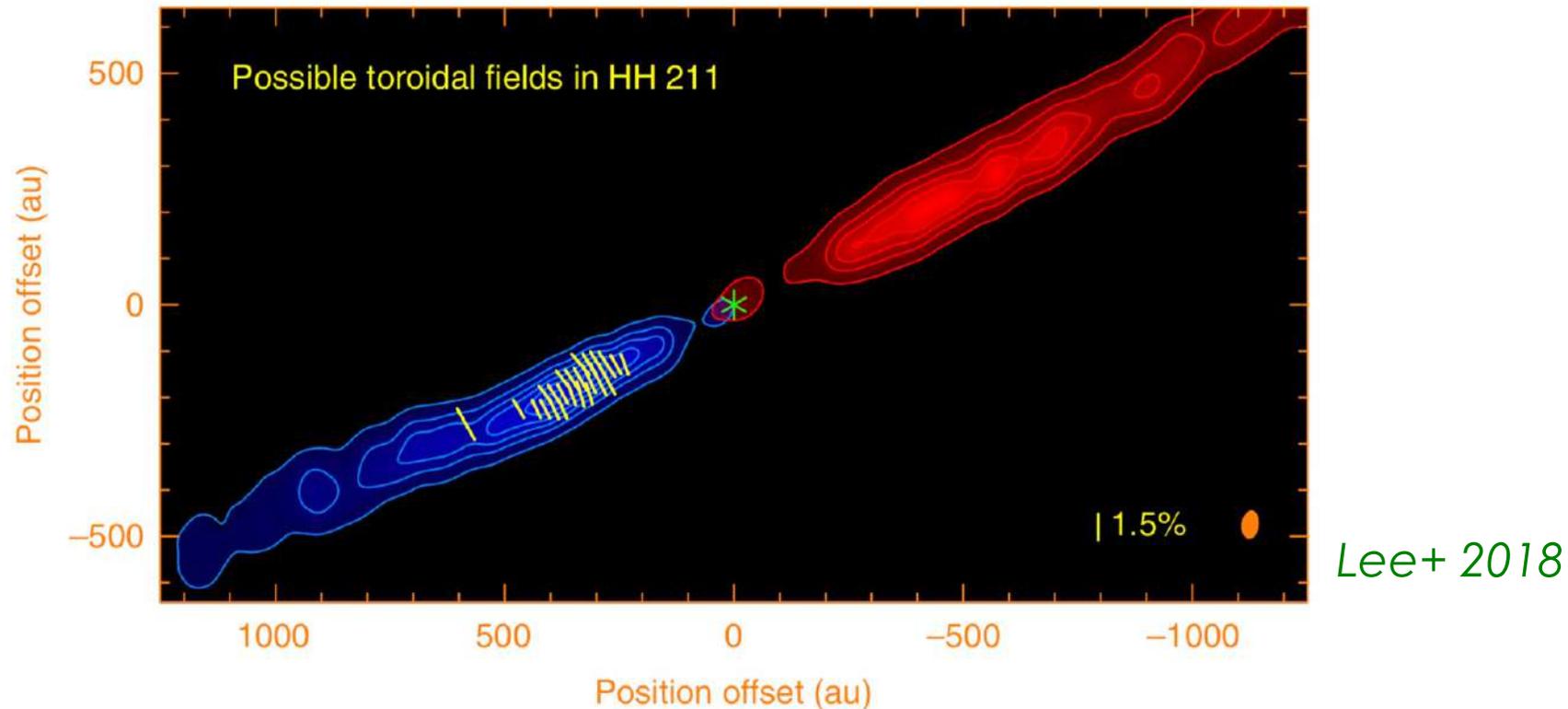


Un champ magnétique transverse limite la compression dans les chocs internes au jet :

- Augmente l'épaisseur du choc
- Modifie intensités relatives des raies spectrales émises

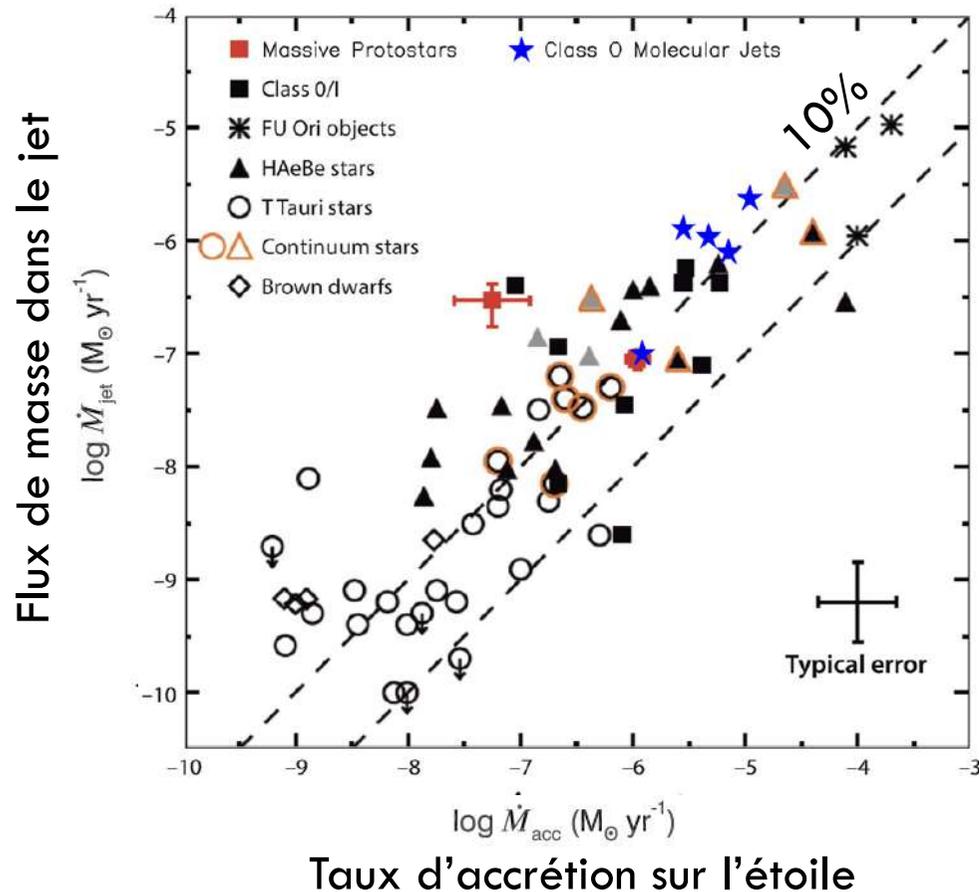
Observations vs Modèles: $V_{\text{Alfvén}} \sim 0.04 - 0.1 V_{\text{jet}}$

Champ magnétique des jets

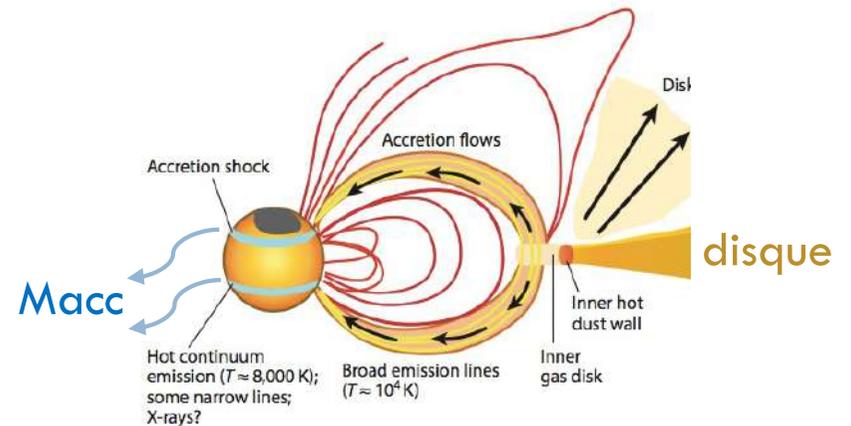


Emission de SiO polarisée (effet Goldreich-Kylafis) avec ALMA
→ $v_{\text{Alfvén}} \sim 0.14 v_{\text{jet}}$

Corrélation avec l'accrétion

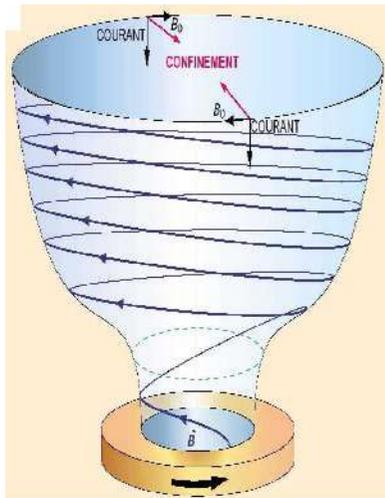


Ellerbroek+2013, Lee 2020



- Corrélation sur 5 ordres de grandeur → **Processus universel d'éjection**
- $M_{\text{jet}} \sim 10\% M_{\text{acc}}$: conversion très efficace d'énergie d'accrétion en énergie cinétique → **accélération magnétique plutôt que thermique**

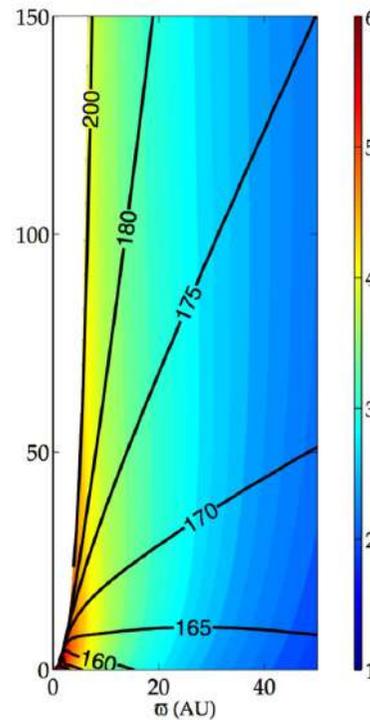
Processus d'éjection magnétiques



Ejection magnéto-centrifuge

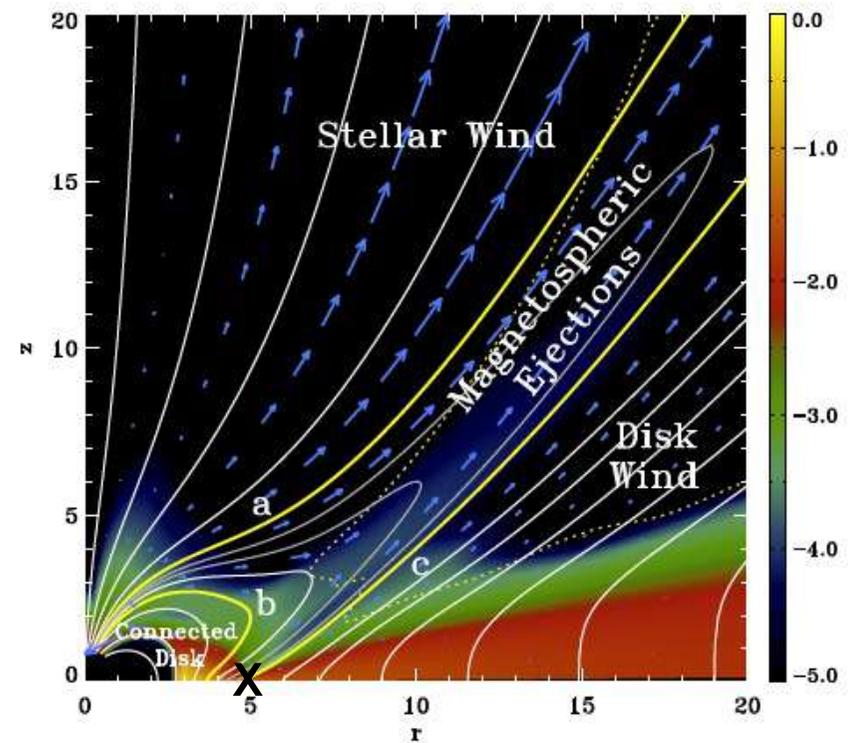
- **Extraction de moment cinétique** : $M_{\text{jet}} \propto M_{\text{acc}}$
- $J_z \times B_\phi$: **auto-collimation**

Blandford & Payne 1982, Ferreira 1997



Analytique
« **Vent X** »

Shu, Shang+07

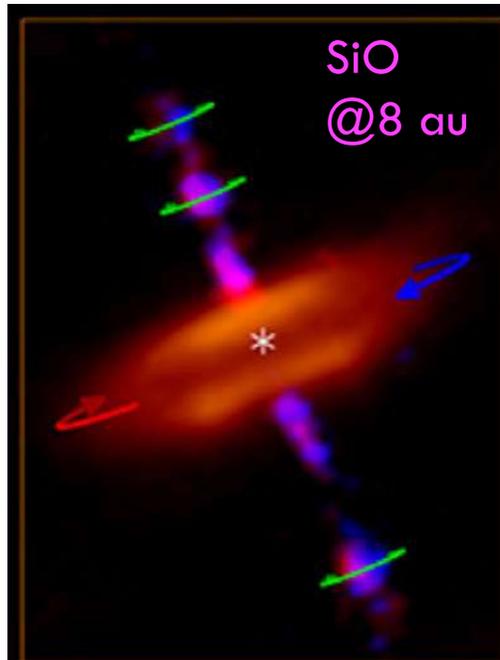


Simulation numérique:
3 composantes

Zanni & Ferreira 2013

Signatures de rotation de jets

Lee+2017, ALMA



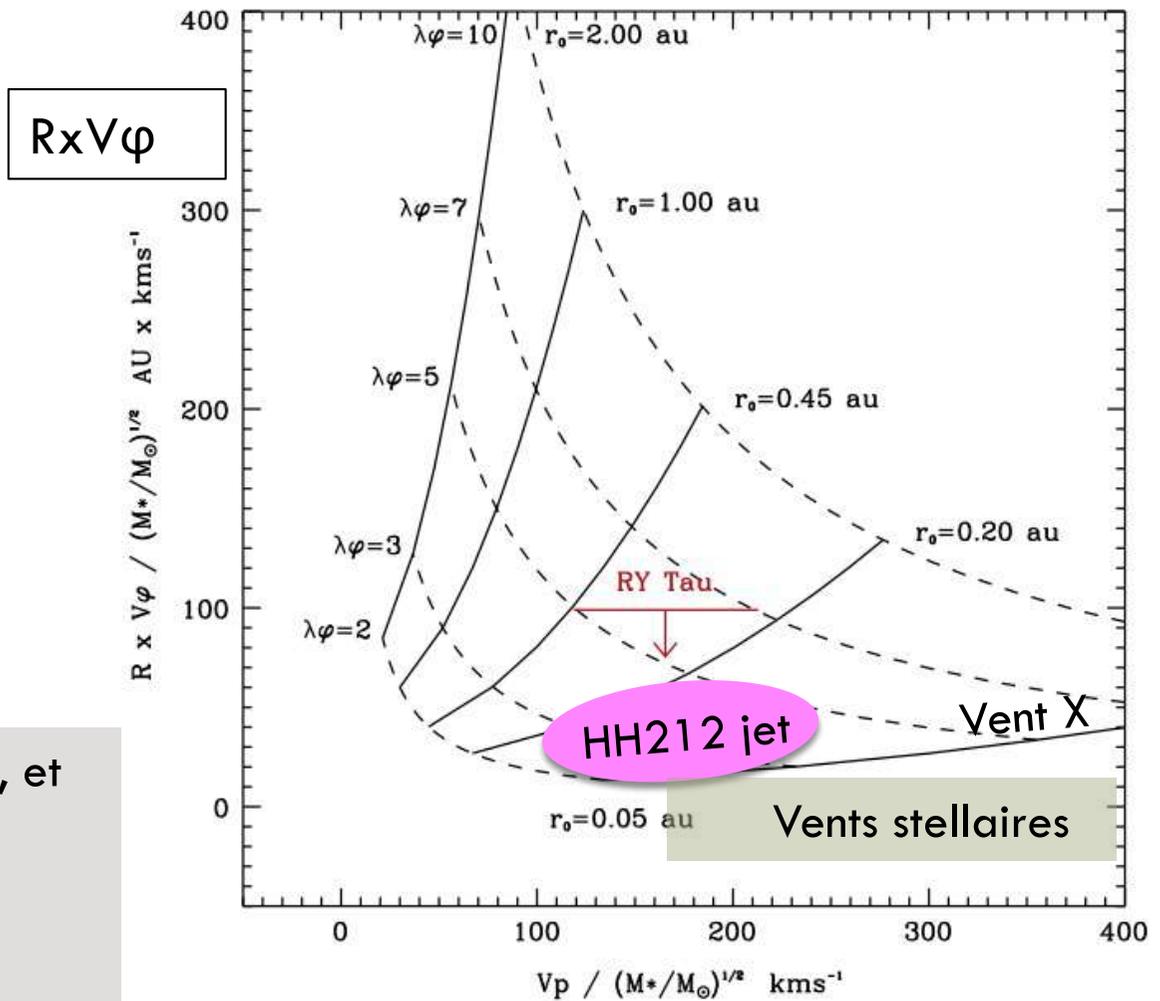
Vent de disque MHD stationnaire, et axisymétrique

$$R \times V_{\phi} = \lambda r_0 \times V_{\phi}(r_0)$$

$$V_p = (2\lambda - 3 + h)^{0.5} V_{\text{kep}}(r_0)$$

→ $r_0 \sim 0.05-0.2 \text{ au}$: bord interne du disque (cf. faible contenu en poussière)

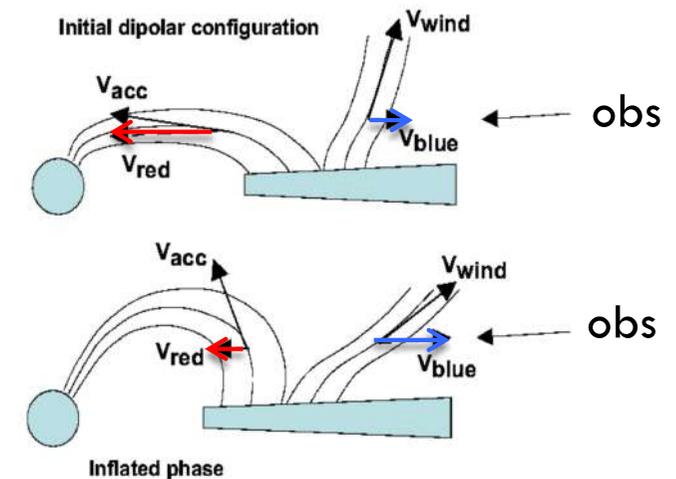
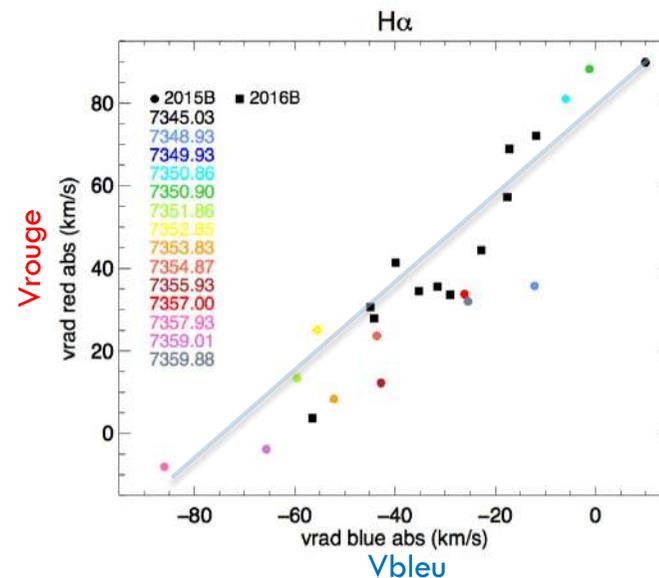
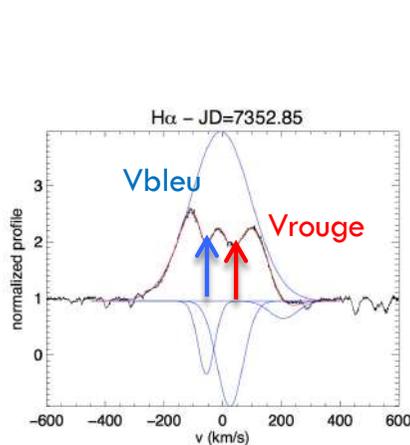
$$\lambda \sim 2-5$$



Anderson+03, Ferreira+2006

Contribution magnétosphérique

- Variations rapides et corrélées des signatures d'accrétion et éjection en absorption



Alencar+2018
Bouvier+2003,2007
AA Tau & KH 15D

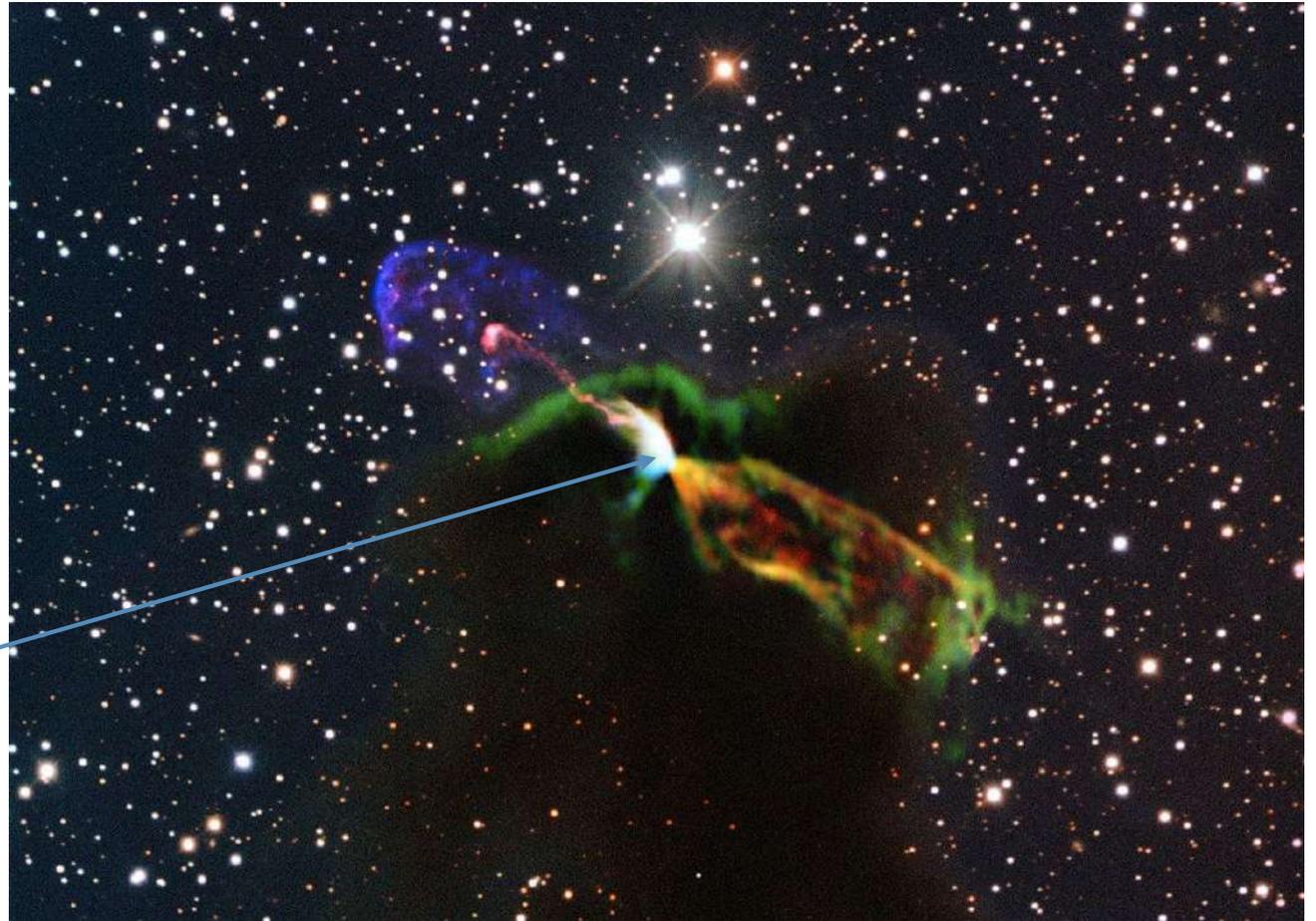
variation des vitesses sur la ligne de visée
lors de l'inflation de la magnétosphère

De multiples signatures d'éjection

1) Les flots CO, $V < 10$ km/s

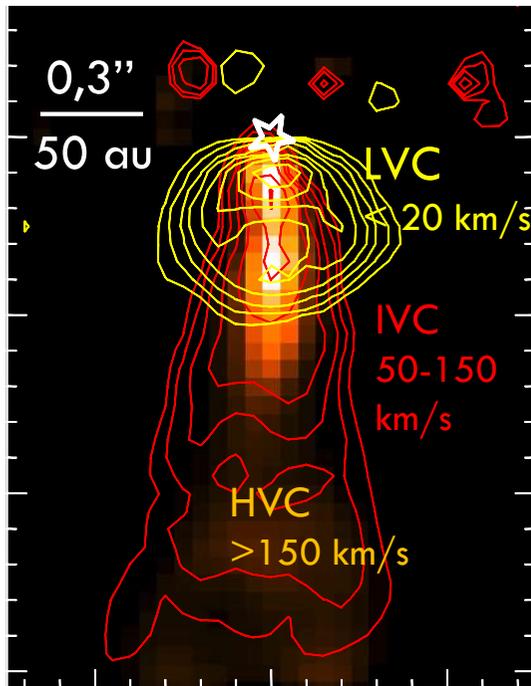
2) Les jets de plasma, $V > 100$ km/s

3) Les vents de disque (?)



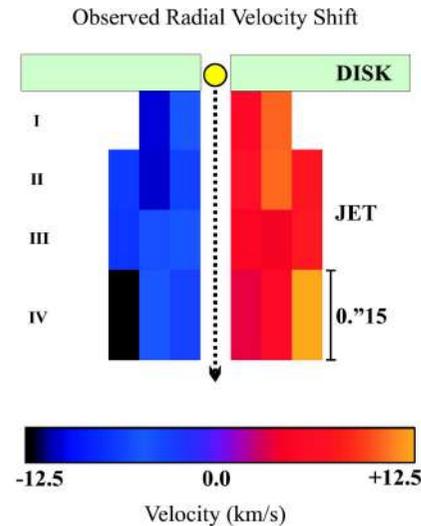
Vitesses intermédiaires: DG Tau A

stratification
« en pelures d'oignon »



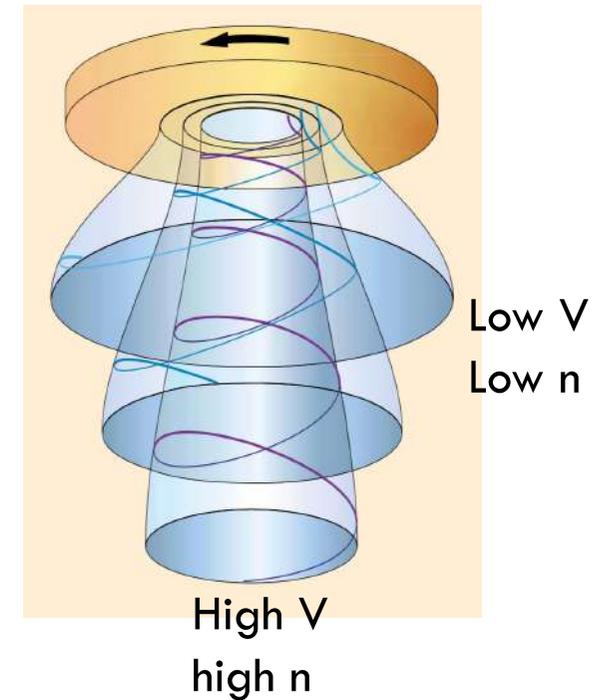
VLT: Agra-Amboage+14
HST: Bacciotti+00, Maurri+14
CFHT: Lavalley+97,00

Signatures de rotation
dans l'IVC atomique



HST:
Bacciotti+02,
Coffey+07

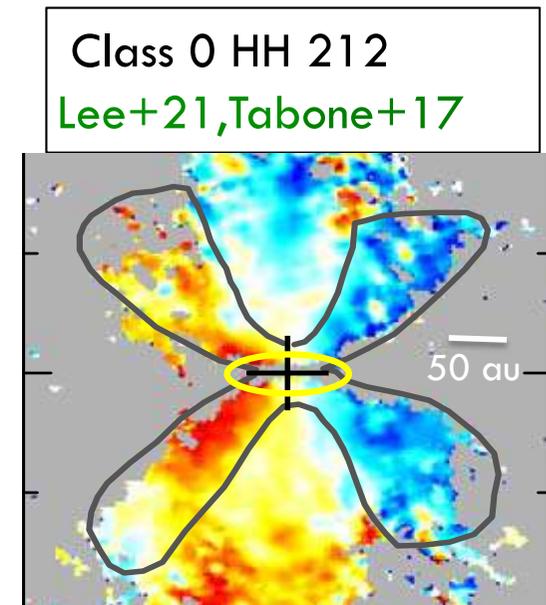
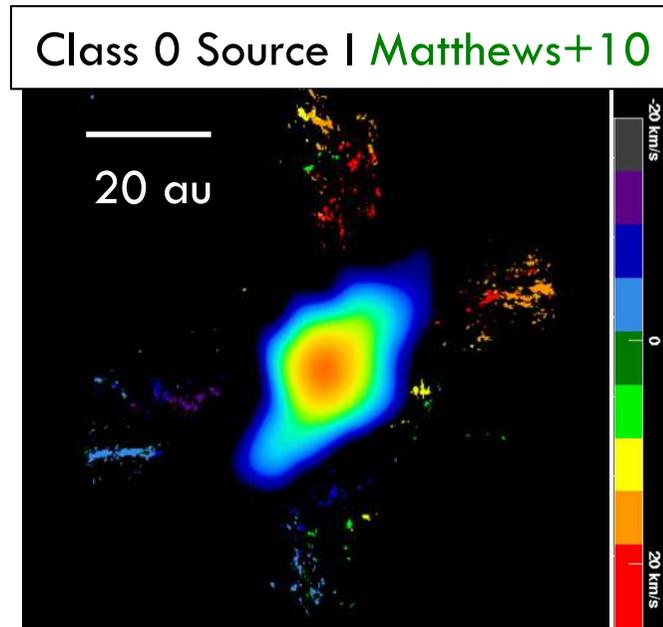
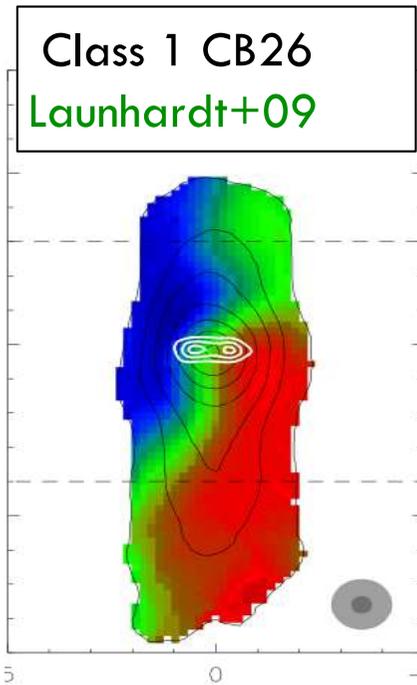
Vent de disque MHD étendu ?



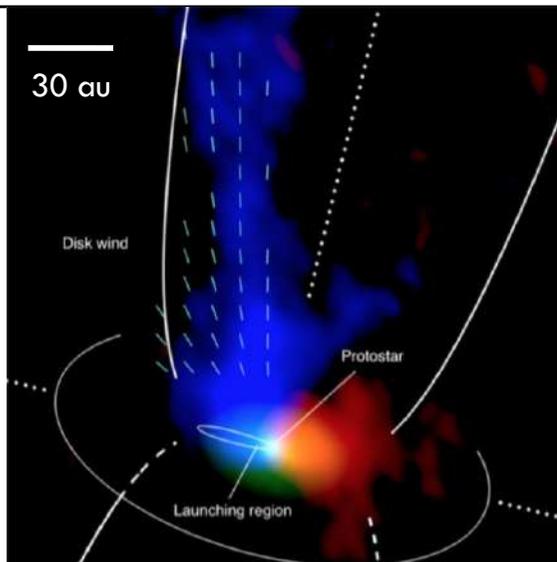
Anderson+03
Pesenti+04

→ $R_{\text{out}} \sim 3 \text{ au}$
→ $\lambda \sim 13$

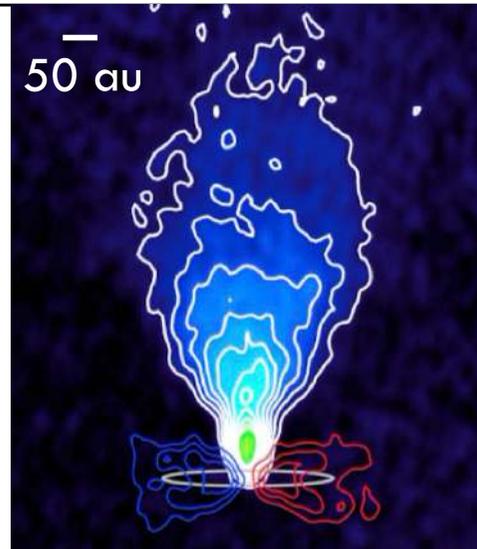
Vents de disque moléculaires en rotation



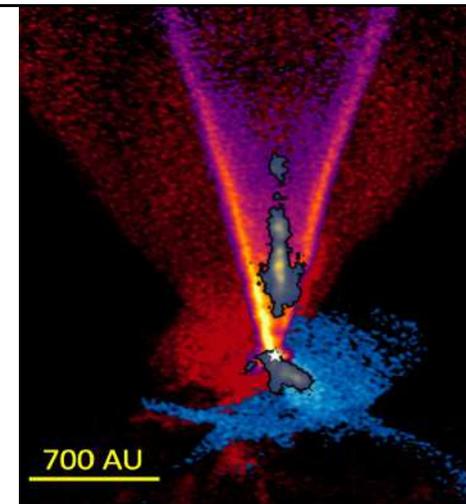
Class 1 TMC-1A Bjerkeli+16



Class 2 HH 30 Louvet+2018



Class 1 DG Tau B
deValon+2020,22

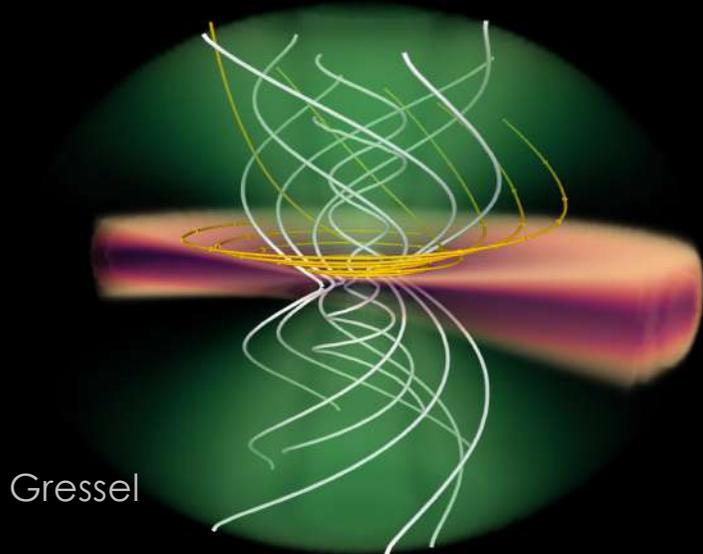


Théorie des Vents de disque

1) Vent magneto-centrifuge (MHD)

Accéléré par des forces magnétiques qui freinent le disque et induisent l'accrétion

V^∞ dépend du paramètre de bras de levier magnétique $\lambda = j_{\text{wind}} / j_{\text{kep}} \approx (r_A / r_0)^2$



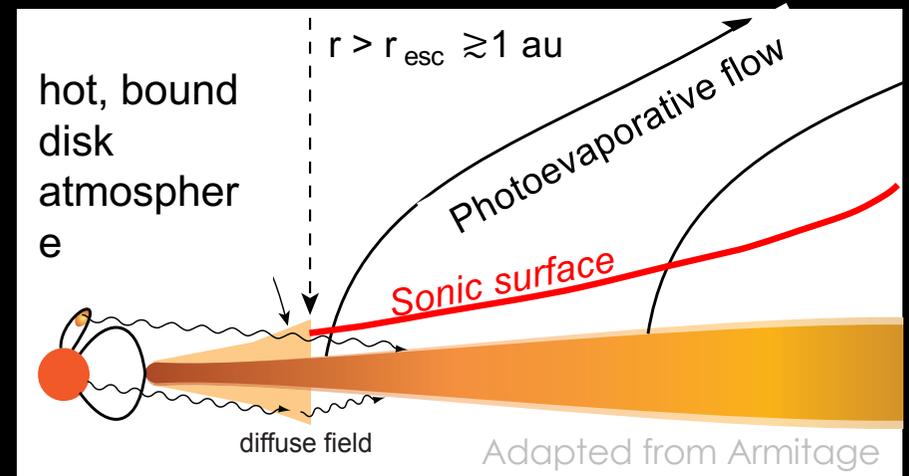
Gressel

2) Vent Photoévaporé

Energie provient de l'irradiation stellaire (Xray, EUV, FUV)

S'échappe si $c_s \gtrsim 0.3 V_{\text{kep}} \rightarrow r_{\text{esc}} \approx 1-4 \text{ au}$

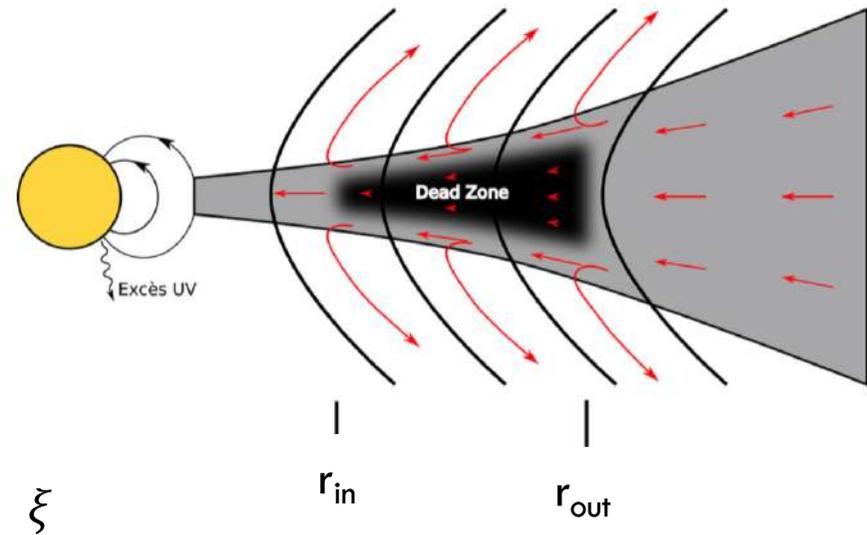
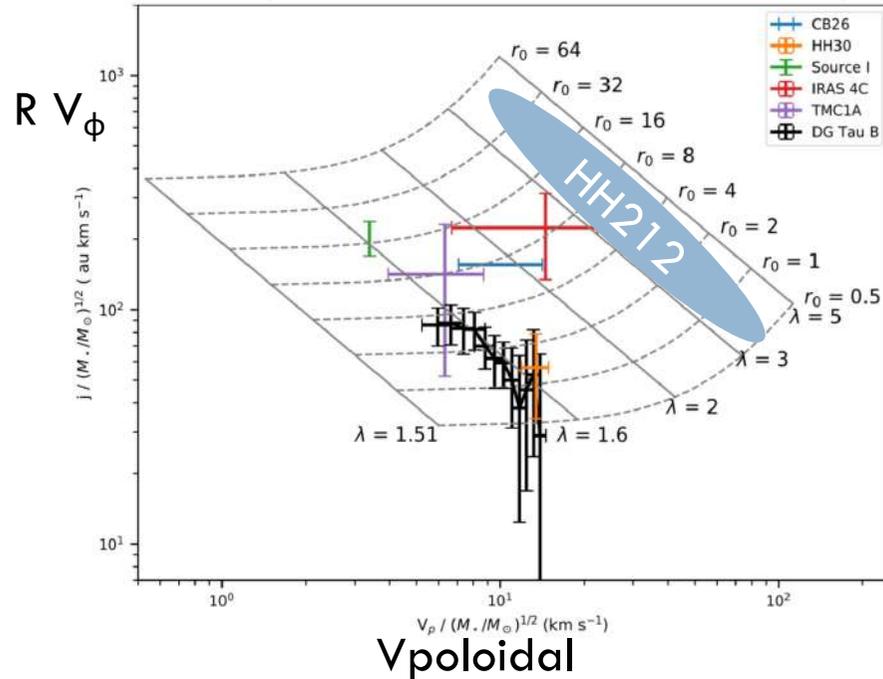
$V^\infty \approx \text{quelques } c_s$



Adapted from Armitage

Des vents de disque MHD ?

Vent de disque MHD stationnaire et axisymétrique



$r_0 = 0.5-40 \text{ au}$, $\lambda \sim 1.6-3$

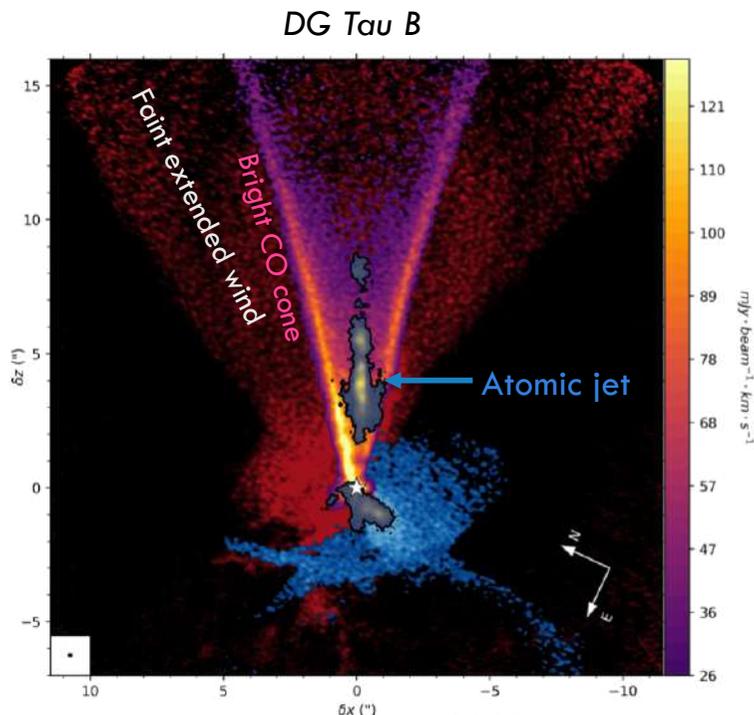
→ Cohérent avec modèles de vents magnétisés issus de la « zone morte » du disque

$$\frac{\dot{M}_{\text{DW}}}{\dot{M}_{\text{acc}}(r_{\text{in}})} \sim \left(\frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{in}}} \right)^{\xi} - 1 \quad (\xi \sim 1)$$

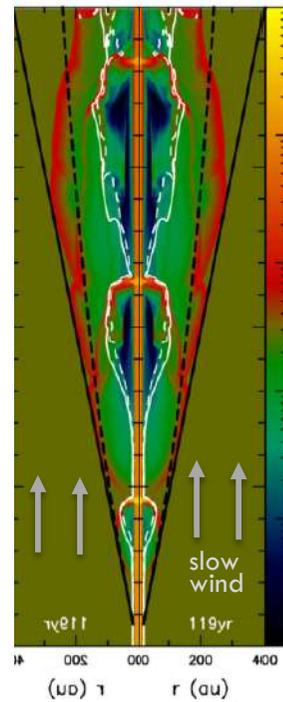
→ Extraction de moment cinétique par le vent pourrait soutenir l'accrétion à travers la zone morte

Bethune+2016, Gressel+2020, Wang&Bai+2019, Lesur2021

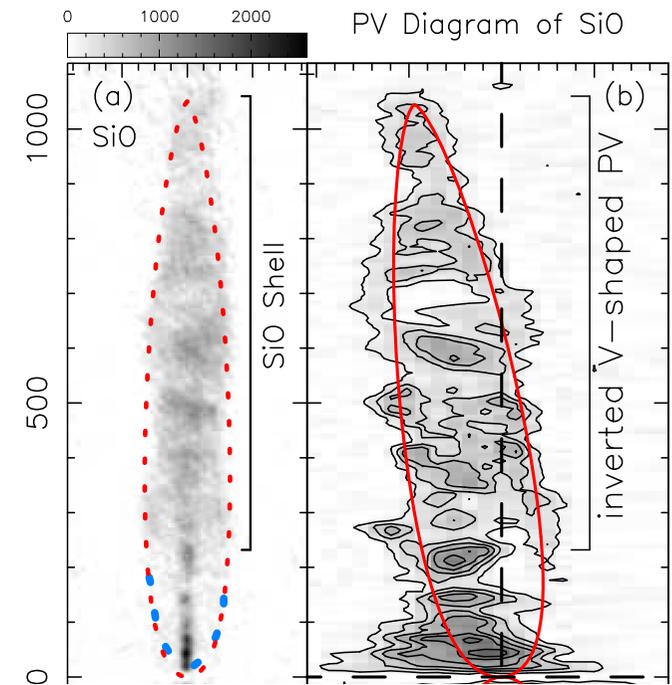
Questions ouvertes: pourquoi une géométrie si conique?



Interaction jet – vent de disque



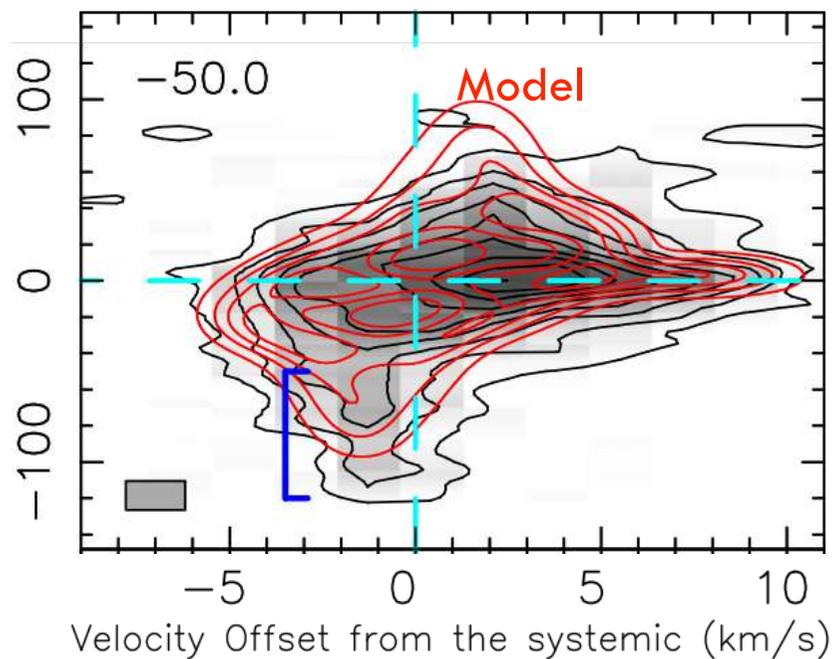
Interaction vent-X/vent de disque (modèle pour HH212)



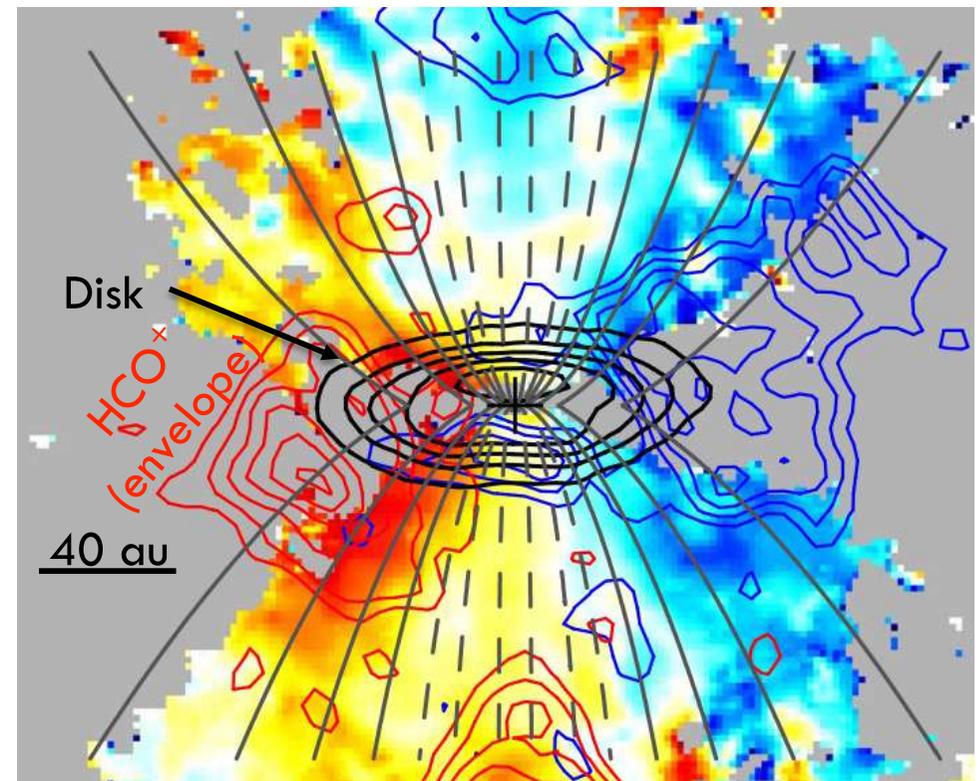
Le cas de HH212

Comparaison des observations de HH212 avec un modèle complet de vent de disque MHD
(solution MHD, superposition de couches, projection sur le ciel, convolution par le lobe)

Signatures de rotation

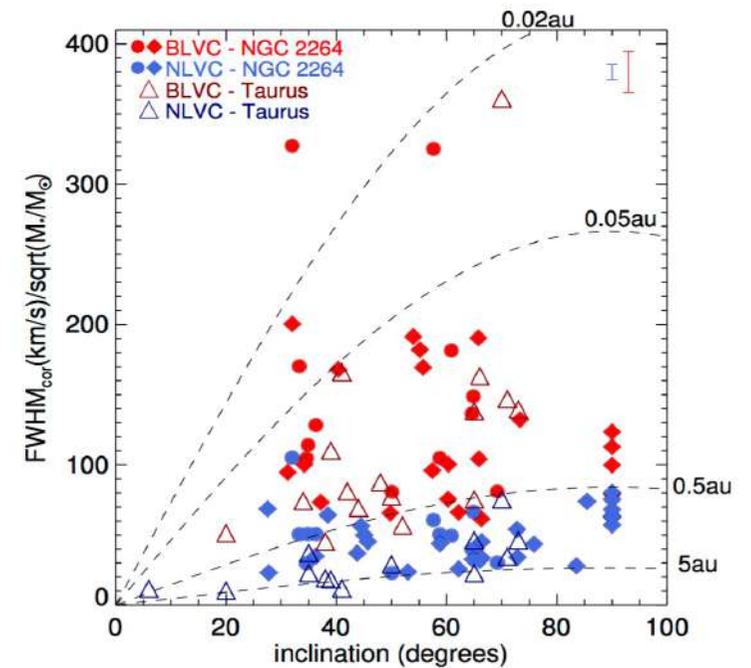
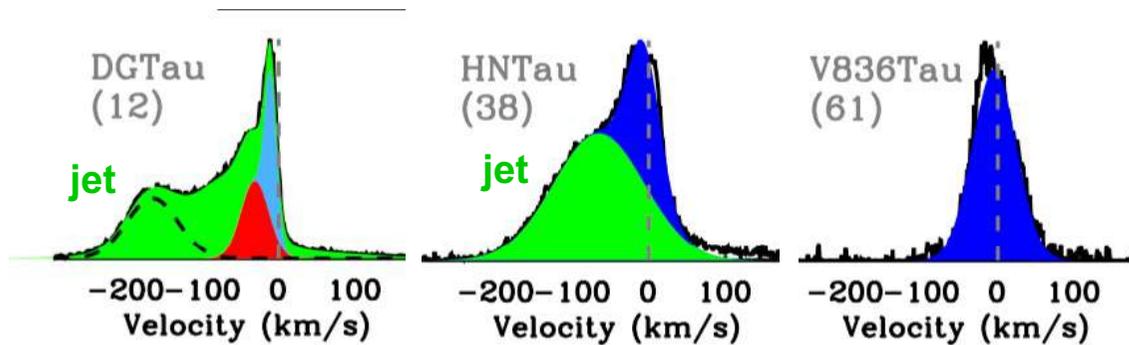


Lignes d'écoulement



Cf. Tabone+2017, Tabone+2020, Lee+2021

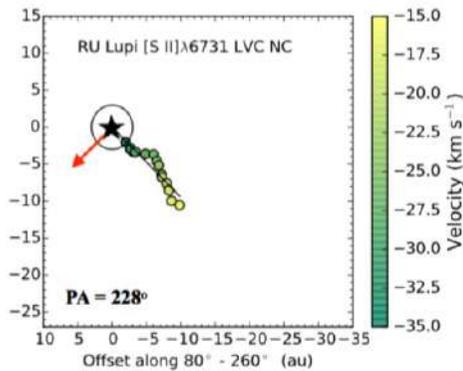
Vents de disque dans les T Tauri



Composantes à basse vitesse 0-30 km/s omniprésentes
Vent de disque MHD externe ?

Si élargissement dominé par rotation
 $= 2 V_{\text{kep}}(r_0) \sin(i) \rightarrow r_0 \sim 0.02\text{-}5 \text{ au}$

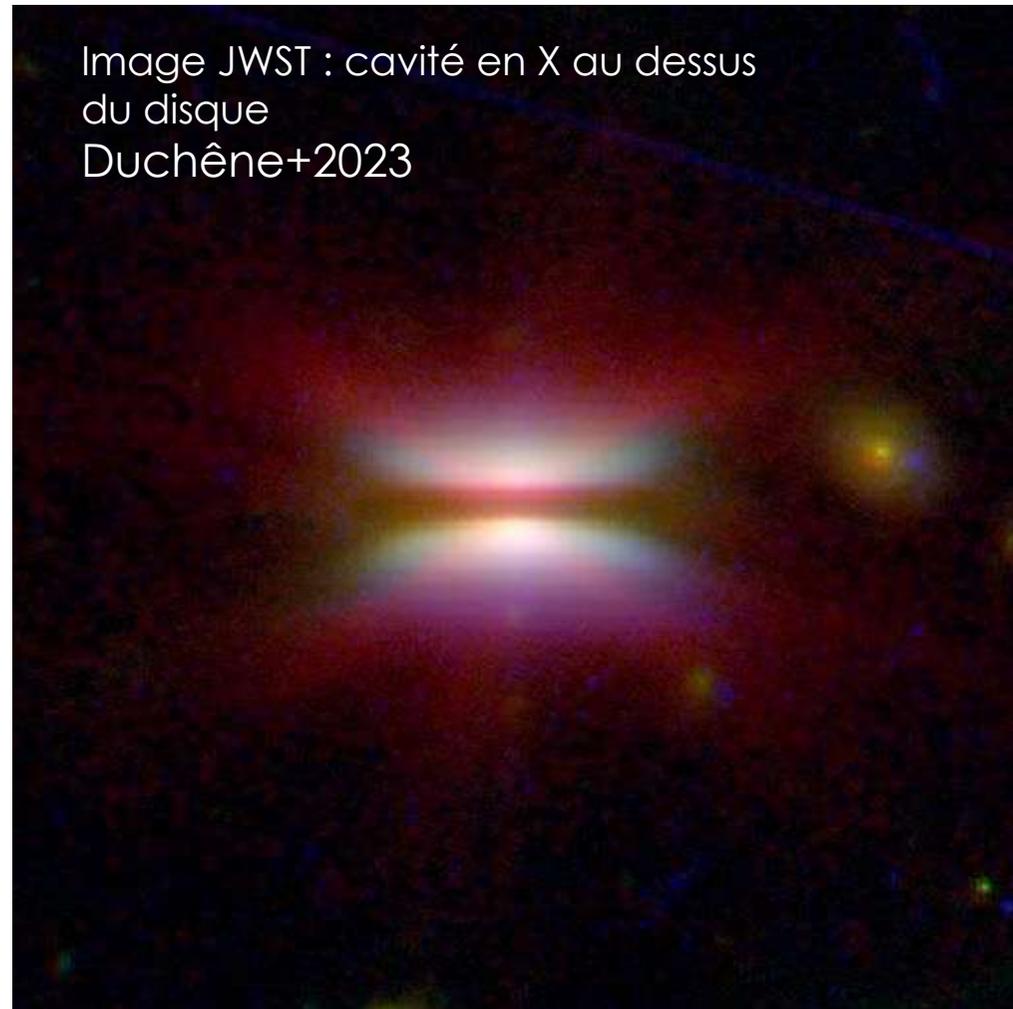
Vents de disque dans les T Tauri



Extension de la composante basse vitesse dans la direction du jet

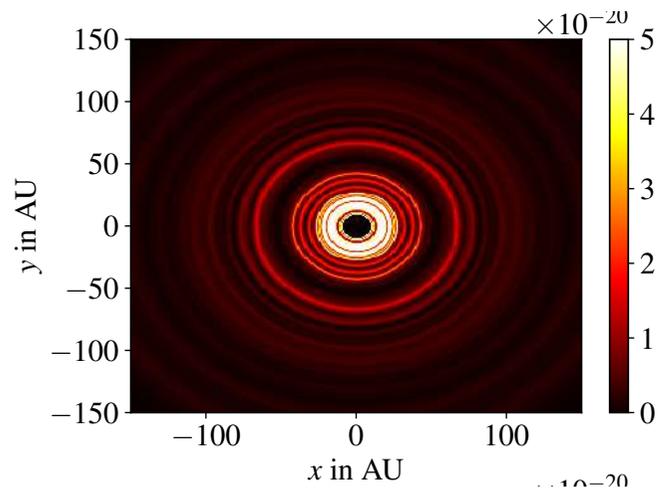
Whelan+2021

Image JWST : cavité en X au dessus du disque
Duchêne+2023



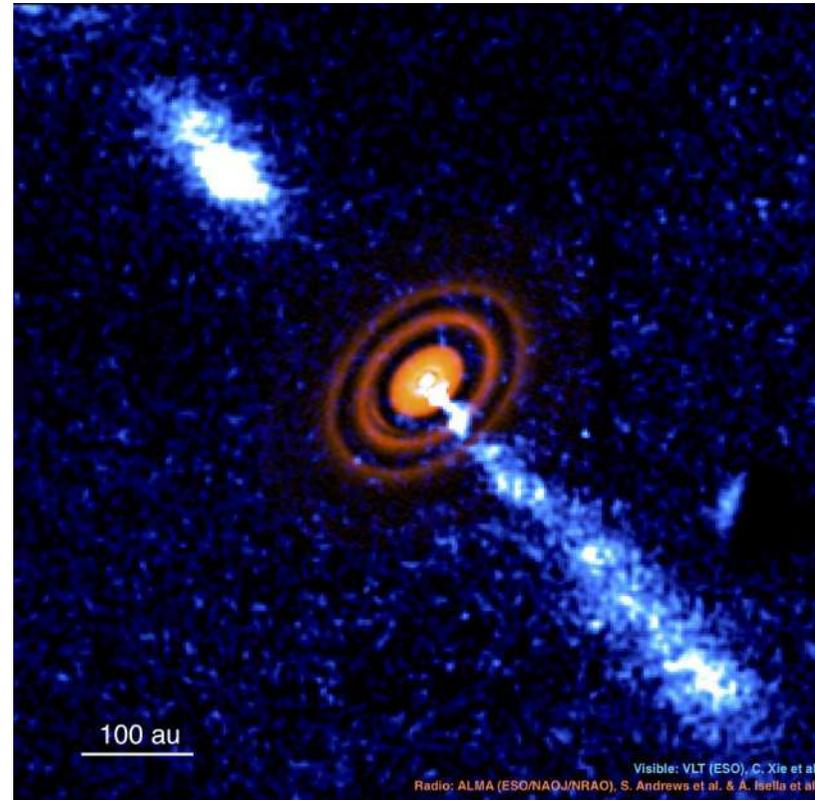
Impact sur la formation planétaire ?

- Formation spontanée d'anneaux et de sillons par instabilités magnétiques: concentration des solides
- **Aide à la formation de planétésimaux et planètes**



Riols & Lesur 2018

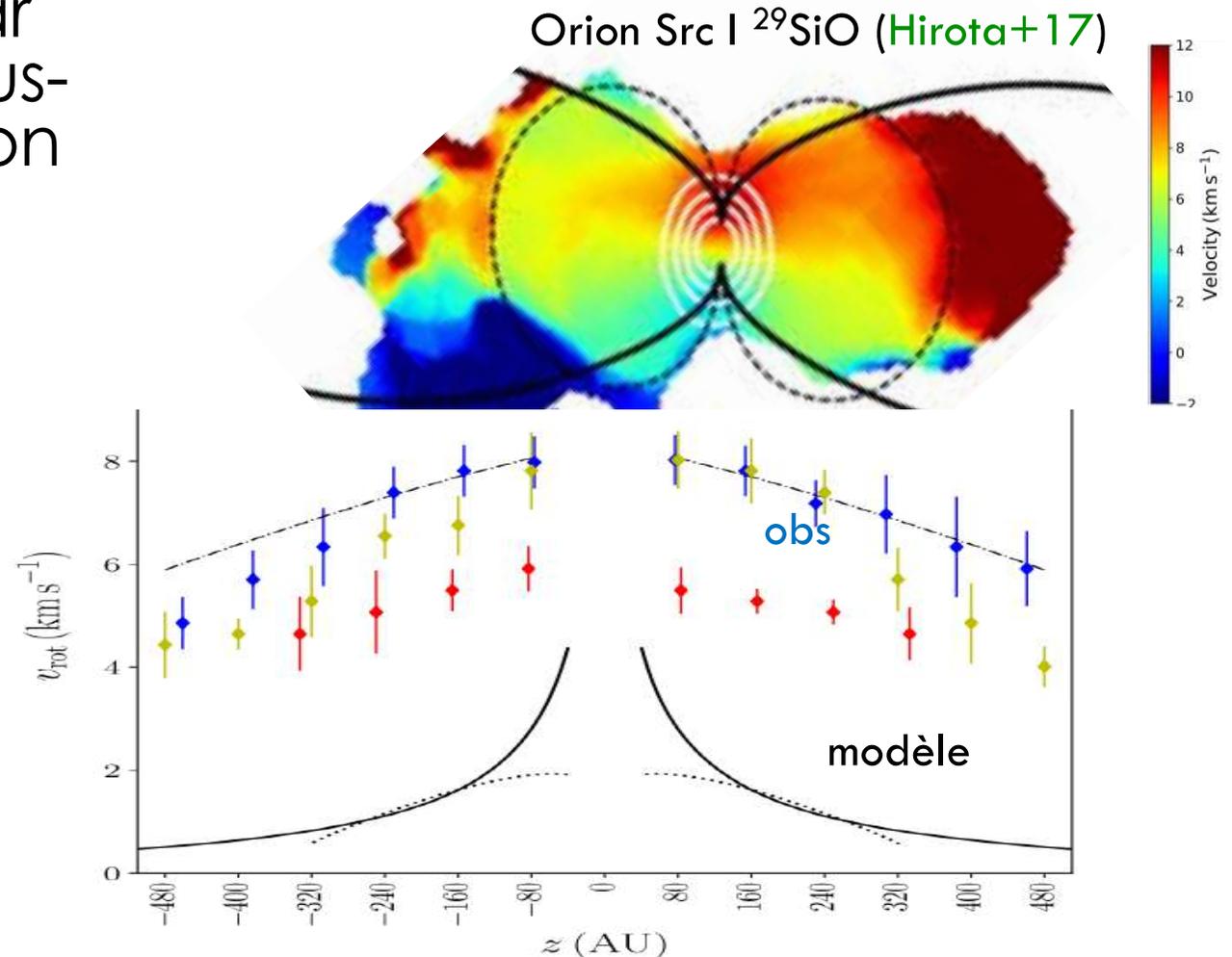
CO



Disque ALMA Isella+ 2018
Jet VLT/MUSE Xie+2021

Vent MHD ou entrainement ?

- Modèles actuels (entrainement par un vent large) sous-estiment la rotation observée

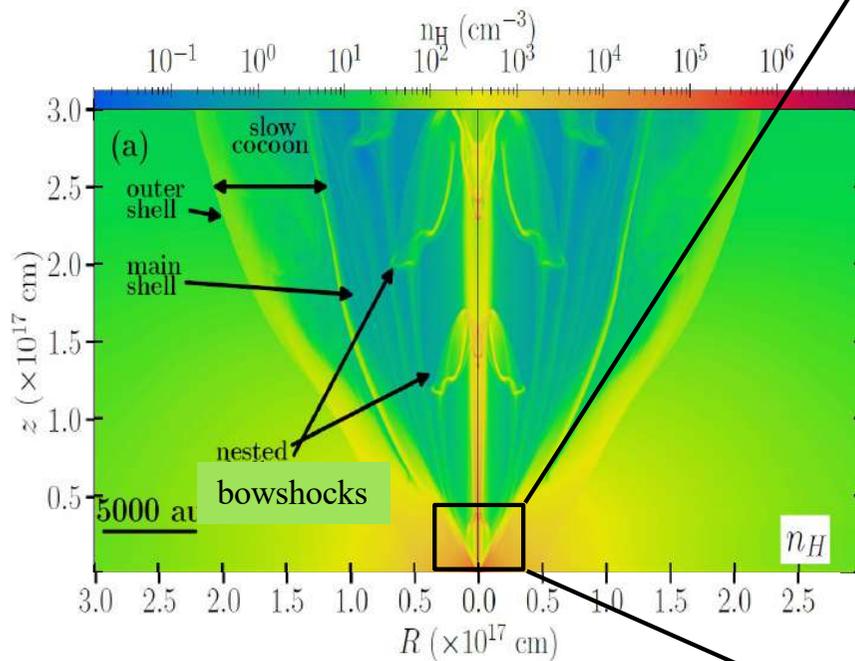


Lopez-Velazquez+2019,2020

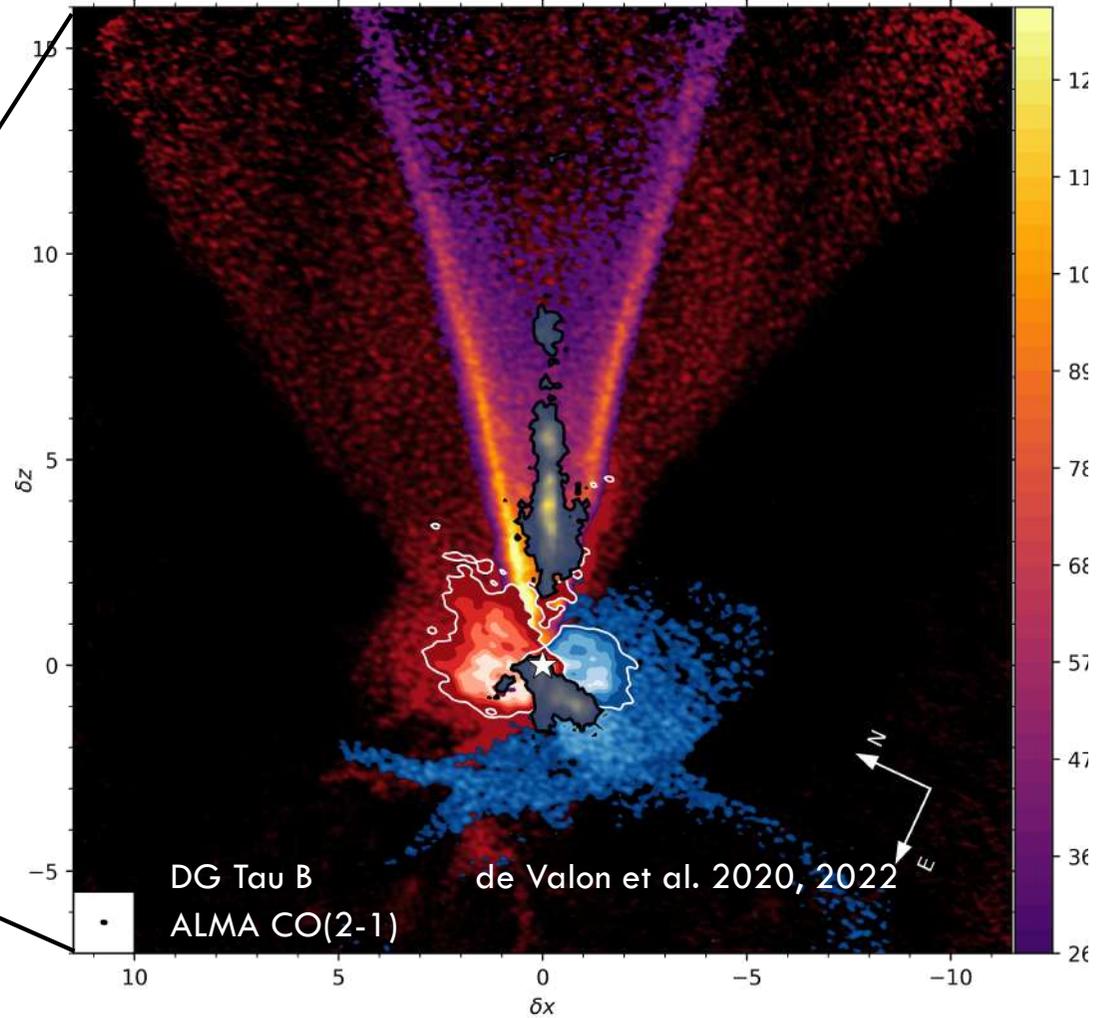
Vent MHD ou Entrainement?

33

- Par un jet variable: à tester

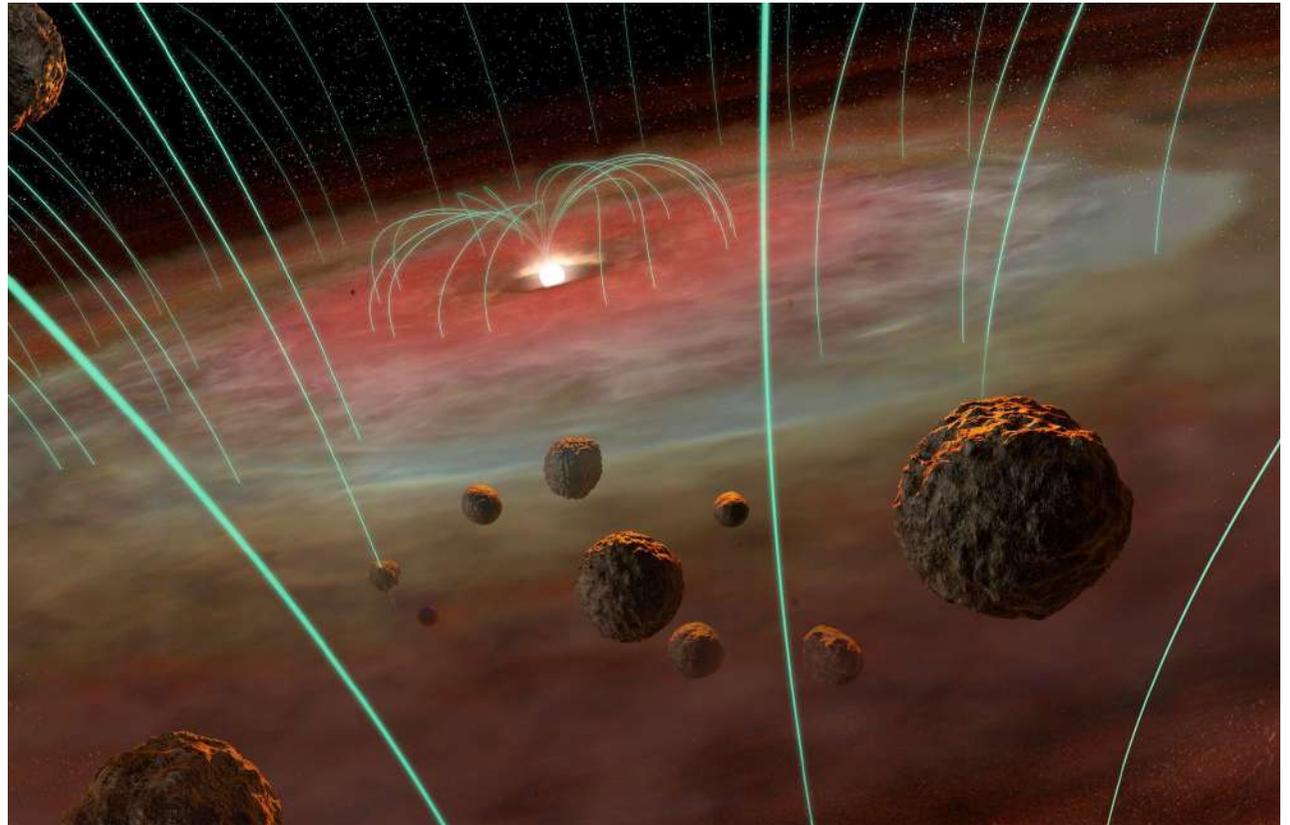


Rabenanahary+2022



Magnétisation du disque ?

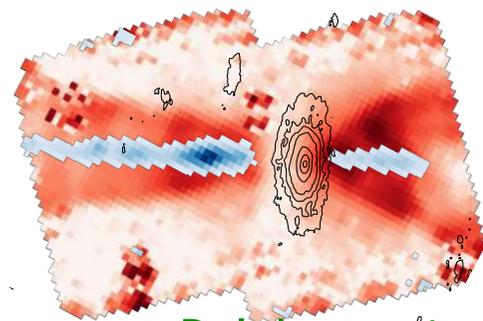
- Simulations MHD non-ideales prédisent $B \sim 100 \text{ mG}$
- Détection récente dans une météorite très ancienne
- Pas encore dans un disque
- Diffusion du flux vers l'extérieur ou l'intérieur ?



Conclusions et perspectives

Le processus d'éjection joue un rôle fondamental dans la formation stellaire:

- Flots bipolaires peuvent réguler la masse et le nombre d'étoiles formées
 - Jets rapides proviennent de la zone d'interaction étoile/disque : sans-doute cruciaux pour le freinage de l'étoile
 - Découverte, à vitesse intermédiaire, de vents moléculaires en rotation issus du disque:
 - éjection MHD qui permet l'accrétion à travers le disque ?
 - Tests de ce nouveau paradigme:
 - Modèles plus détaillés (interaction jet / vent / enveloppe, diffusion de B)
 - JWST: gaz à température intermédiaire entre jet (10,000 K) et CO (30 K)
- chauffage MHD, irradiation, chocs ...



Delabrosse, in prep.

