

Disques, Jets et Champs Magnétiques - I

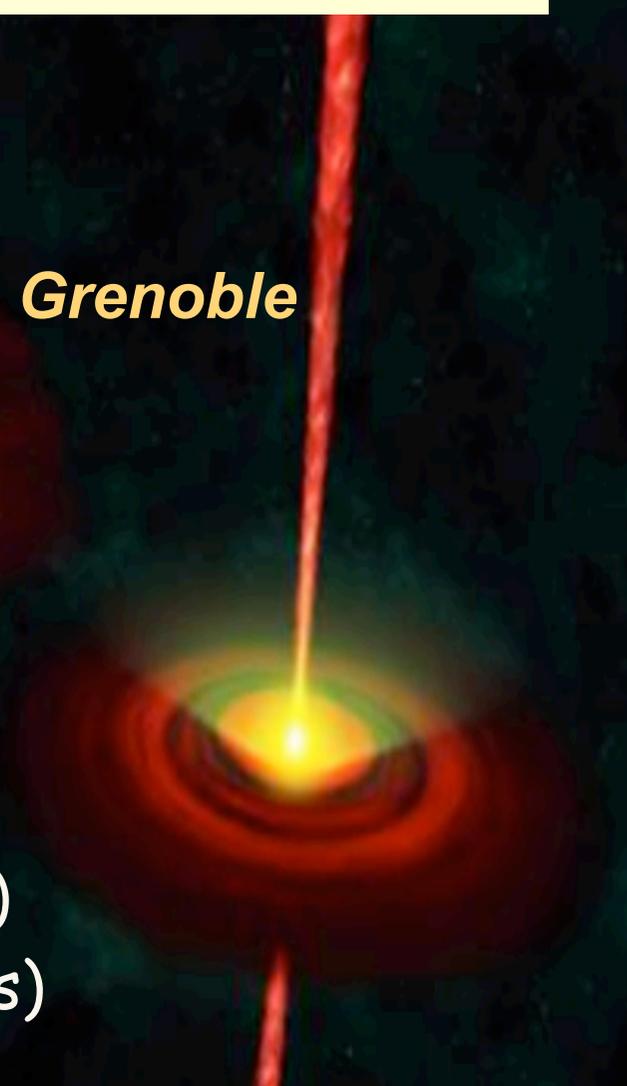
Jonathan Ferreira

Laboratoire d'AstrOphysique de Grenoble

Collaborateurs:

P. Garcia (Portugal), C. Dougados (LAOG)

S. Cabrit (Obs. Paris), F. Casse (Pays-Bas)



Plan du cours I

- 1. Perte de masse dans les étoiles jeunes**
 1. Flots moléculaires, Jets optiques, Microjets
 2. Contraintes physiques déduites des observations
 3. La nécessité d'introduire des champs magnétiques

- 2. Modèles MagnétoHydroDynamiques de Jets**
 1. Origine, topologie du champ B
 2. Les trois scénarii principaux invoqués
 3. La mesure de rotation dans les jets

- 3. Interaction étoile-disque**
 1. Indications observationnelles d'un couplage magnétique
 2. Phénomènes attendus: CME, déformation du disque
 3. Simulations numériques: CME ou pas CME ?
 4. Le problème de la rotation lente des T Tauri
 5. Le « vent X de reconnexion »

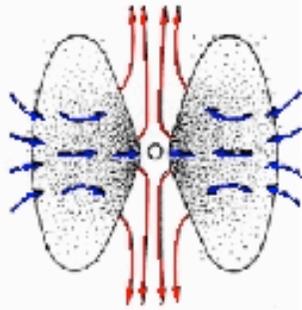
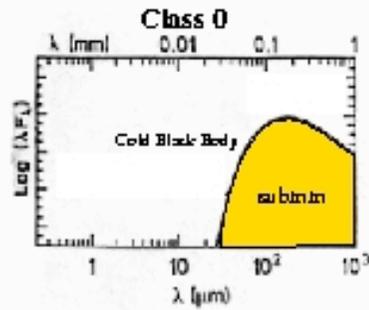
I- La perte de masse dans la formation stellaire

- Importance de la perte de masse
 - Régulation du moment cinétique stellaire
 - Structure des parties internes du disque, conditions initiales pour la formation des planètes ?
 - Détermination de la masse de l'étoile centrale
 - Injection d'énergie mécanique (chocs) dans les nuages moléculaires

Signatures de perte de masse observées à toutes les phases où l'accrétion est importante (ages $< 10^6$ ans)

Formation stellaire

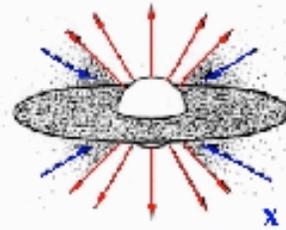
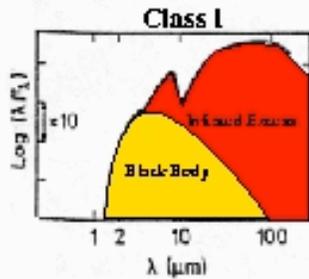
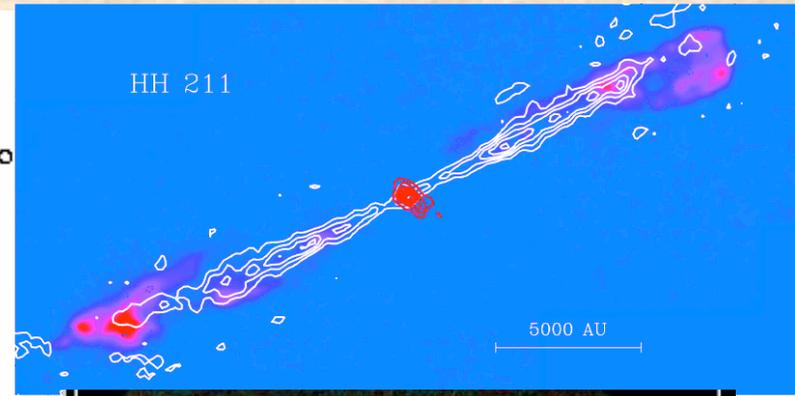
Beginning of gravitational collapse



$t \sim 0 \text{ yr}$

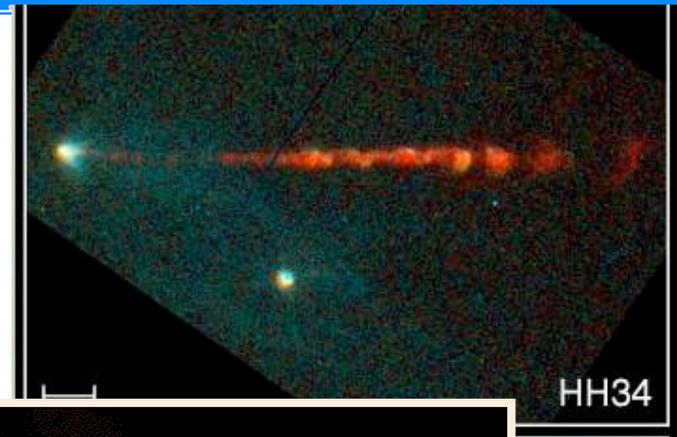
Submillimeter Proto

$< 10000 \text{ yr}$

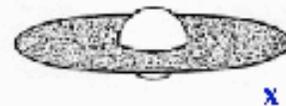
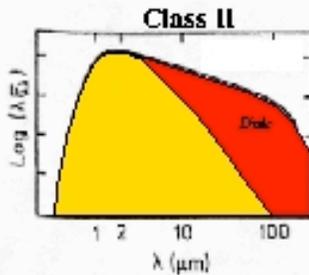


Infrared Protostar

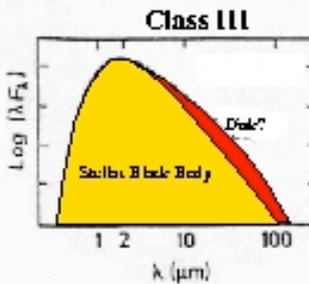
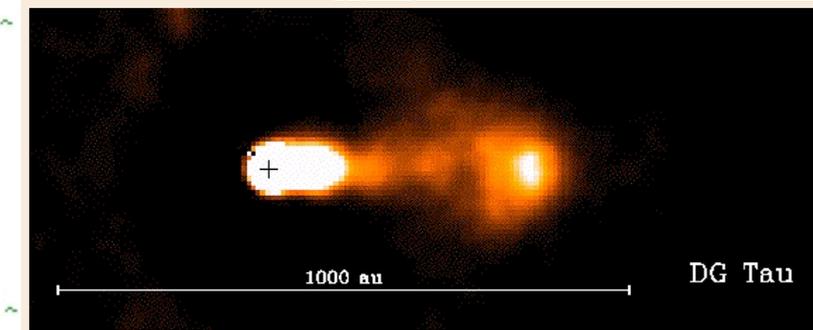
$\sim 100000 \text{ yr}$



Birthline



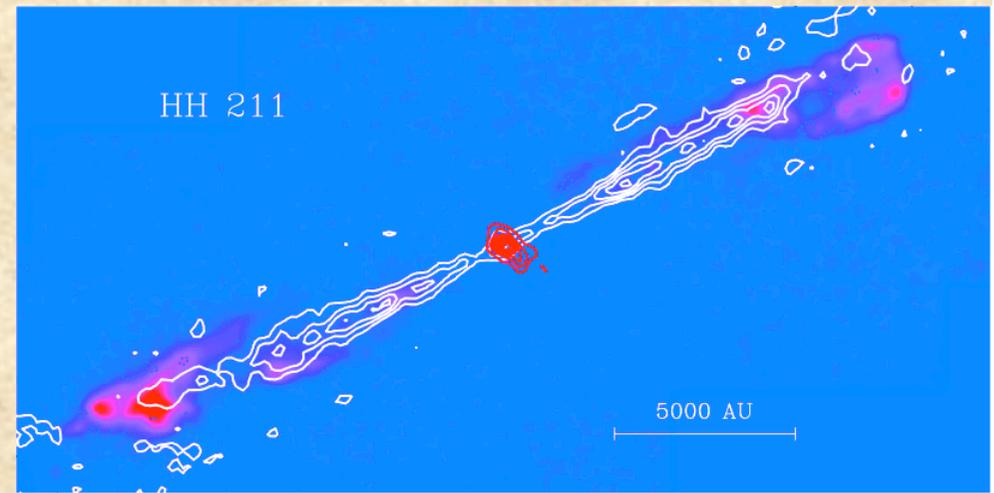
T Tauri (CTTS)



Time

Flots moléculaires (Classes 0)

- Molécules CO, SiO, H₂
- Masers H₂O bipolaires (40 %)
- Longueur qqqs 0.1 pc
- V_j=10-30 km/s
- Variabilité:
 - ⇒ Noeuds espacement 1000 au



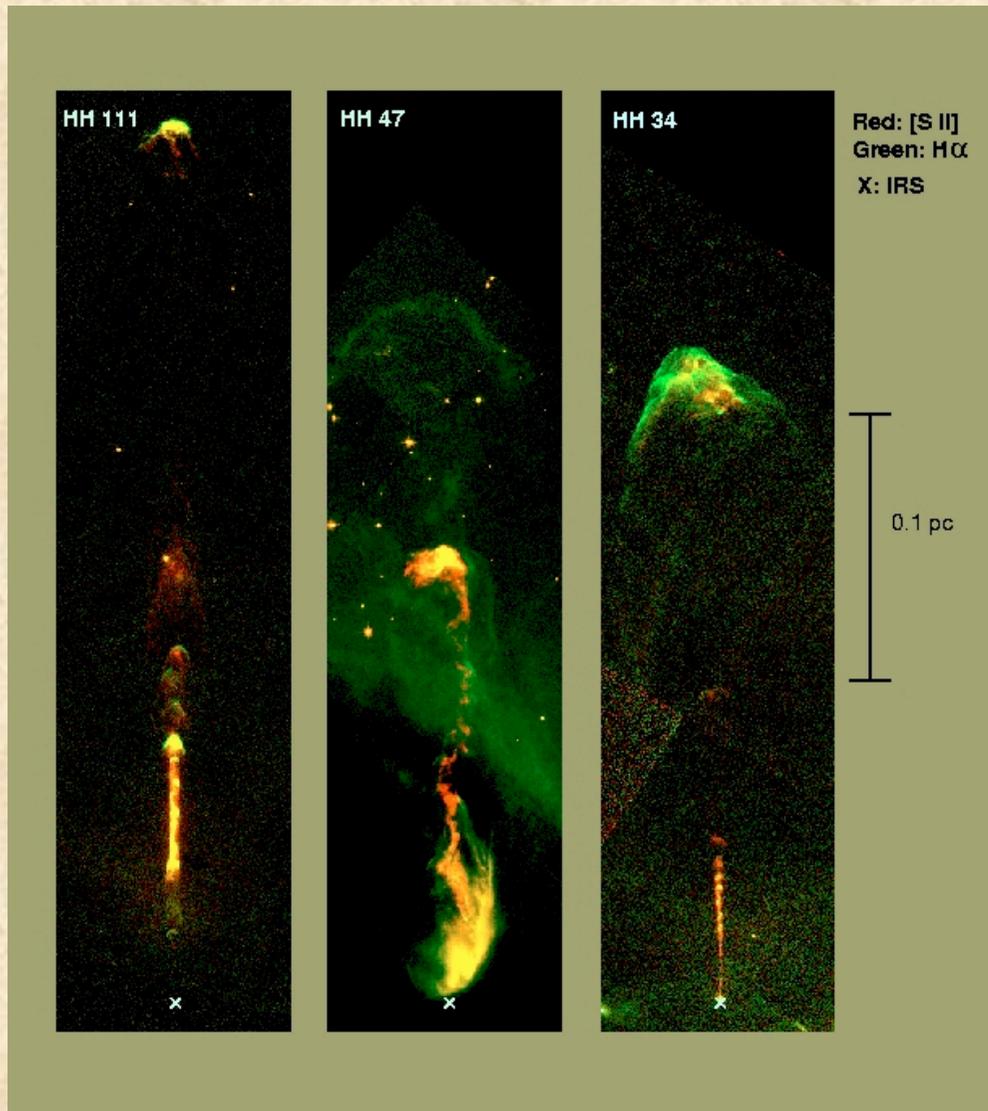
Gueth et Guilloteau 99

- Fort degré de collimation
- $M_{\text{co}}V_{\text{co}}/\Delta t_{\text{dyn}} = F_{\text{co}} \approx 10^3 \text{ Lbol}/c$

⇒ ne peuvent être radiativement accélérés

⇒ entraînés par une composante non observée (jet optique) ET collimatée ou bien jet lui-même est moléculaire (Lery et al 99) ?

Jets atomiques (Classes I)

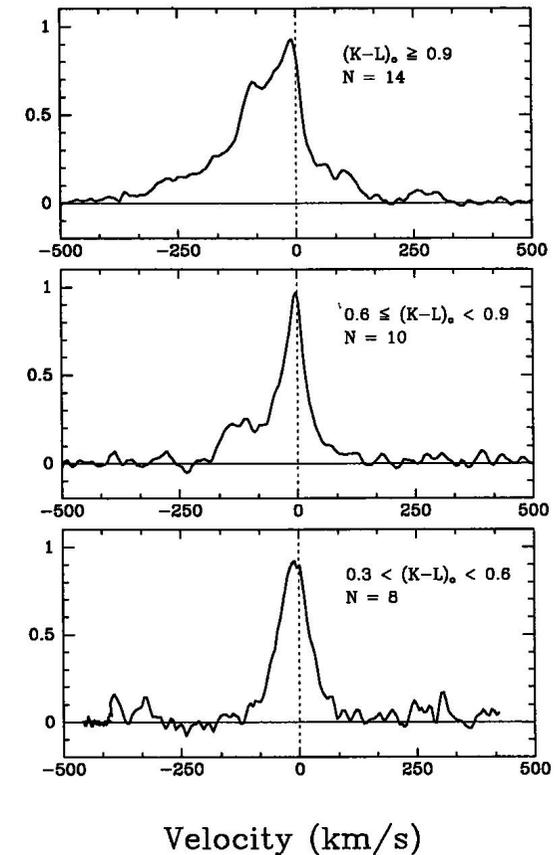
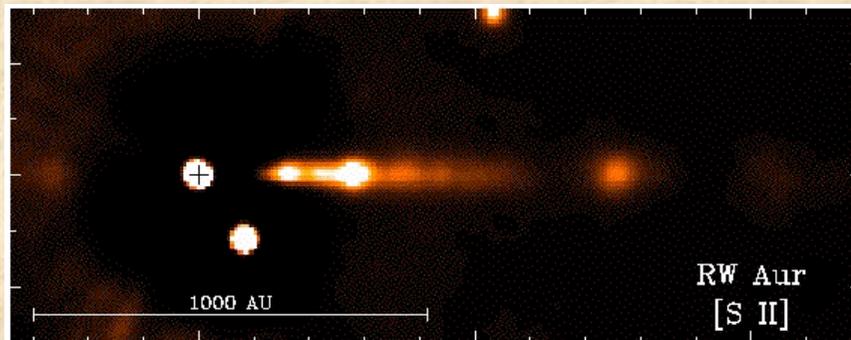
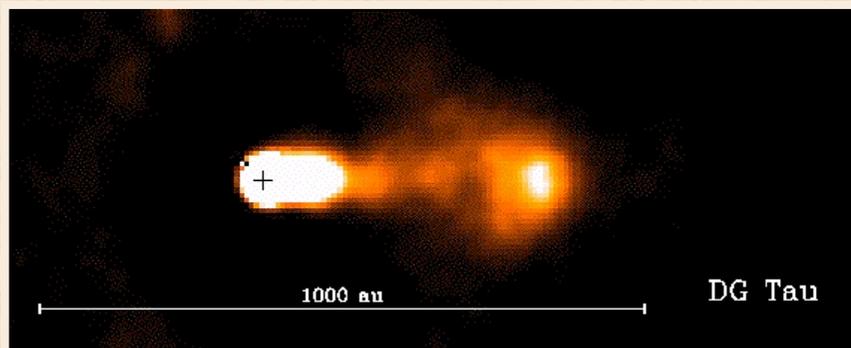


Reipurth et al (2000)

- Raies en emission Opt/IR: H α , [SII]6731 A, [OI]6300 A, [NII] 6584 A, [FeII] 1.25, 1.65 μ m
T=10⁴ K (cs=10 km/s)
- Vflow = **300-400 km/s**
=> Jets Supersoniques
- Extension: \approx pc, tdyn= qqs
10⁴ ans \approx **durée de vie phase enfouie**
- Angle d'ouverture $\theta=0.5-5^\circ$
=> Forte collimation
- Emission structurée (objets de Herbig-Haro):
=> Variabilité 10-1000 ans

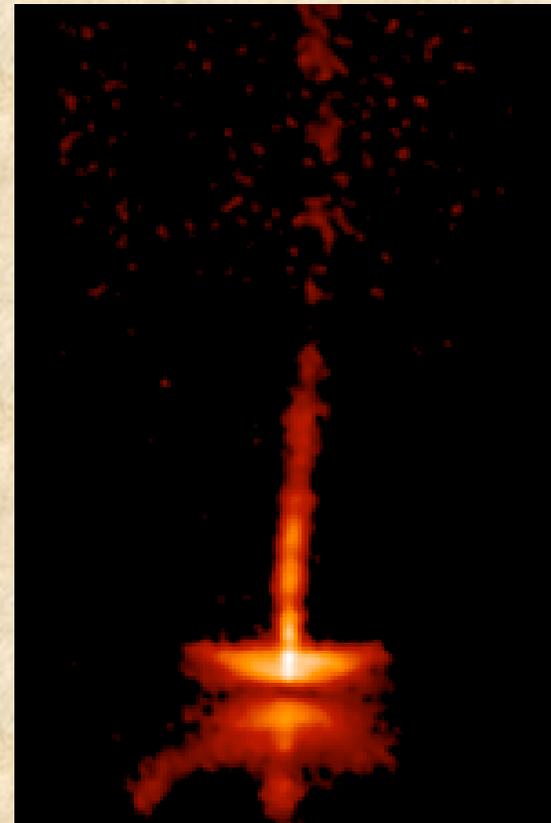
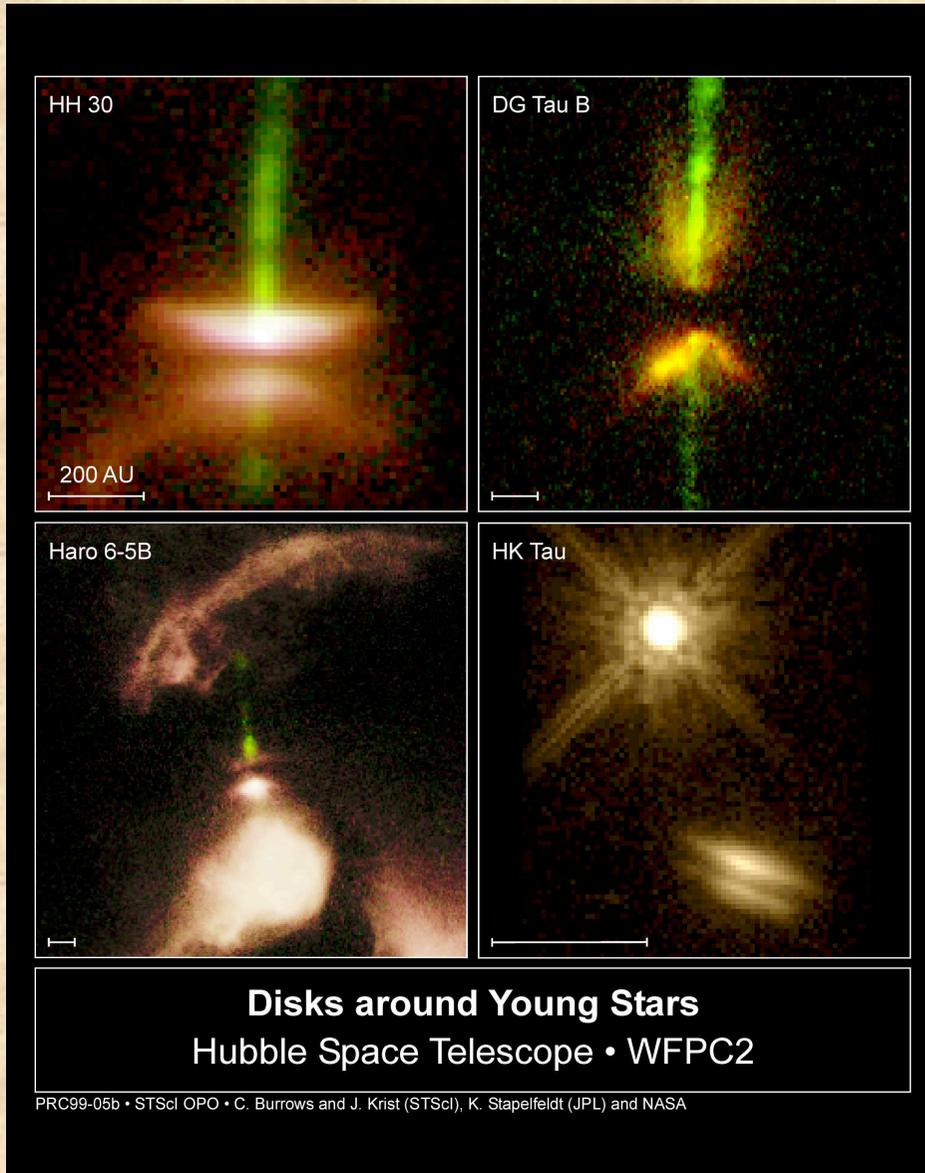
Microjets des T Tauri (Classes II)

- Raies interdites en émission décalées vers le bleu
- Microjets détectés par techniques de soustraction du continu (longue fente et/ou haute résolution spatiale) dans 30 % T Tauri (Hirth et al 1997). Extension: < 1000 au
- Accès aux régions internes (30-100 au)



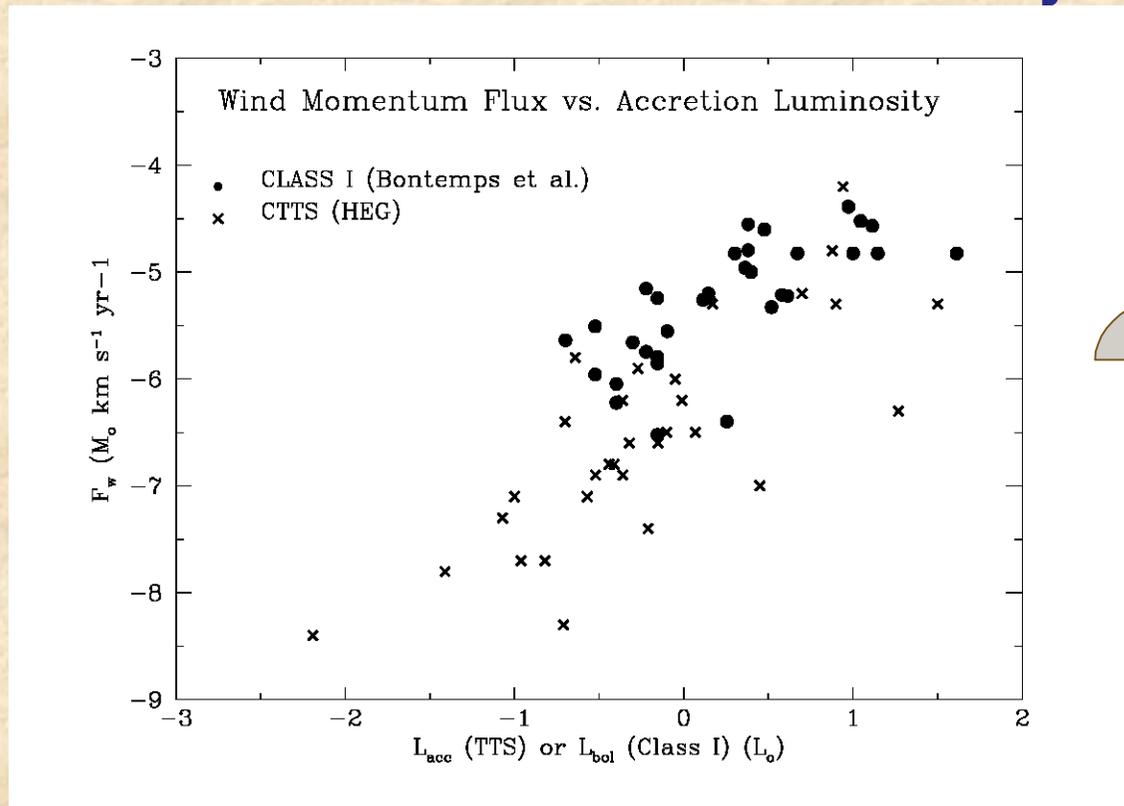
Dougados et al 2000

Disques et Jets



HH 30

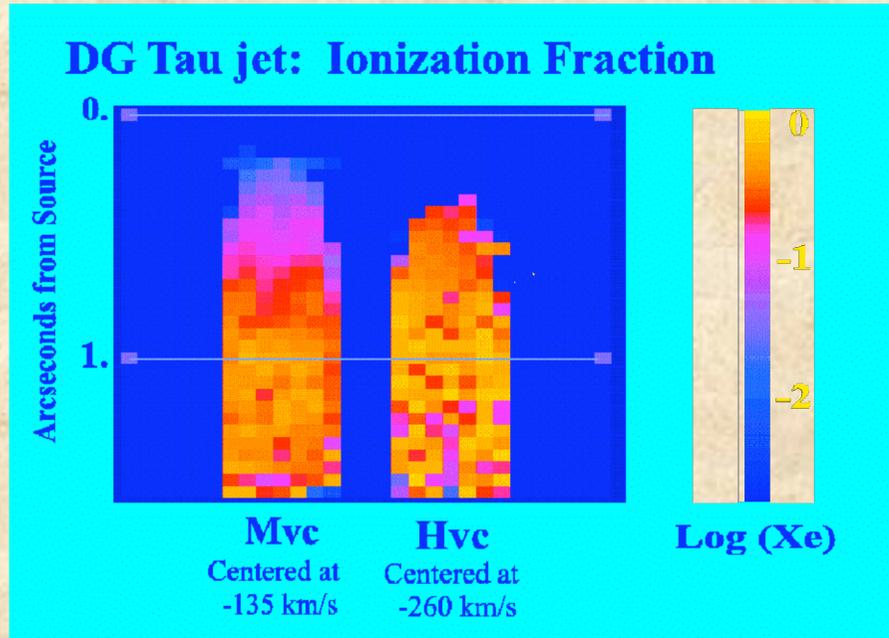
Une corrélation Accrétion/Ejection



Cabrit et al 90
Hartigan et al 95
Edwards 97

- Flux d'impulsion élevé: inexplicable par rayonnement
- Flux de masse élevés: 1-10% masse éjectée à TOUTES les phases $M_{\text{jet}}/M_{\text{acc}} = 1-10 \%$
- Cinématique: $V_{\text{jet}} \approx 3-6 V_K(r_0)$ où r_0 bord interne disque

Conditions d'excitation des Raies



Bacciotti et al (2001)

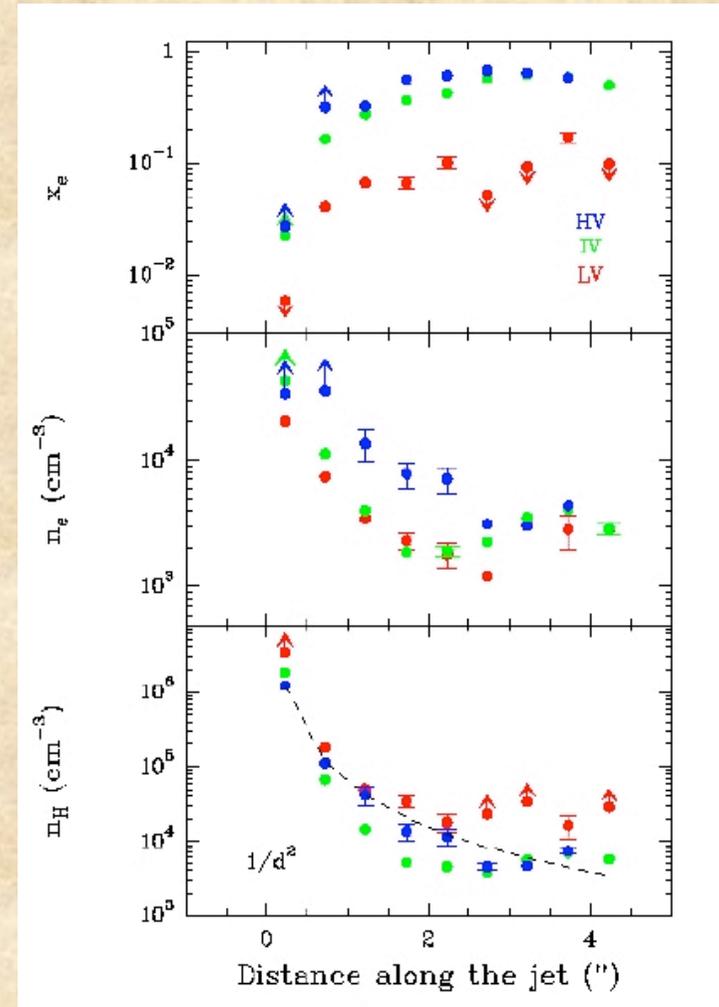
Bacciotti & Eisloffel (1999)

- o $T_e = 8000-1.5 \times 10^4$ K

- o $x_e \uparrow 10-50\%$ à $d > 100$ au .

- o $n_H > 10^5-10^6$ cm⁻³ à $d = 30$ au

- o $\approx 10^3-10^4$ cm⁻³ à $d > 500$ au



Lavalley-Fouquet et al (2000)

=> Quel est le mécanisme de chauffage ?

Mécanismes d'excitation des raies

Emission optiquement mince de raies interdites: émissivité $J_{21}(n_e, T_e, x_e)$

$$J_{21} = n_2(A^i)/n(A^i) \times n(A^i)/n(A) \times n(A)/n_H \times n_H A_{21} h\nu_{21}$$

=> Nécessite connaissance: **eq. Statistique** (Te, ne) **eq. Ionisation** (Te, xe) **abondance** elt A

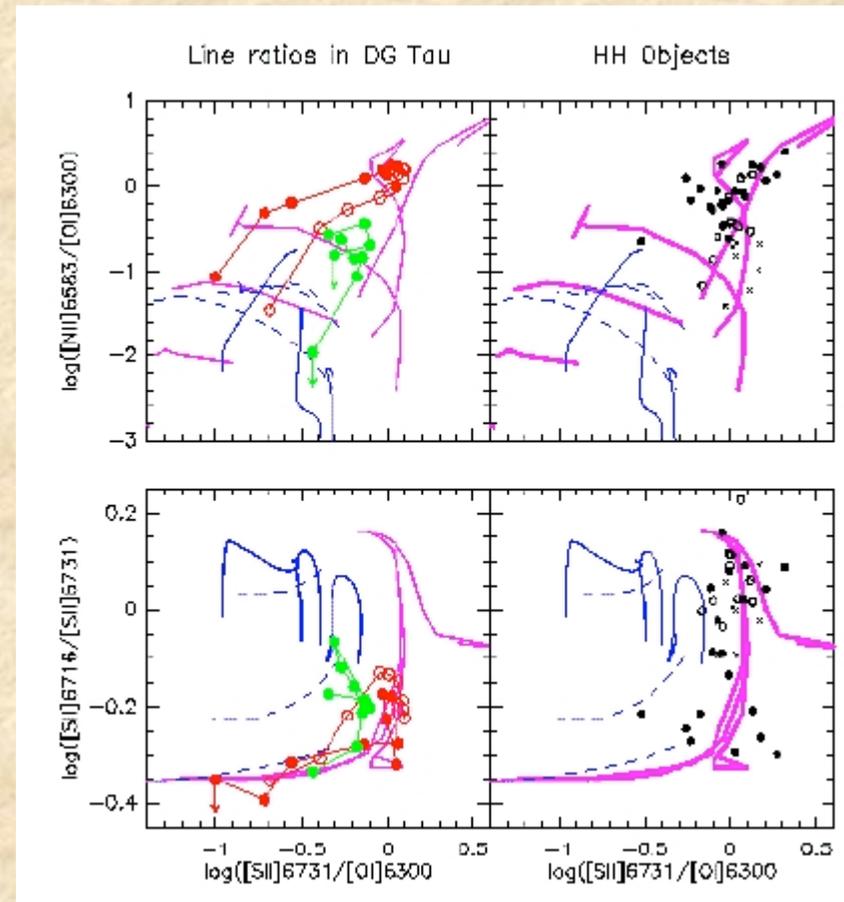
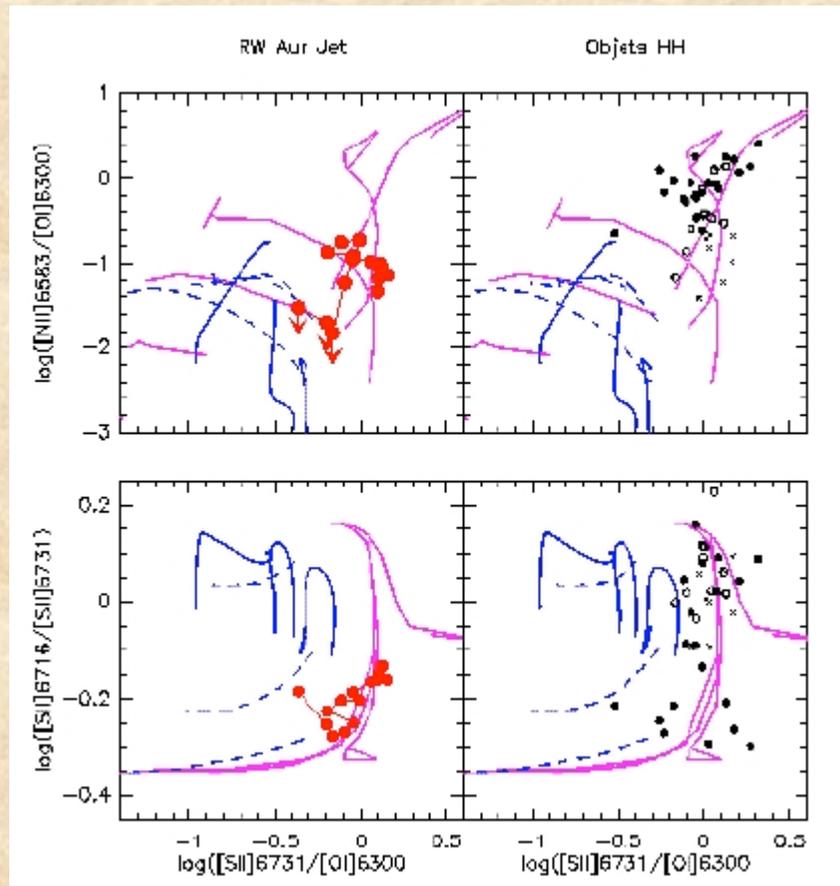
Mécanismes de chauffage et ionisation:

- Diffusion ambipolaire: processus de derive ions/neutres (Safier 1993)

$$\Gamma_{\text{MHD}} = \bar{\eta} J^2 + \left(\frac{\overline{\rho_n}}{\rho} \right)^2 \frac{\frac{1}{c^2} \|\mathbf{J} \times \mathbf{B}\|^2}{\overline{m_{in} n_i \nu_{in}}}$$

- Entrainement couche limite (cisaillement)
- Chocs radiatifs (C ou J)
 - Internes ou avec le milieu extérieur
 - Instabilités
- Rayonnement ionisant: UV et X

Les chocs dominant l'excitation



Lavalley-Fouquet et al 2000

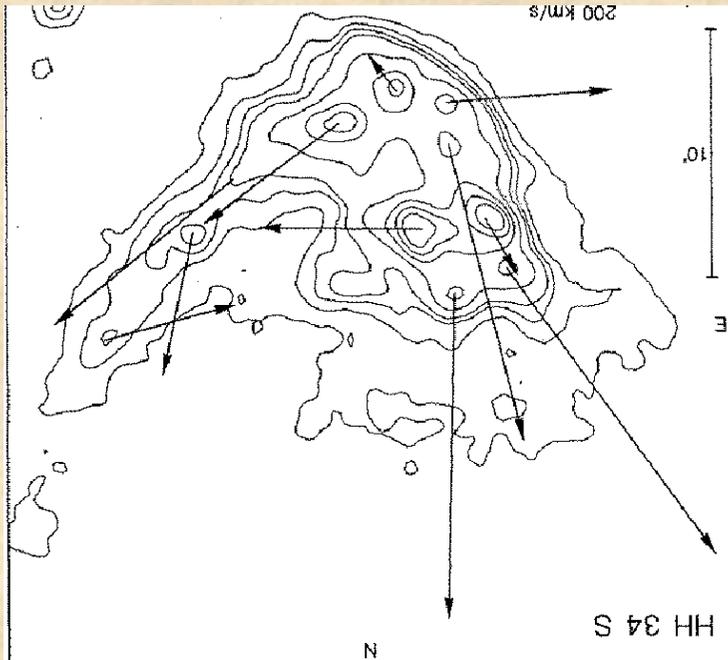
Rose: modèles de chocs
Bleu: diffusion ambipolaire
Pointillés: couche limite

Paramètres des chocs:

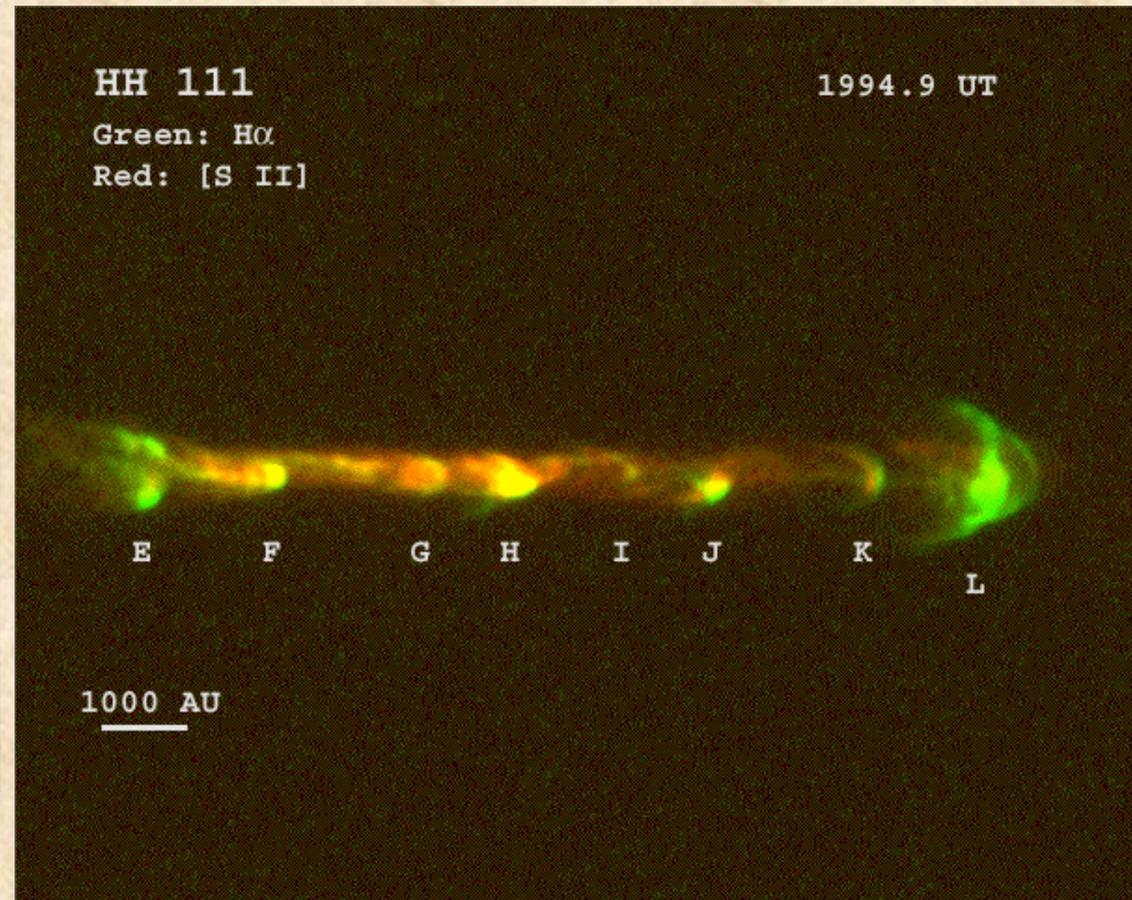
- $V_s = 30-70$ km/s
- $n_0 = 10^5$ to 10^3 cm⁻³
- $B_0 = 30-100$ microG

Variabilité des Jets

Objets de Herbig-Haro:



Eisloffel & Mundt 92

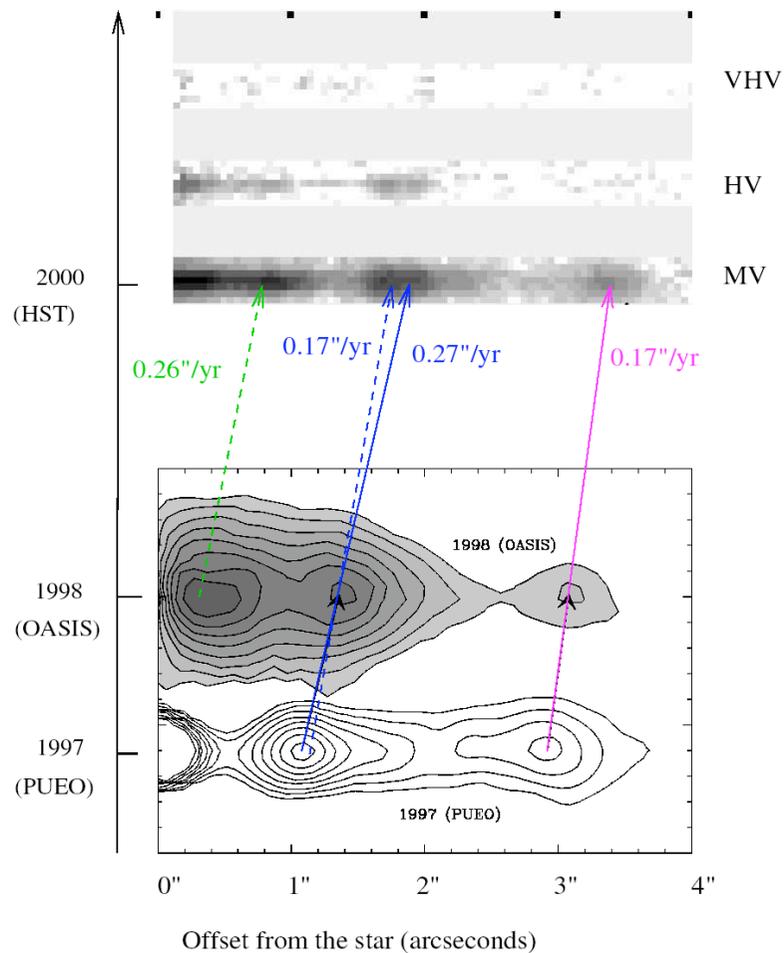


Quelle est l'origine de ces chocs ?

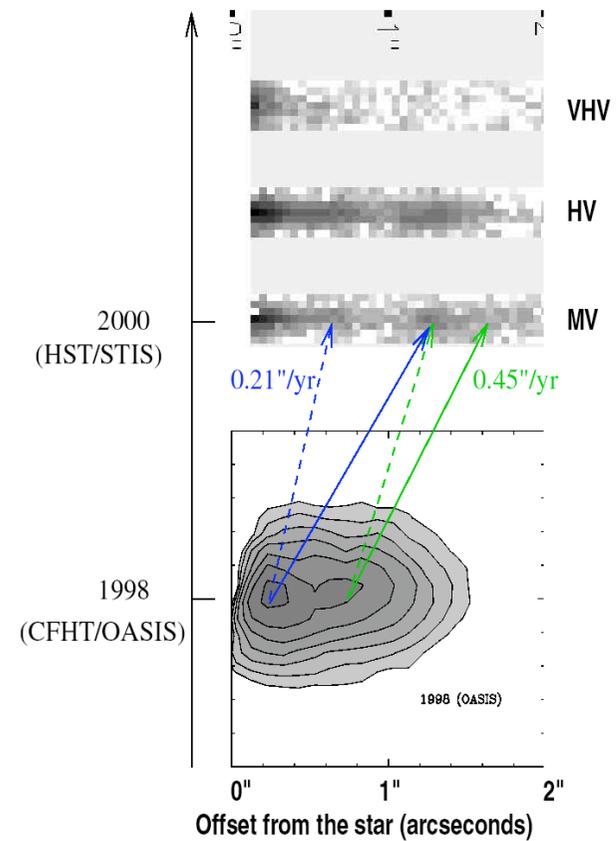
- Instabilités (HD ou MHD) internes ?
- Instabilités (HD ou MHD) liées à l'interaction avec le milieu ambiant ?
- Ejection sporadique: variabilité de la source elle-même ?

Une variabilité de la source ?

Proper motions in the RW Aur red-shifted jet



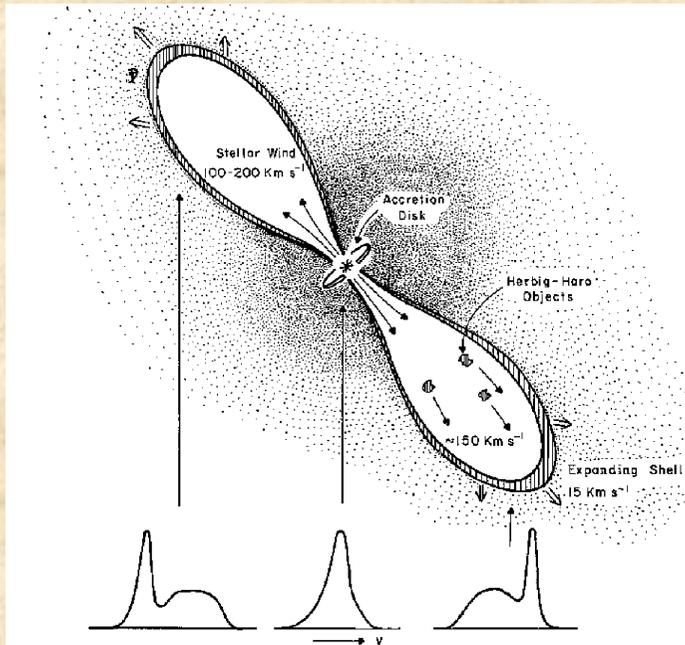
Proper motions in the RW Aur blue-shifted jet



Lopez-Martin et al 2003

- Symétrie des noeuds observés jet/contrejet (eg. HH 212)
- Ejection simultanée

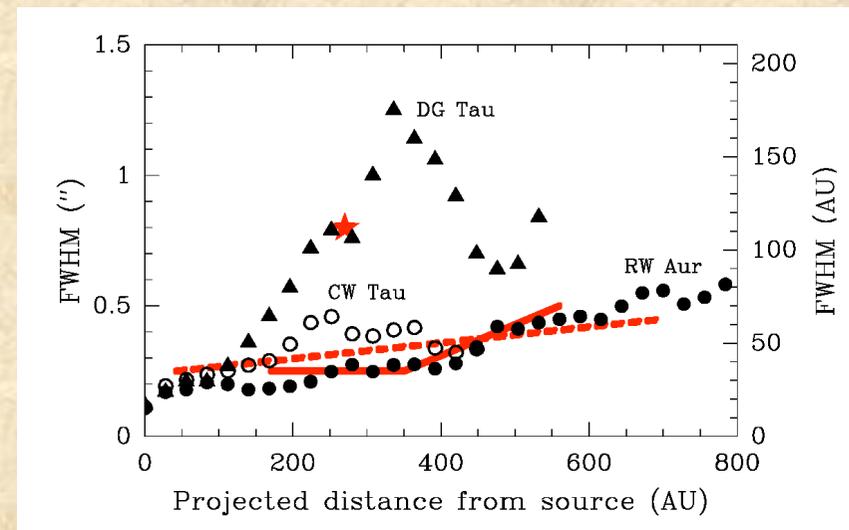
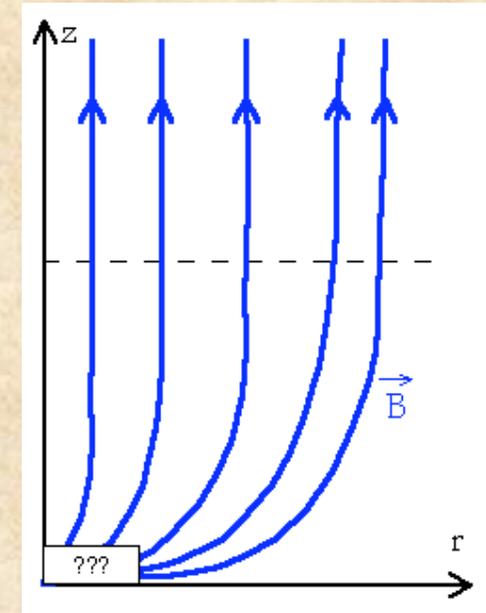
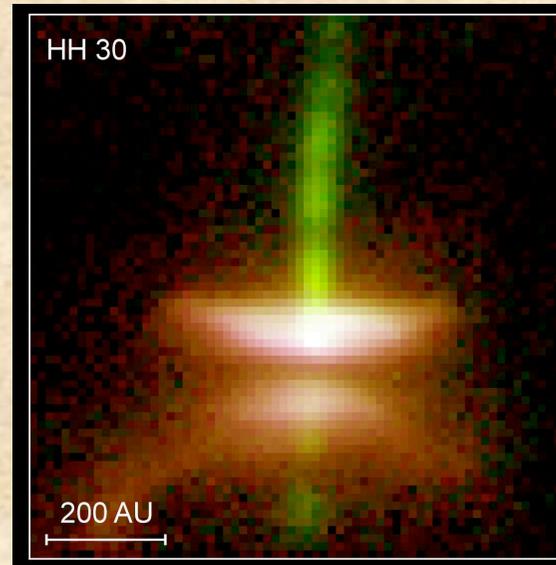
Confinement des Jets



Snell et al 80

- Les jets optiques résolus
- sont déjà confinés à 30-50 au de la source
 - sont déjà supersoniques
 - ont un angle d'ouverture de qq degrés

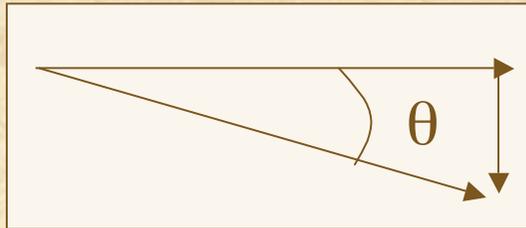
=> Seul B peut faire cela.



Dougados et al 2000

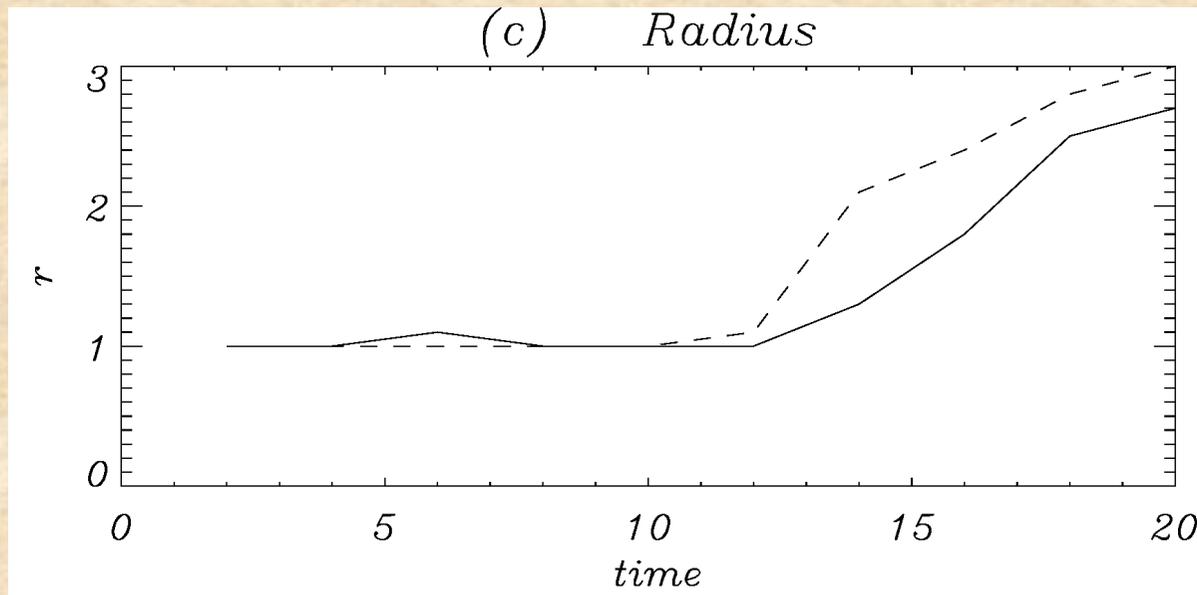
Confinement et Propagation

Une fois le jet lancé ET supersonique: angle d'ouverture θ faible



$$\theta \approx \tan \theta = C_S/V_{\text{jet}} \ll 1$$

Mais un jet purement HD verrait son rayon croître (instabilités K-H)...



Bodo *et al.* 98
Micono *et al.* 00
Bati & Keppens 03

=> Champ magnétique joue encore un rôle dans propagation des jets (développement/saturation d'instabilités)

II- Une éjection d'origine magnétique

Source d'énergie des jets = accrétion

1. Corrélation accrétion-éjection à TOUTES les phases
2. Vitesses des jets indiquent zones centrales (de l'ordre de 0.1 au)

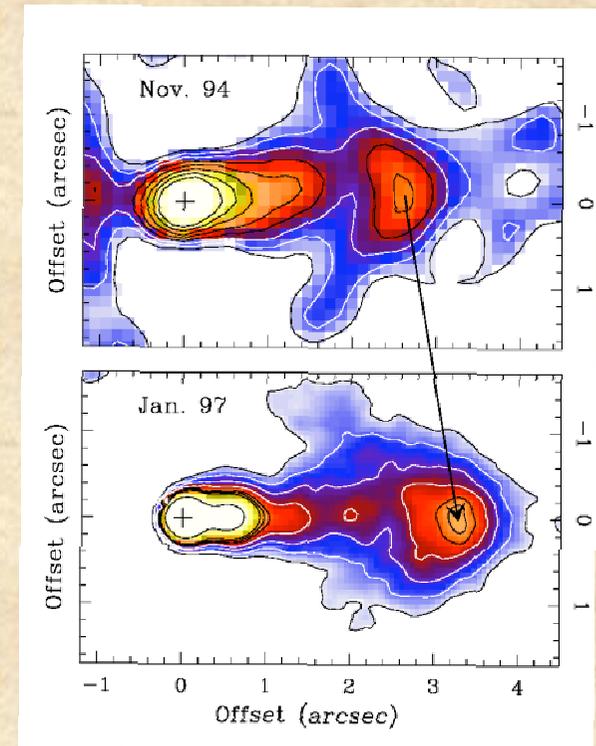
Jets sont des écoulements « globalement » stationnaires

1. Jets variables sur échelles de temps longues (qq années à 1000 ans)
2. Variabilité probable de la source
3. Emission des jets (raies interdites) probablement due à des chocs, MAIS vitesses chocs \ll vitesses jet

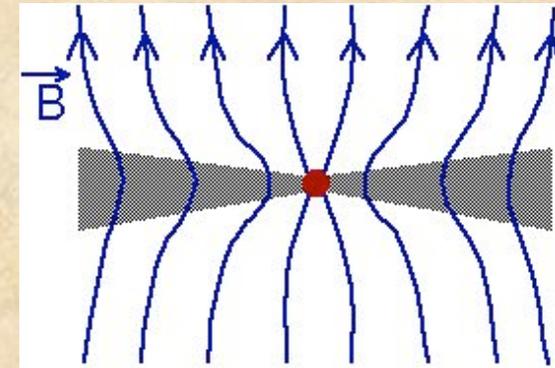
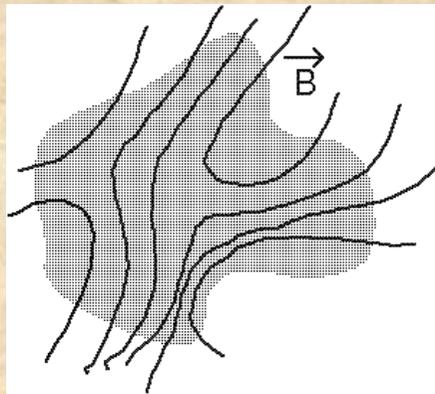
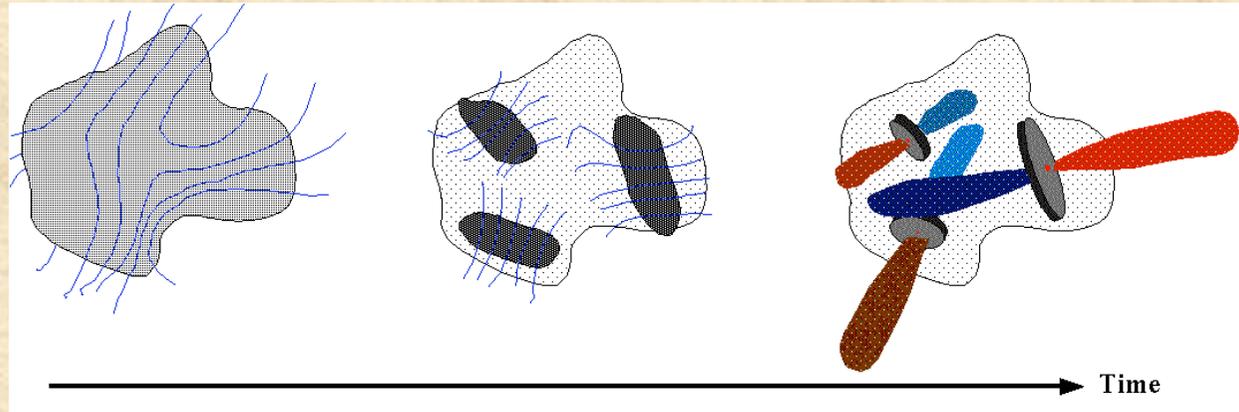
Jets sont initialement accélérés et confinés par B

1. Echelles spatiales trop petites pour autres processus
2. Conditions d'ionisation semblent suffisantes

=> Recherche de modèles MagnétoHydroDynamiques stationnaires



Origine et topologie du champ ?



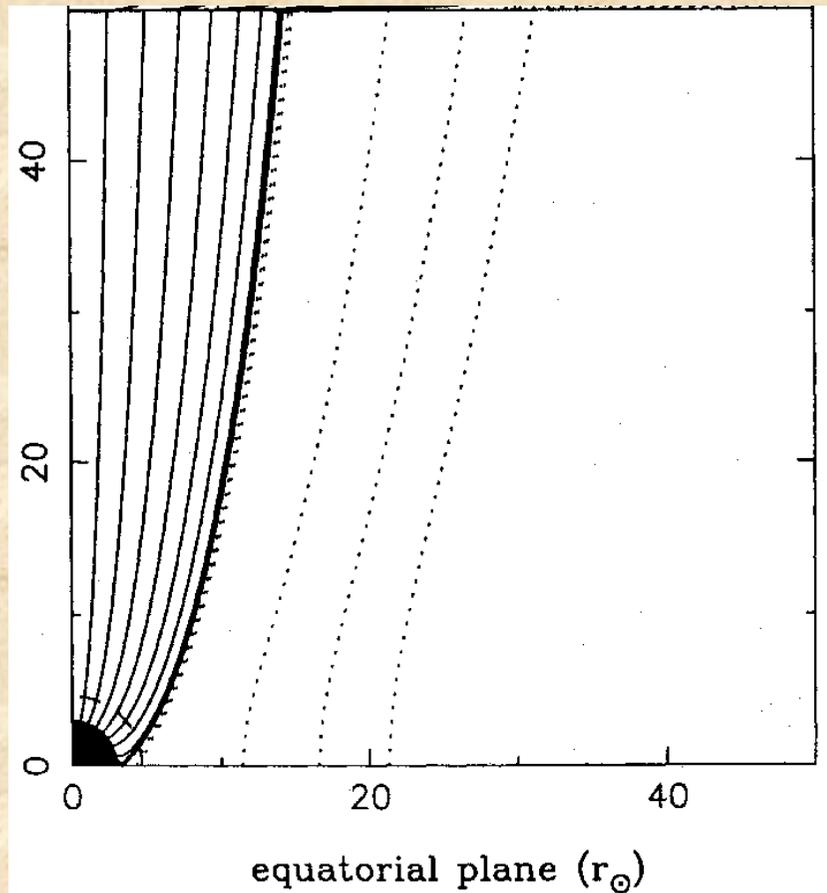
$$\left. \begin{array}{l} L \approx 0.1 \text{ pc} \\ n \approx 10^5 \text{ cm}^{-3} \\ B \approx 100 \mu\text{G} \end{array} \right\}$$

$$B \propto \sqrt{n}$$

Heiles *et al.* 93
Basu & Mouschovias 94

$$\left\{ \begin{array}{l} L \approx 1 \text{ au} \\ n \approx 10^{16-18} \text{ cm}^{-3} \\ B \approx 10^{1-3} \text{ G} \end{array} \right.$$

Vents stellaires



Parker 58

Weber & Davis 67

Hartmann & McGregor 82

Lago 84

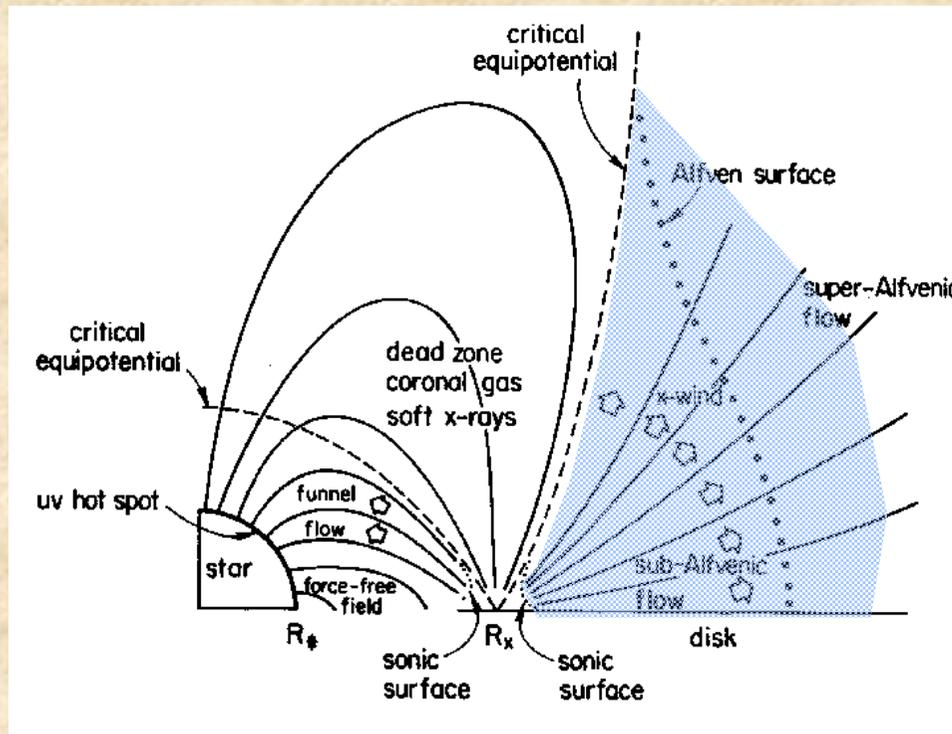
Sauty & Tsinganos 94, 00

Sauty et al 02

- $B \approx 10^2 - 10^3$ G
- Solutions auto-similaires existent (dévlpt au voisinage de l'axe)
- Vitesses observées possibles avec $T \geq 10^6$ K
- Flux de masse ? Difficile pour étoiles de faible masse (Königl 86)...

=> Reste à prouver si pertes radiatives trop élevées ?

« X-winds »



Camenzind 90

Shu *et al.* 94, Shang *et al.* 02

Lovelace *et al.* 95, 99

Fendt & Elstner 00

- $B \approx \text{kG}$

- Solutions non auto-similaires mais incomplètes:

- Calcul complet zone sub-Alfvén
- Calcul approché permettant raccord avec solution asymptotique

=> Reste à prouver si le disque permet

- le flux de masse imposé
- la configuration magnétique

Jets de disques

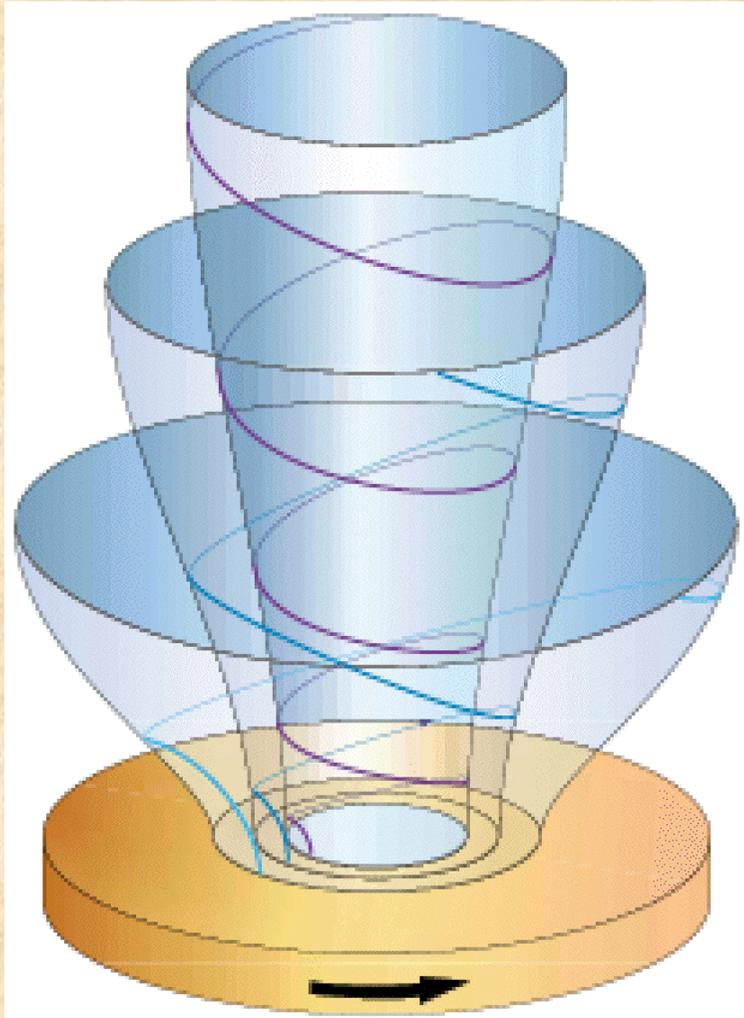
Blandford & Payne 82

Wardle & Königl 93, Li 95, 97

Ferreira & Pelletier 93,95

Casse & Ferreira 00a,b

Vlahakis et al. 00, Ferreira & Casse 04

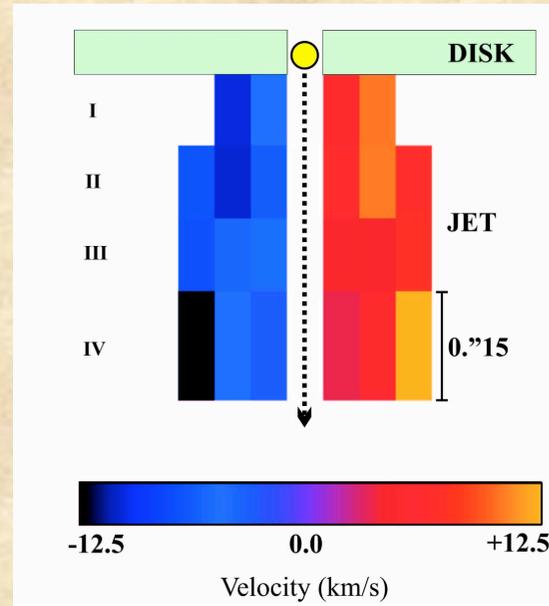


- $B \approx$ equipartition
- Solutions complètes auto-similaires existent
- Modèle « Universel » (YSO, AGN, microquasars, GRB?)

=> A quel point peut-on se fier aux résultats issus de solutions auto-similaires ?

Signatures de rotation dans les jets

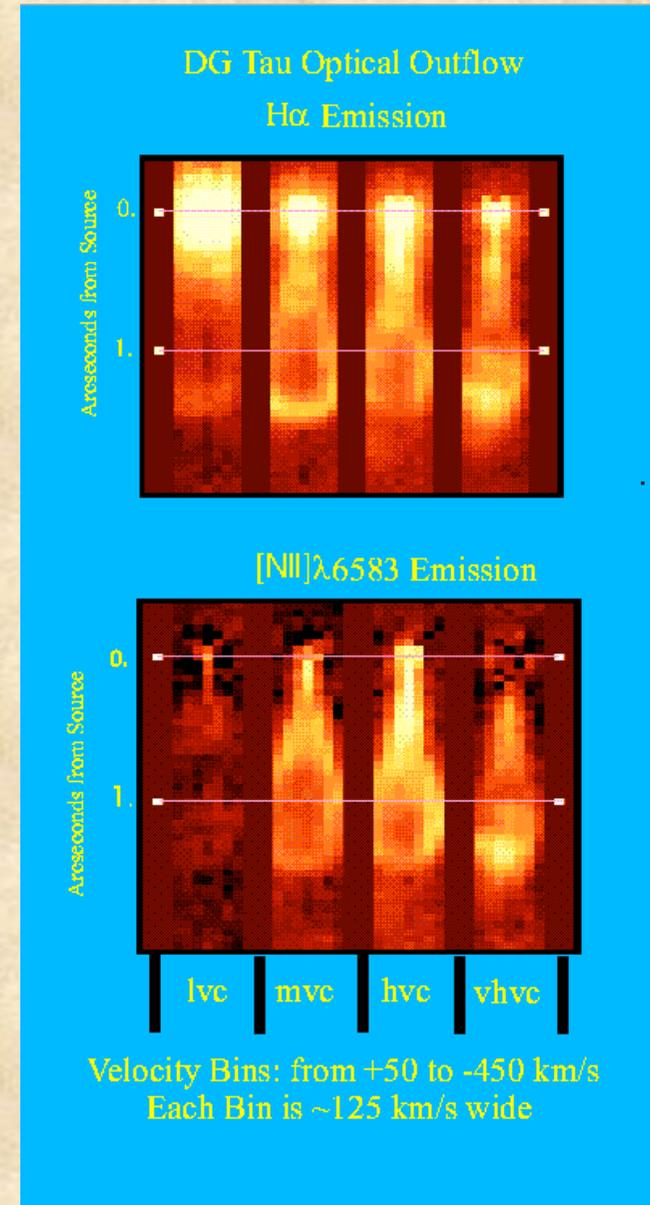
DG Tau
Observations
HST/STIS



Bacciotti et al 2000

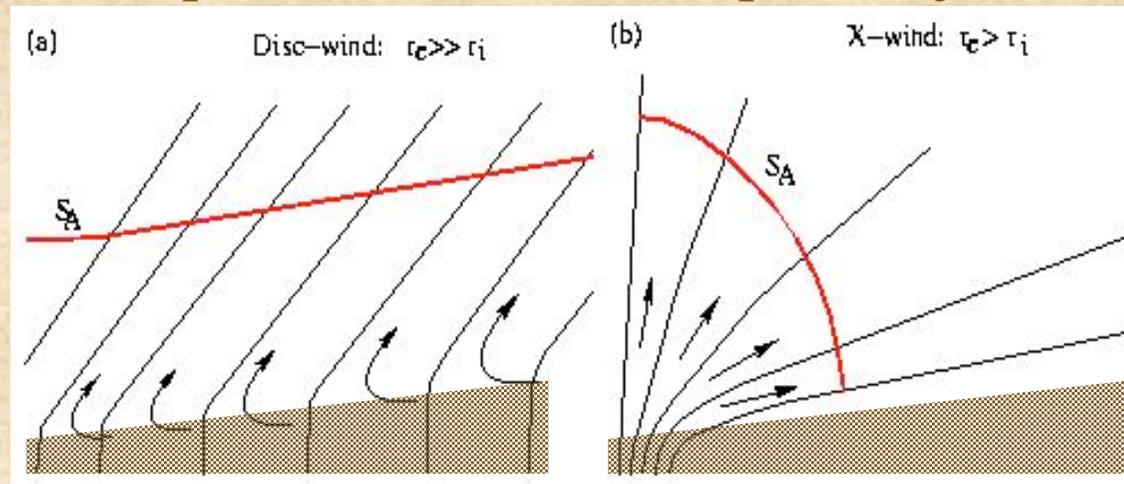
1. Le degré de collimation augmente avec la vitesse d'écoulement
2. Echelle d'accélération non résolue <20 au

⇒ **Modèle MHD: rayon d'éjection 2-3 au**
(Anderson et al 2003)



Conséquences

- Soit on n'observe pas la rotation des jets...
- Soit distribution continue de B depuis 2-3 au jusqu'à l'étoile
=> jets YSOs sont issus des disques
- Soit il y a un trou dans la distribution du flux magnétique
=> jets YSOs 2 composantes: Vents-X (rapide) + jets disques (lents)

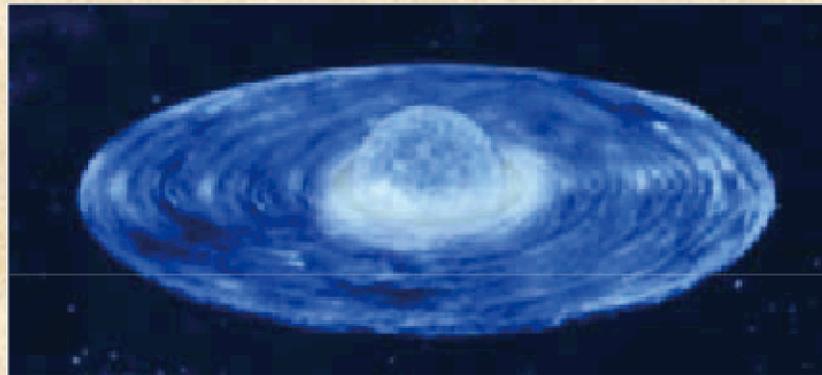


Distinction entre « vent de disque » et « vent-X » est formelle

Il est possible qu'il y ait une évolution entre Classes 0 et II...

III- Quelle interaction étoile-disque ?

A- Couche limite équatoriale



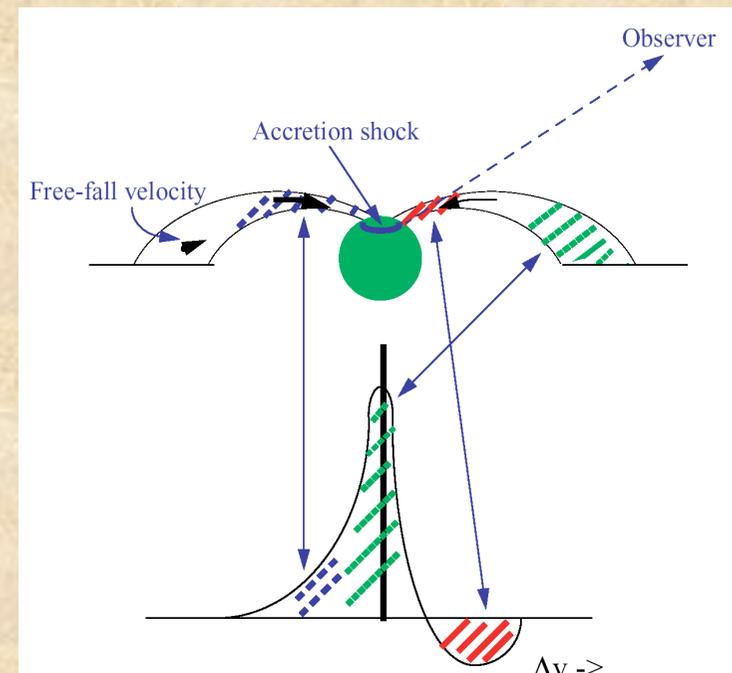
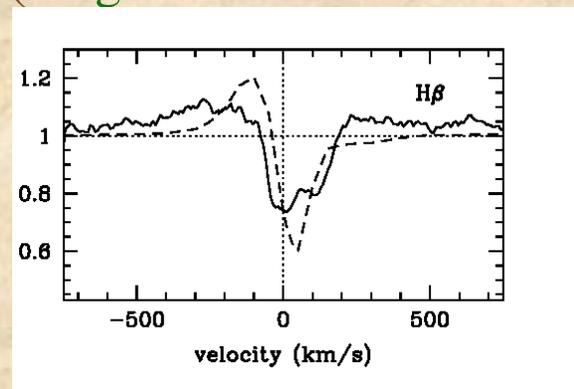
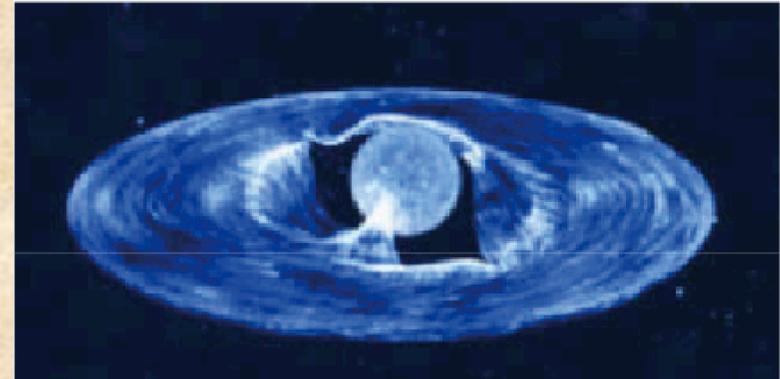
Bertout & Regev 92
Popham *et al.* 93

- Continuité de l'écoulement
- Explique le rayonnement UV observé (couche limite)
- MAIS
 1. Accélère étoile ($\Omega_*^2 < GM/R_*^3$): **Non observé**
 2. Observations d'interaction magnétique

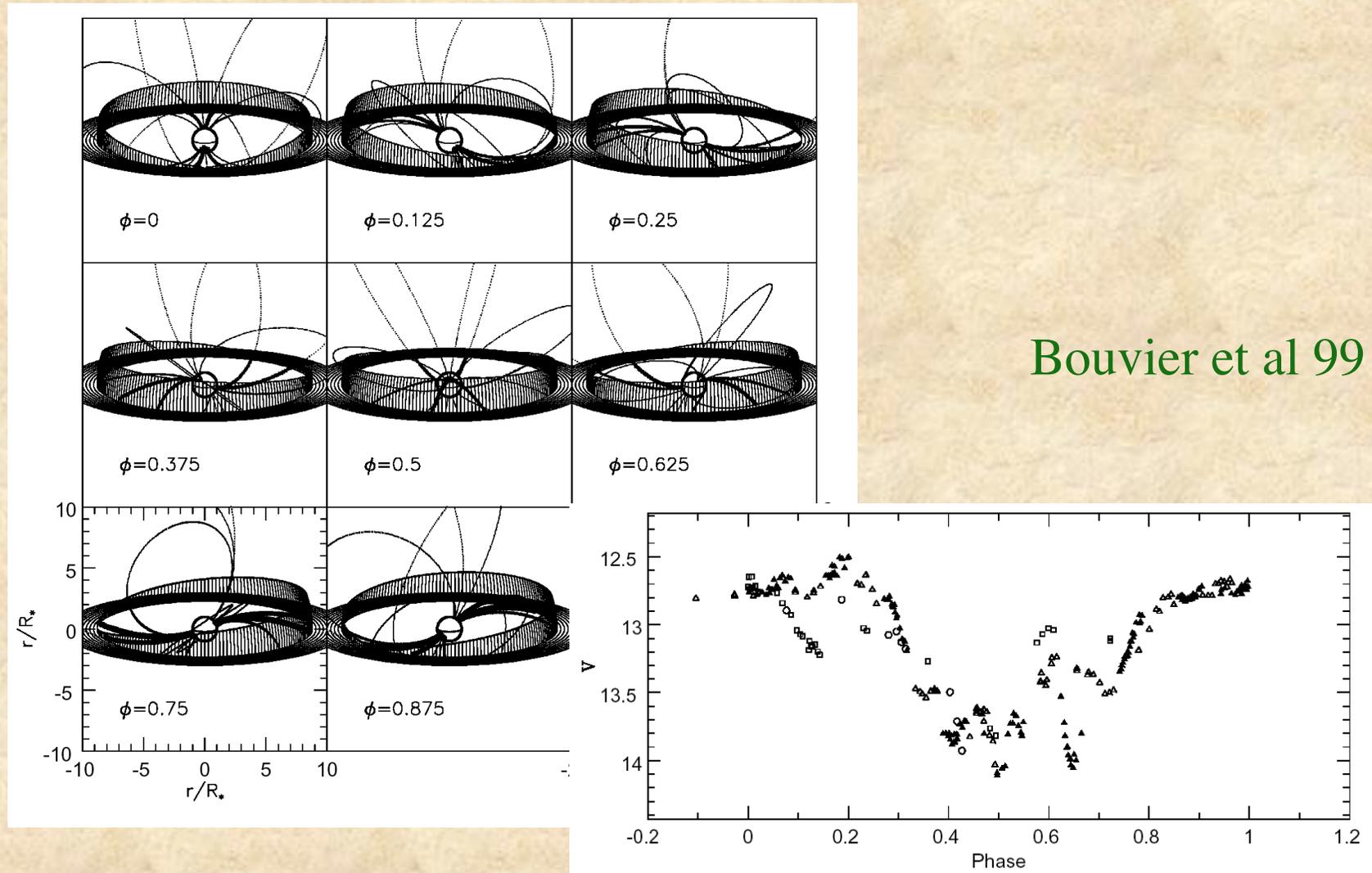
B- Interaction magnétosphérique

Nappes d'accrétion magnétosphériques

- Signatures de matière en chute rapide sur l'étoile (Edwards *et al.* 94, Calvet 04)
- Absence de rayonnement IR de zone interne du disque (Johns-Krull & Valenti 01)
- Variabilité spectroscopique et photométrique (AA Tau, Bouvier *et al.* 99)
- Mesures de champs magnétiques **kG** (Günther et al 99, Johns-Krull et al 99)
- Forte activité X (Feigelson & Montmerle 99)



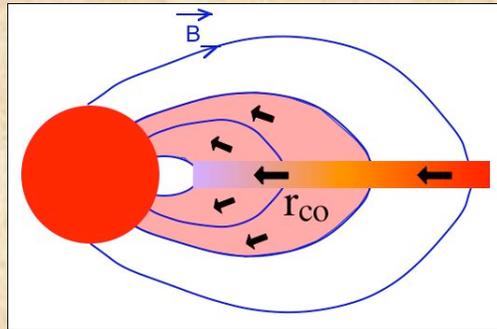
L'exemple (?) de AA Tau



Bouvier et al 99

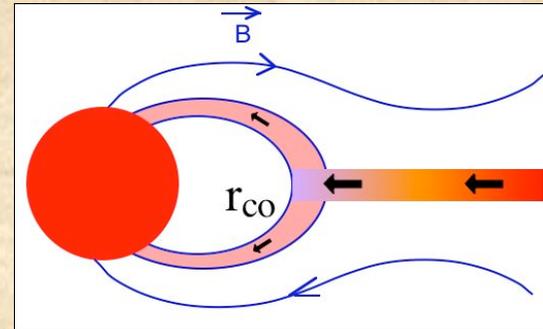
Eléments de physique « étoile-disque »

-Magnétosphère étendue ou magnétosphère « étroite » ?



Gosh & Lamb 79

Cameron & Campbell 93, Li 96



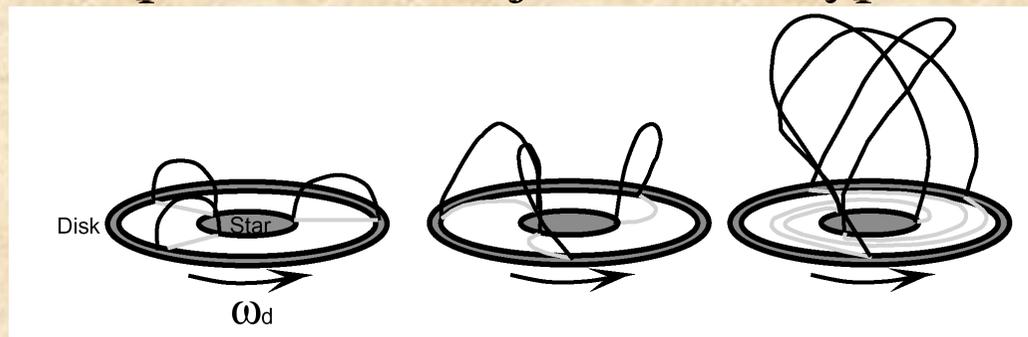
Camenzind 90, Shu *et al.* 94

Lovelace *et al.* 95, 99

Problème:

=> couple s'oppose à accrétion, champ diffuse (Bardou & Heyvaerts 96)

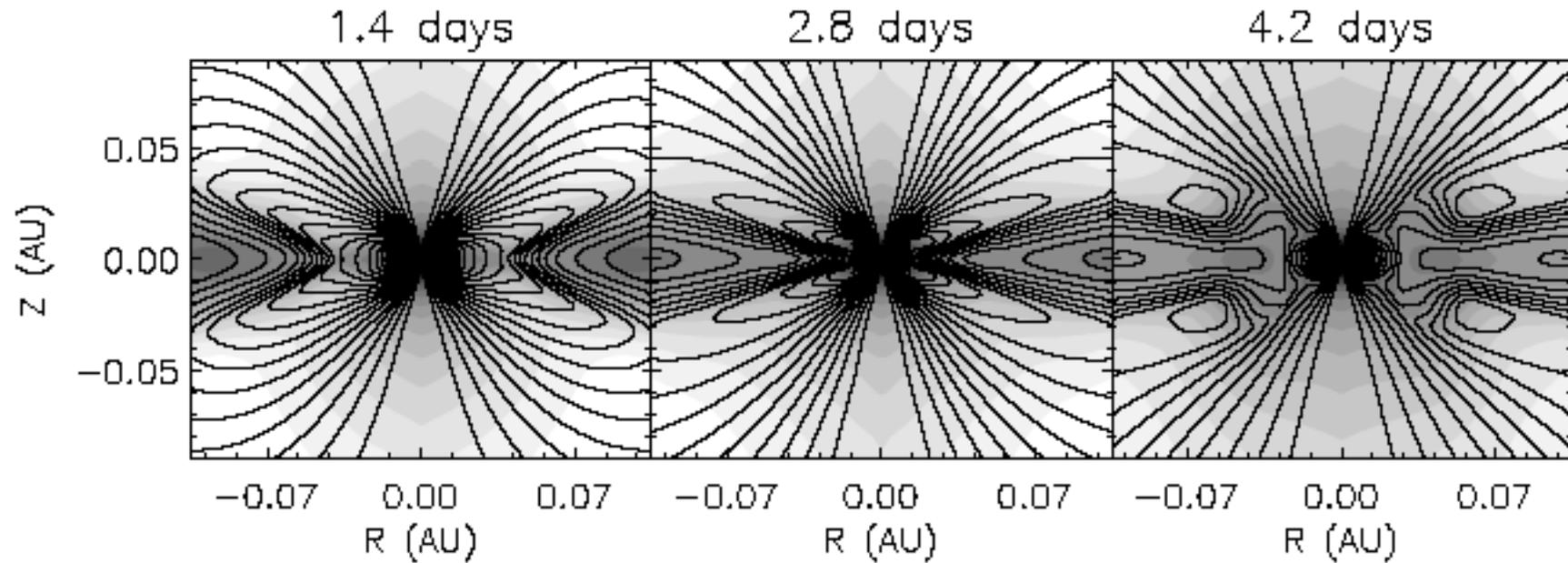
-Possibilité de production d'éjections du type CME ?



Lovelace *et al.* 95

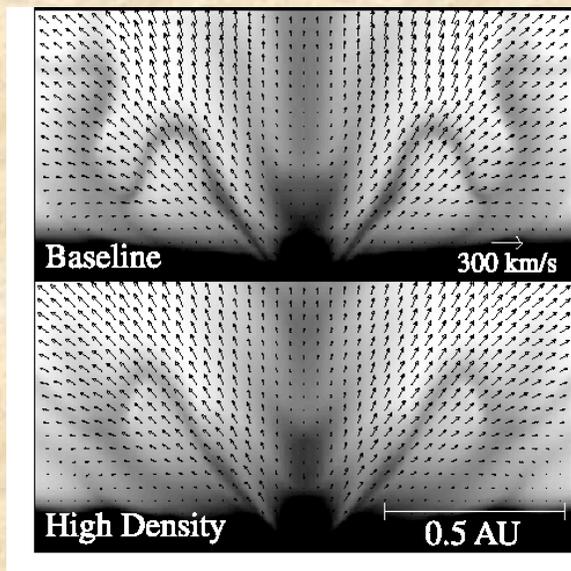
Hayashi *et al.* 96

Simulations Numériques (1)



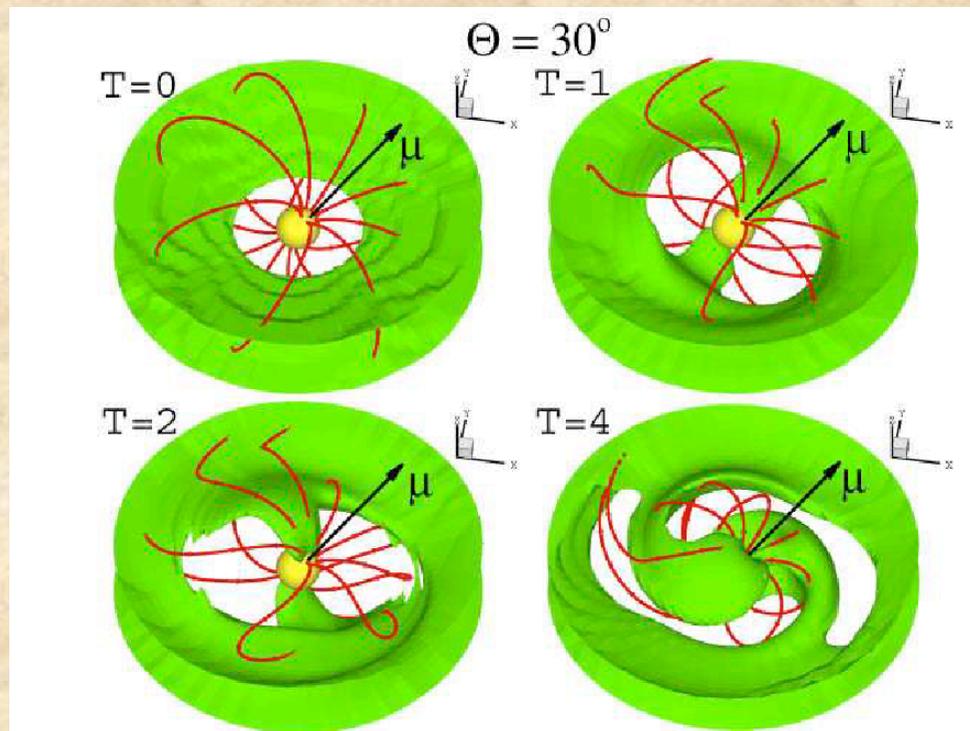
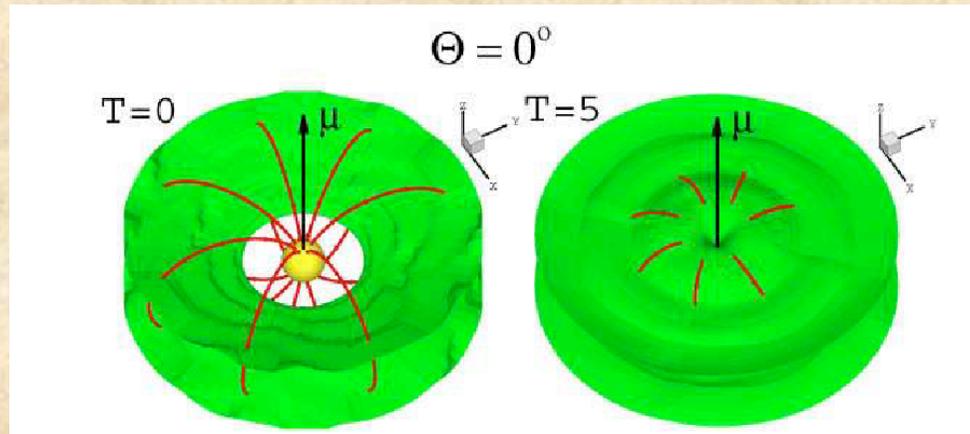
Goodson et al 97

Matt et al 2002

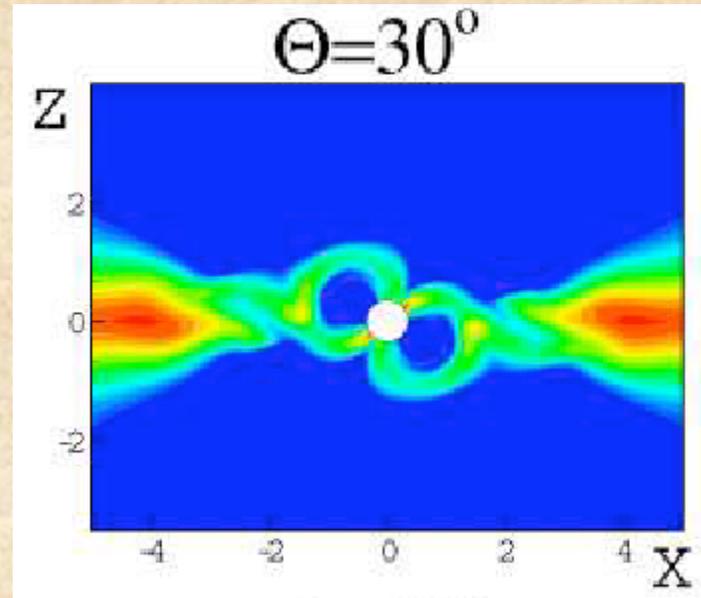


- CI violemment hors-équilibre
- CL étranges: étoile n'absorbe pas masse ($\rho, P, \mathbf{B}, \mathbf{v}$ fixés à leur valeur initiale)
- Champ magnétique trop faible (MRI)

Simulations Numériques (2)

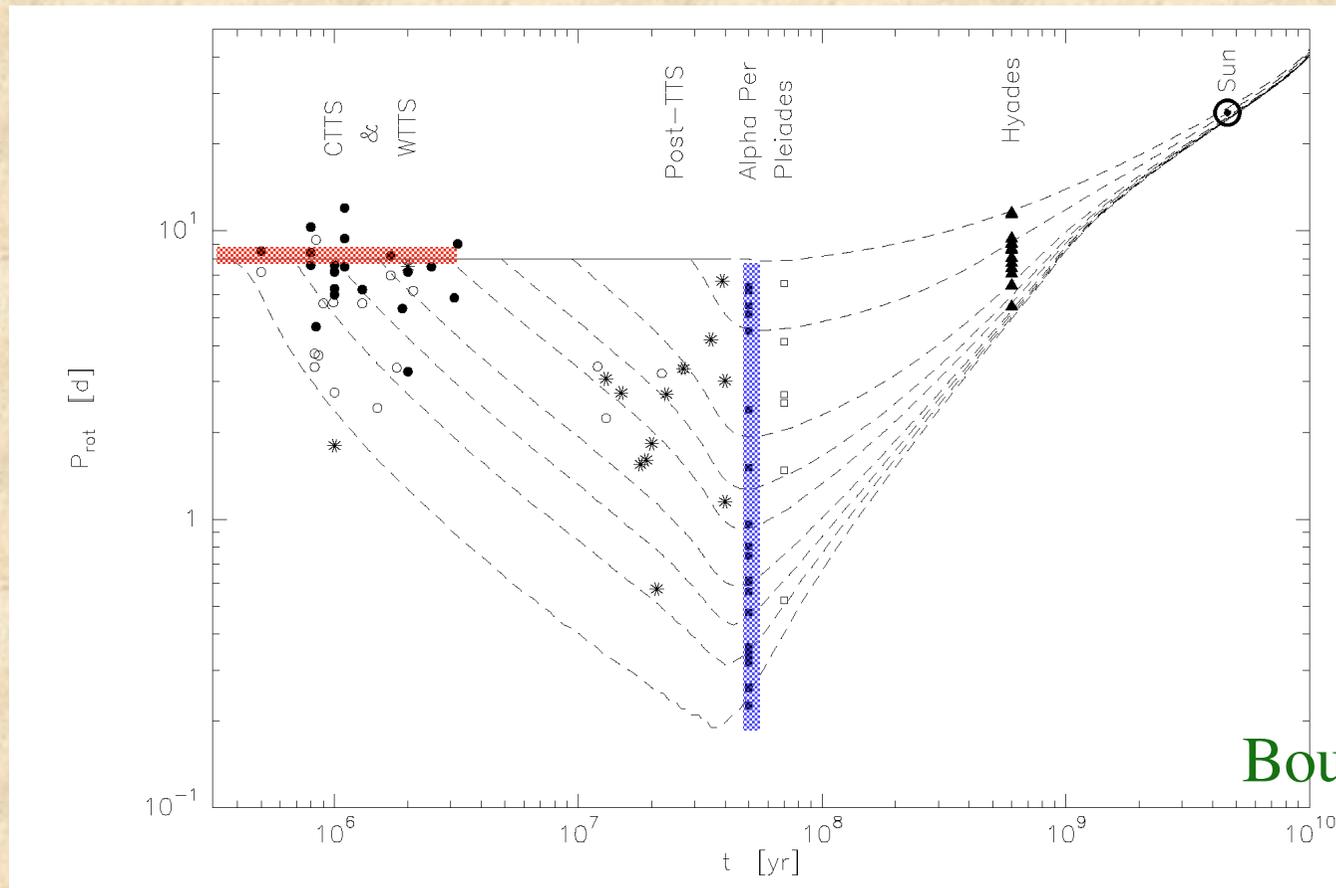


Romanova et al 2004



- CI proches équilibre
- Champ magnétique proche équipartition dans le disque
- ⇒ Absence d'éjection
- ⇒ Comportements attendus
- ⇒ Accélération de l'étoile

Evolution rotationnelle des étoiles PMS

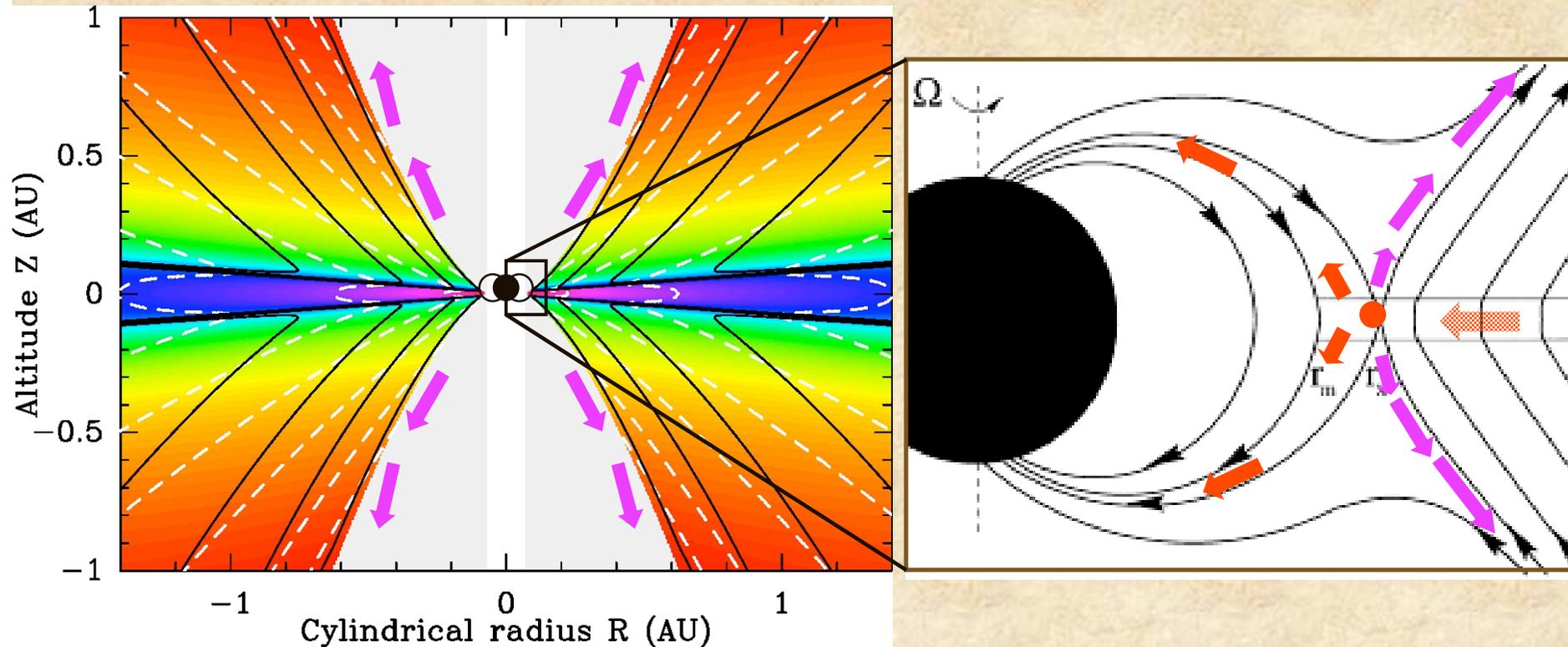


Bouvier et al. 97

- Les T Tauri tournent à ≈ 10 % break-up (Bertout 89)
- La dispersion en vitesse (ZAMS) requiert une interaction étoile disque (avec $\Omega = Cst$)

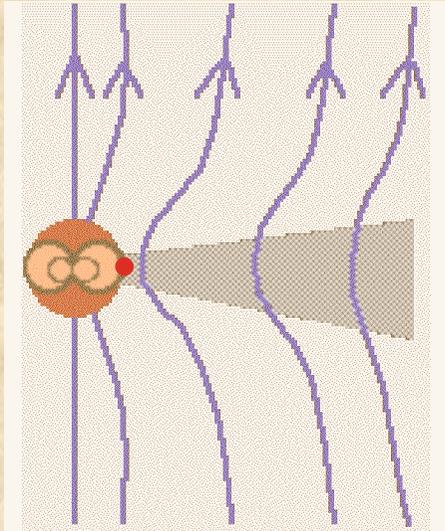
« Reconnection X-wind »

Ferreira, Pelletier, Appl 00

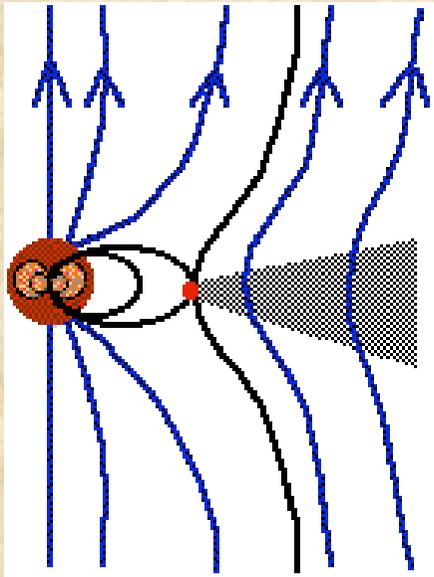


1. Vent de disque stationnaire
2. Ejection (intermittente ?) au-dessus de la zone de reconnexion, freinant efficacement la proto-étoile.

Conjecture: dynamo + champ fossile

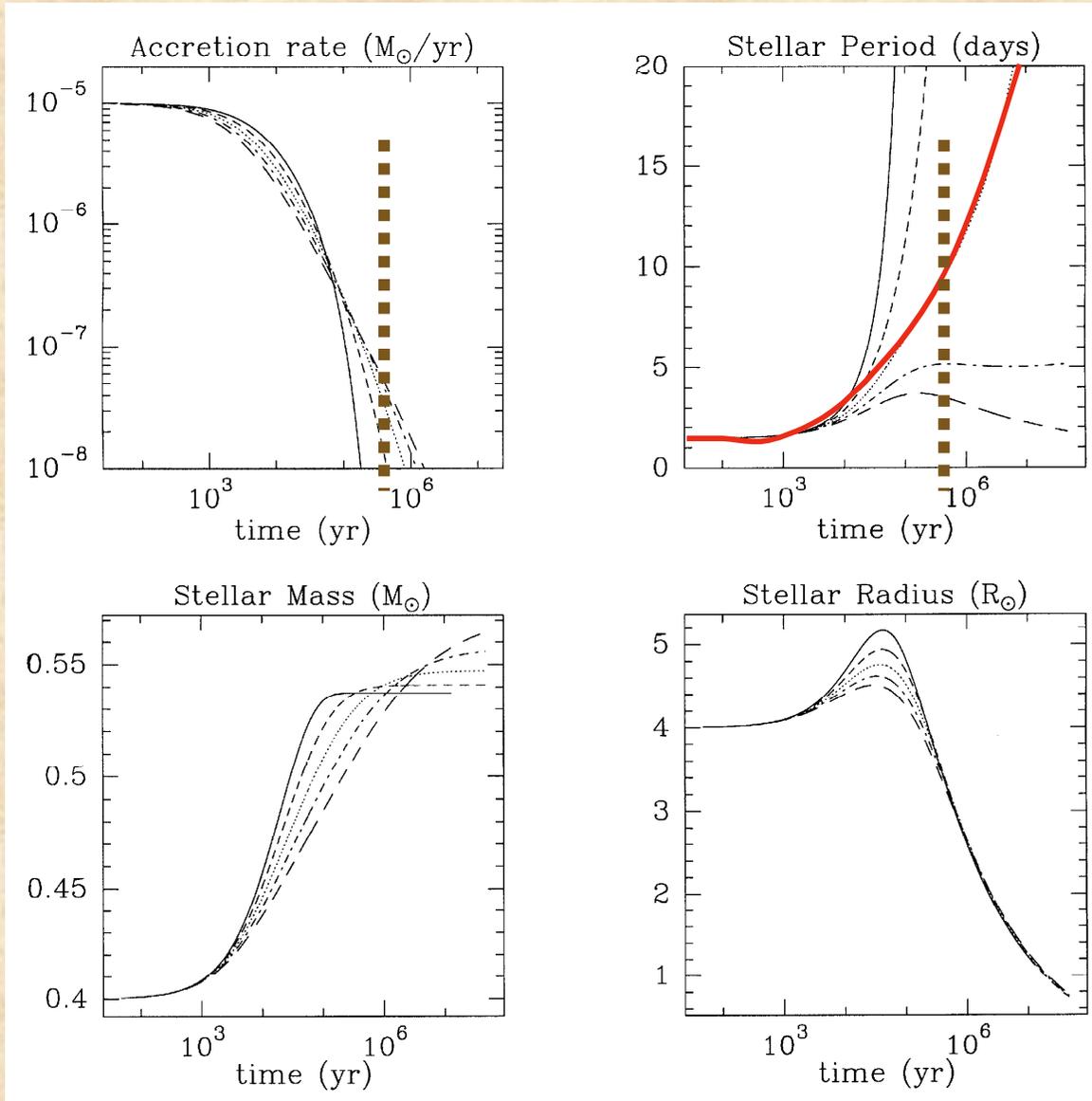


- Cœur protostellaire au break-up
- Champ fossile bipolaire
- $t=0$: moment où la dynamo produit un dipôle.
- Ligne neutre magnétique en R_*
- Rideaux d'accrétion + vent de disque



- Contraction de la proto-étoile, rotation ralentie par vent X de reconnexion
- $r_x \approx r_{co}$ augmente (magnétosphère)
- Le taux d'accrétion **sur** l'étoile est régulé
- Champ B ouvert stellaire croît.

Evolution temporelle de qq grandeurs



$$\frac{\dot{M}_X}{\dot{M}_{acc}} = 0.1$$

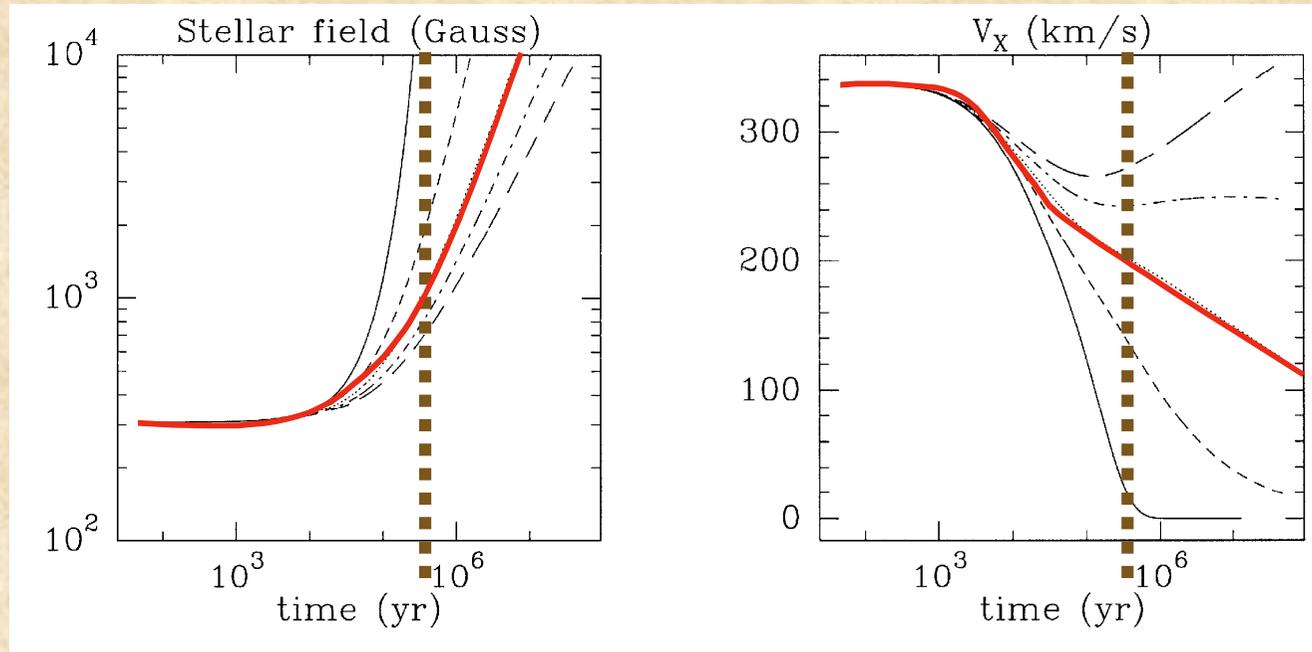
$$T_* = 3000 \text{ K}$$

Champ magnétosphère

$$B_* \propto r^{-n}$$

— $n = 4$

Un mécanisme de saturation pour B?



$$\frac{\dot{M}_X}{\dot{M}_{acc}} = 0.1$$

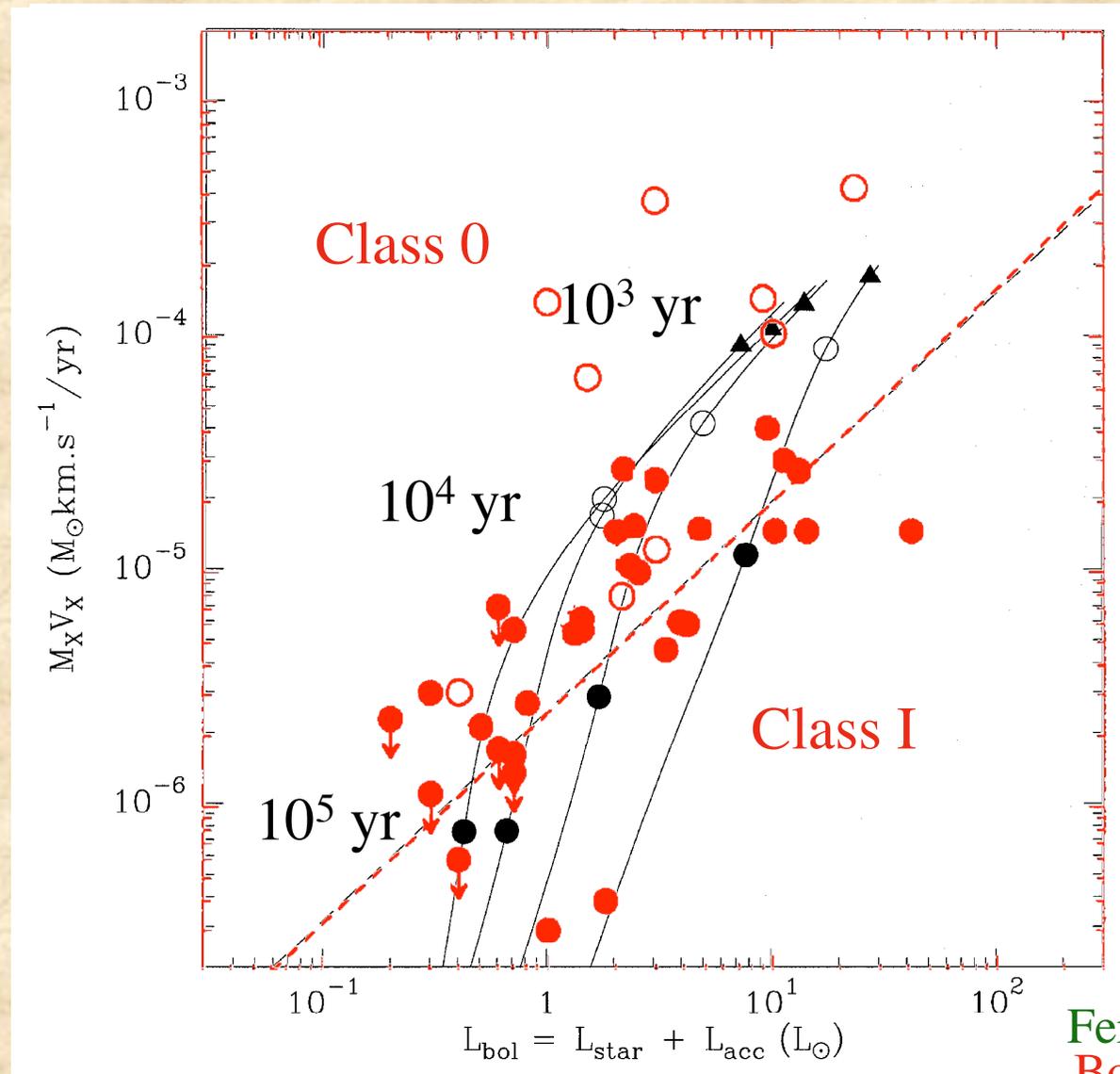
$$T_* = 3000 \text{ K}$$

$$B_* \propto r^{-n}$$

— $n = 4$

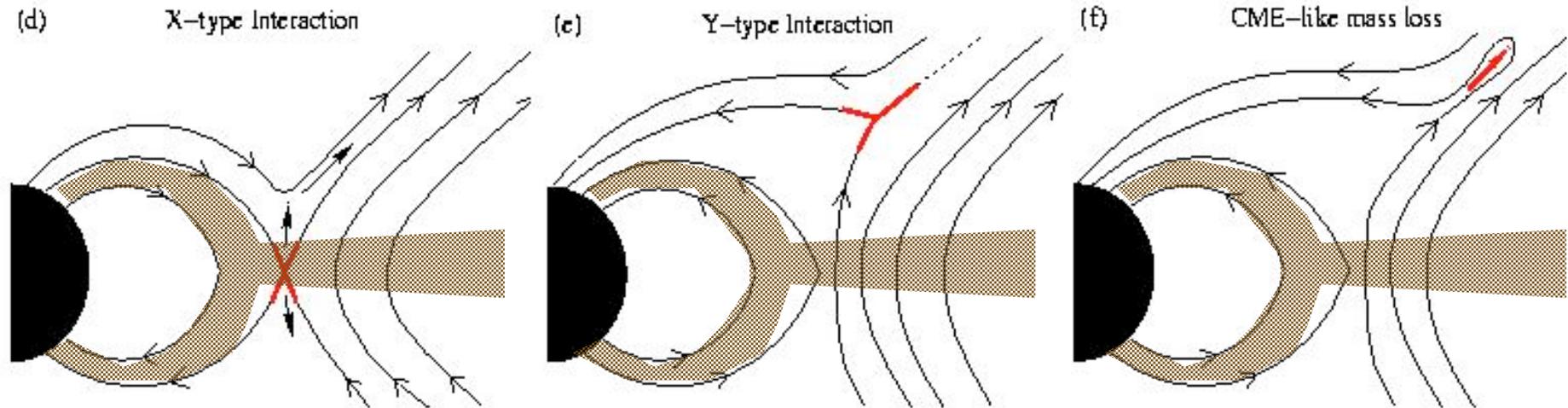
- La puissance du Vent X de Reconnexion diminue au cours du temps avec Ω_*
- Le flux magnétique Φ disponible dans le disque doit être limité
*Faible dispersion en Ω_** \longleftrightarrow *Faible dispersion en Φ ?*

Flux d'Impulsion Vs Luminosité Bolométrique



Ferreira *et al.* 00
Bontemps *et al.* 95

Perspectives...



1. Observations HRA + modèles sophistiqués: zone d'éjection
Flux magnétique disponible ? => **théorie effondrement**

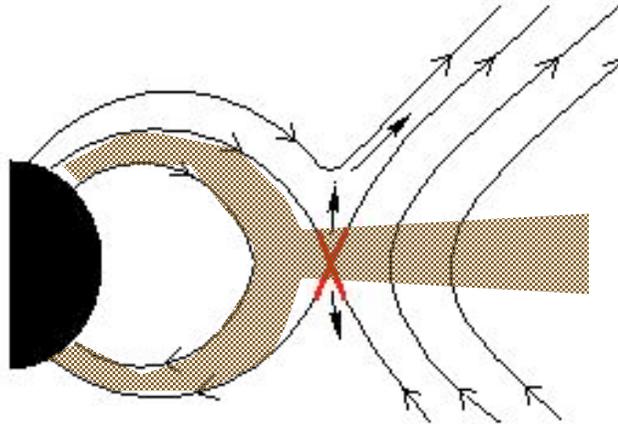
2. Interaction étoile-disque: => **dynamo stellaire**

- Présence/effet d'un champ fossile fort ?
- Effet d'un disque + transport moment cinétique ?

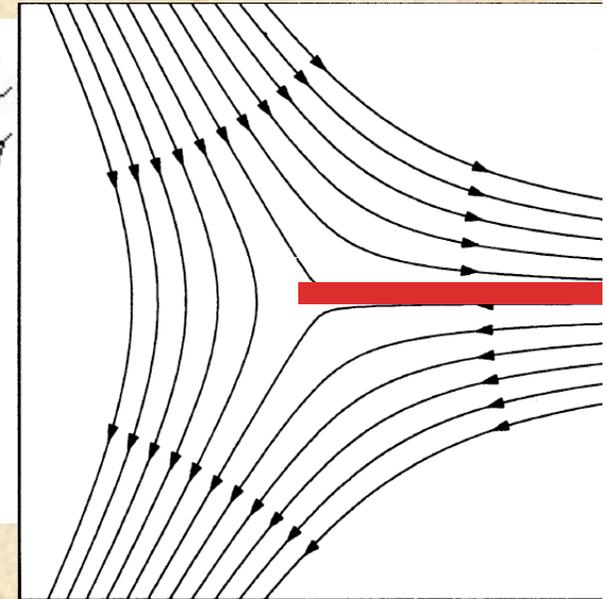
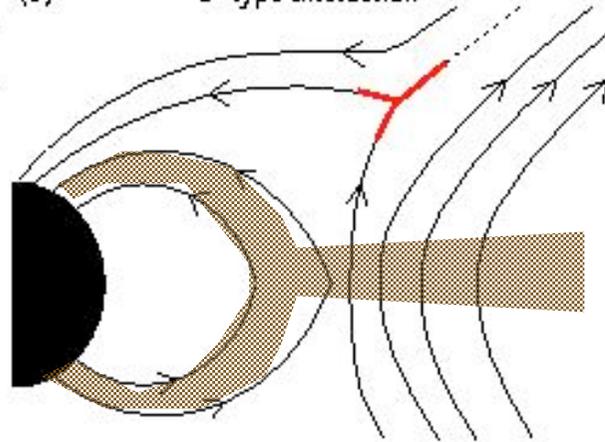
Besoin de simulations MHD numériques lourdes...

Les « vents-X »

(d) X-type Interaction



(e) Y-type Interaction



Ostriker & Shu 95

- Présence d'une zone de reconnexion équatoriale dans les 2 cas:
=> Les X produits doivent être cachés...
- Vent X de reconnexion: ligne neutre due à B opposés.
- Vent de Shu et al: ligne neutre imposée par matière ???