

Structure des disques d'accrétion autour des étoiles jeunes

séminaire à l'OCA

le 23 juin 2003

Régis Lachaume

Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble

Structure des disques d'accrétion autour des étoiles jeunes

séminaire à l'OCA

le 23 juin 2003

Régis Lachaume

Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble

Introduction

Un modèle de disque à deux couches

Transfert radiatif et structure verticale

Observables

Conclusion & Perspectives

Introduction

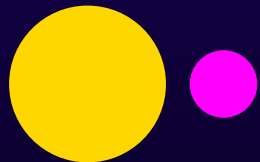
La question des origines

- ★ origine du système solaire et de la terre



98% du moment – 0.2% de la masse

- ★ formation des exoplanètes

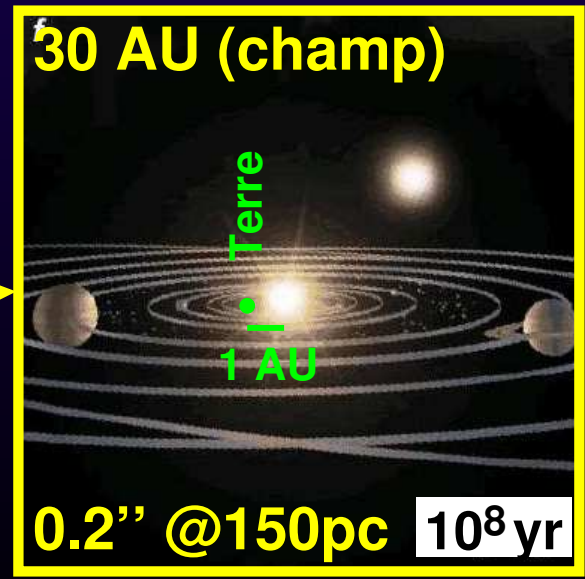
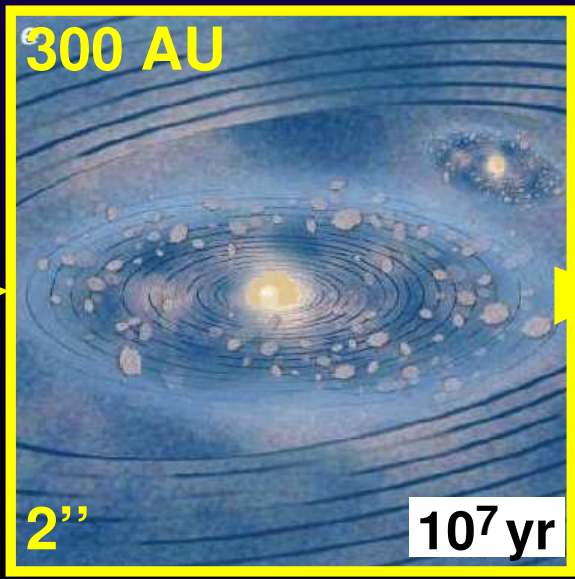
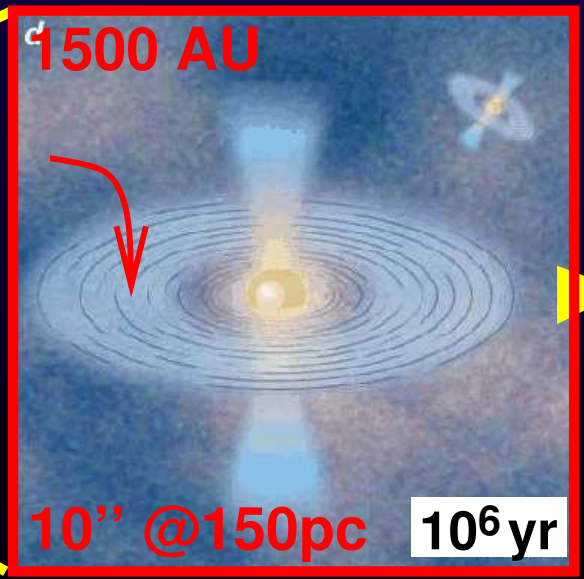
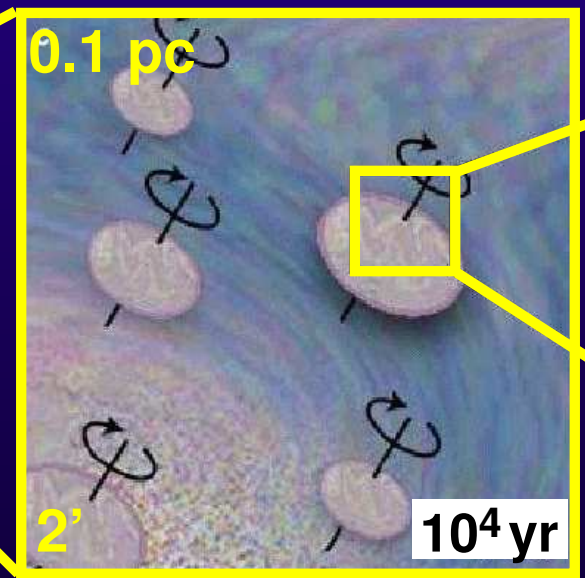
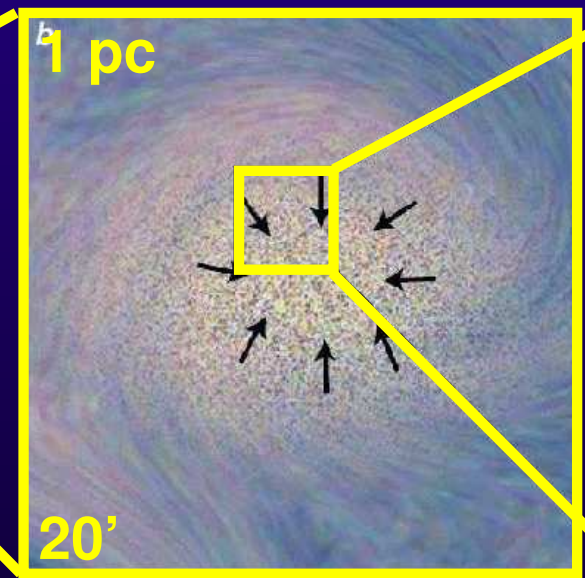
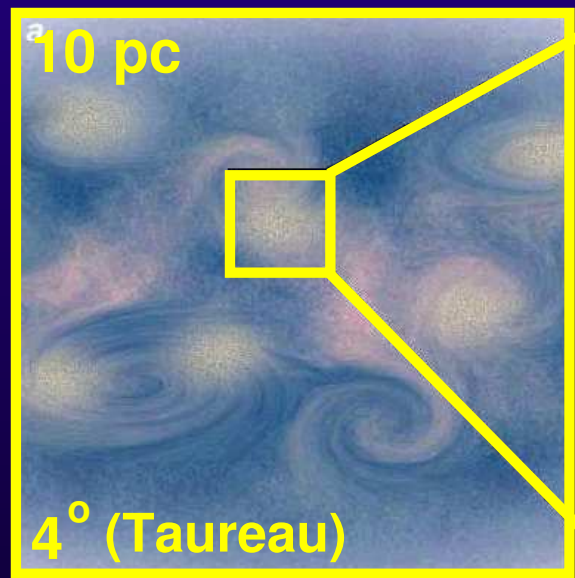


υ And

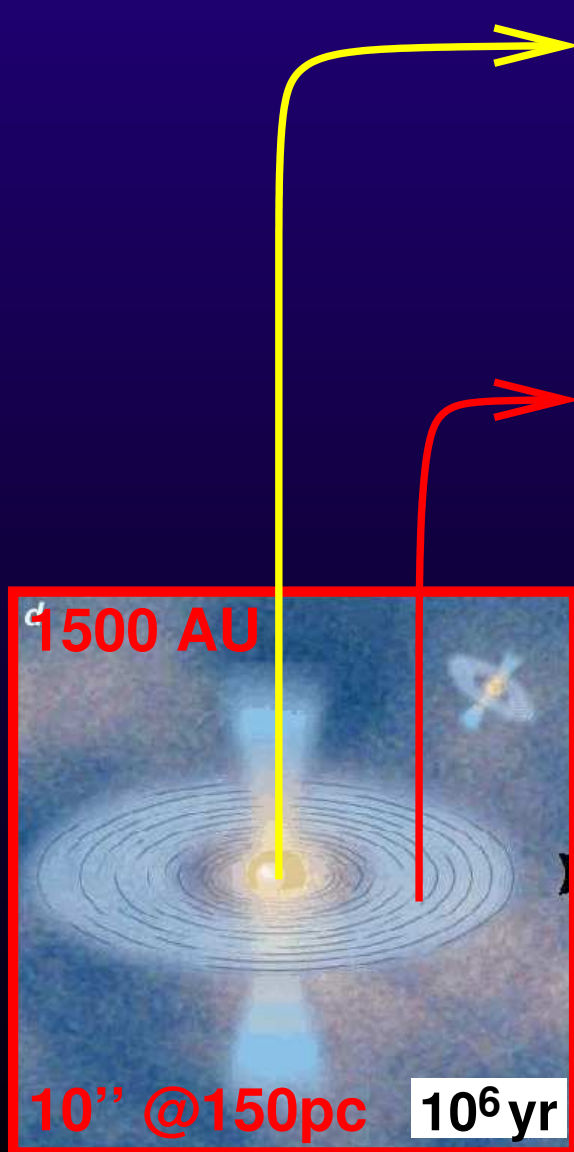


⇒ Étudier l'environnement des étoiles jeunes

Disques dans la formation stellaire



Disques dans la formation stellaire



Étoile jeune

masse	$0.5-2 M_{\odot}$
rayon	$1-2 R_{\odot}$
âge	10^6 ans

=> Disque de type T Tauri (TTS)

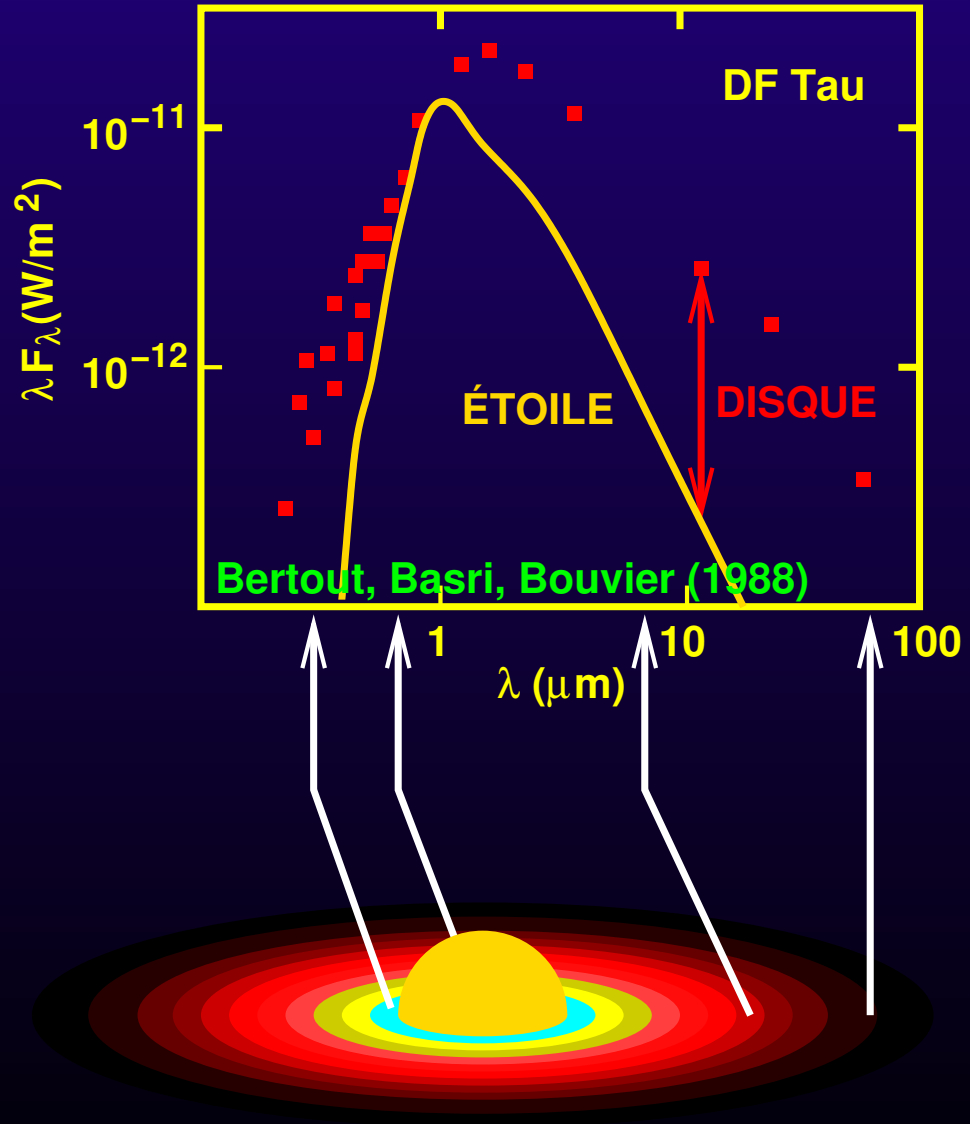
masse	$0.001-0.1 M_{\odot}$
taille	$100-1000$ AU
émission en K	$2-20 R_{\odot}$
accrétion	$10^{-7}-10^{-8} M_{\odot}/\text{an}$

=> Disque de type FU Orionis (FUORS)

masse	$0.01-? M_{\odot}$
taille	$100-1000$ AU
émission en K	$0.5-2$ AU
accrétion	$10^{-5}-10^{-4} M_{\odot}/\text{an}$

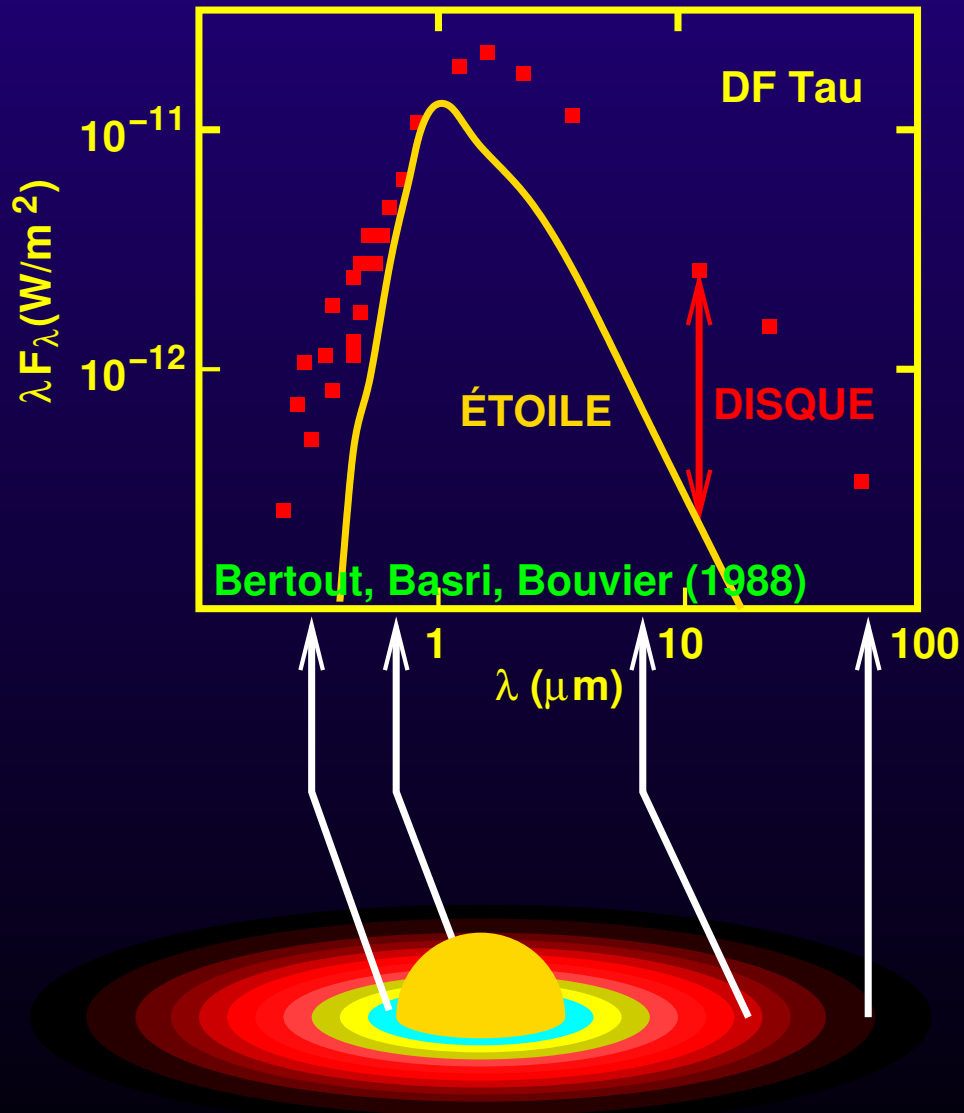
Mise en évidence de disques

Photométrie

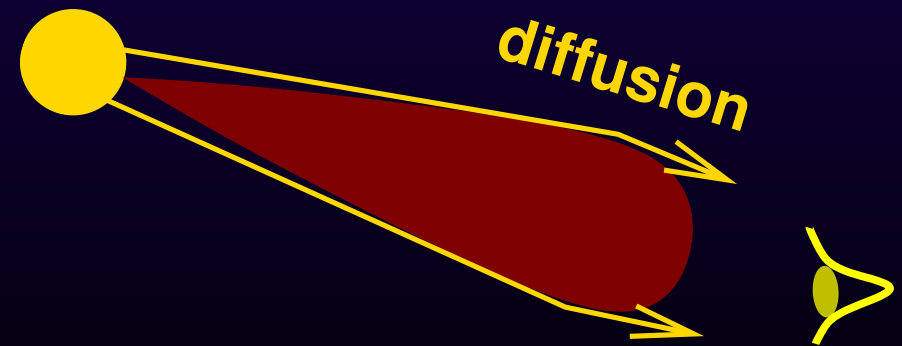


Mise en évidence de disques

Photométrie



Imagerie

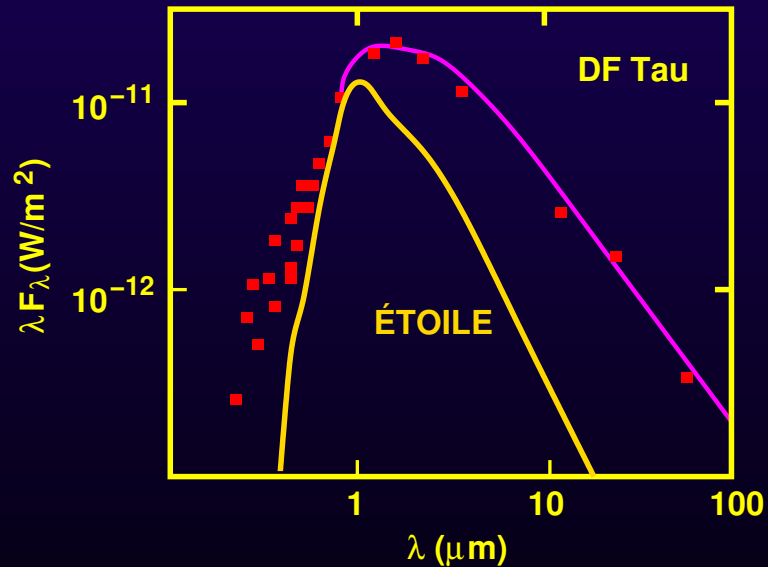


Mais aussi : polarimétrie, interférométrie radio, etc.

Les premiers modèles

Disque actif plat

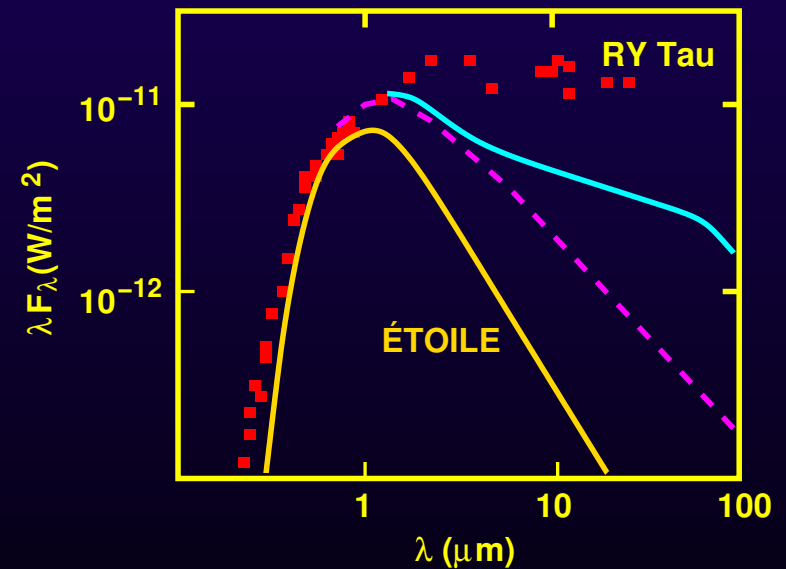
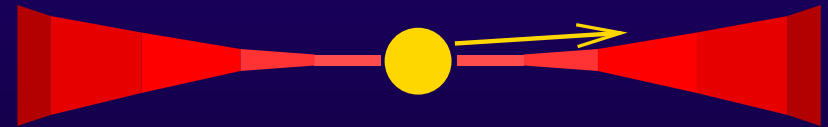
Viscosité : $T_{\text{eff}} \propto r^{-3/4}$
(Shakura & Sunyaev 1973)



Bertout, Basri, Bouvier (1988)

Disque passif évasé

Éclairement : $T_{\text{eff}} \propto r^{-1/2}$
(Adams, Lada, Shu 1987)



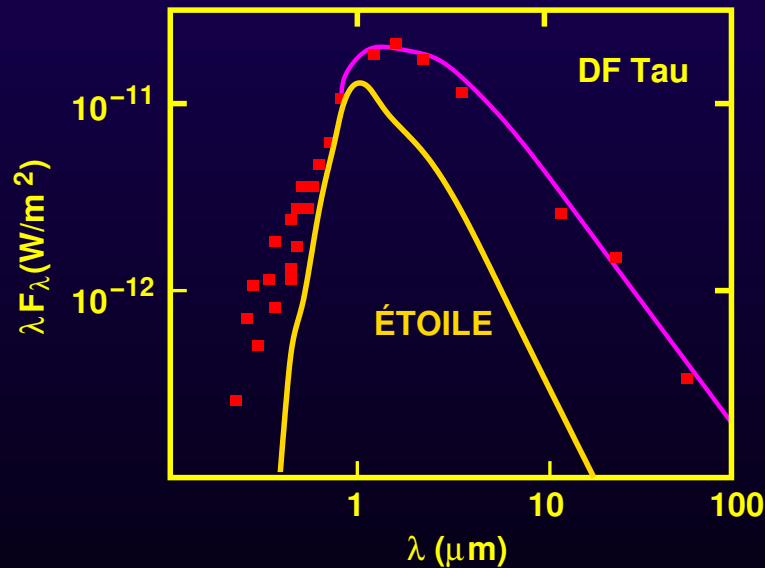
Bertout, Basri, Bouvier (1988)

Kenyon & Hartmann (1987)

Les premiers modèles

Disque actif plat

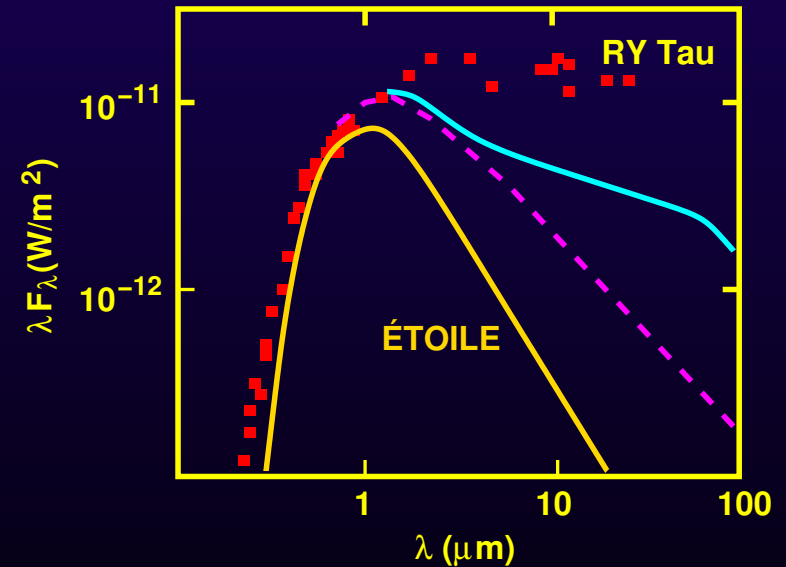
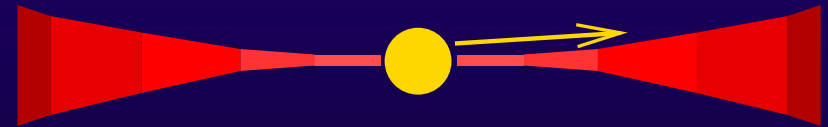
Viscosité : $T_{\text{eff}} \propto r^{-3/4}$
(Shakura & Sunyaev 1973)



Bertout, Basri, Bouvier (1988)

Disque passif évasé

Éclairement : $T_{\text{eff}} \propto r^{-1/2}$
(Adams, Lada, Shu 1987)

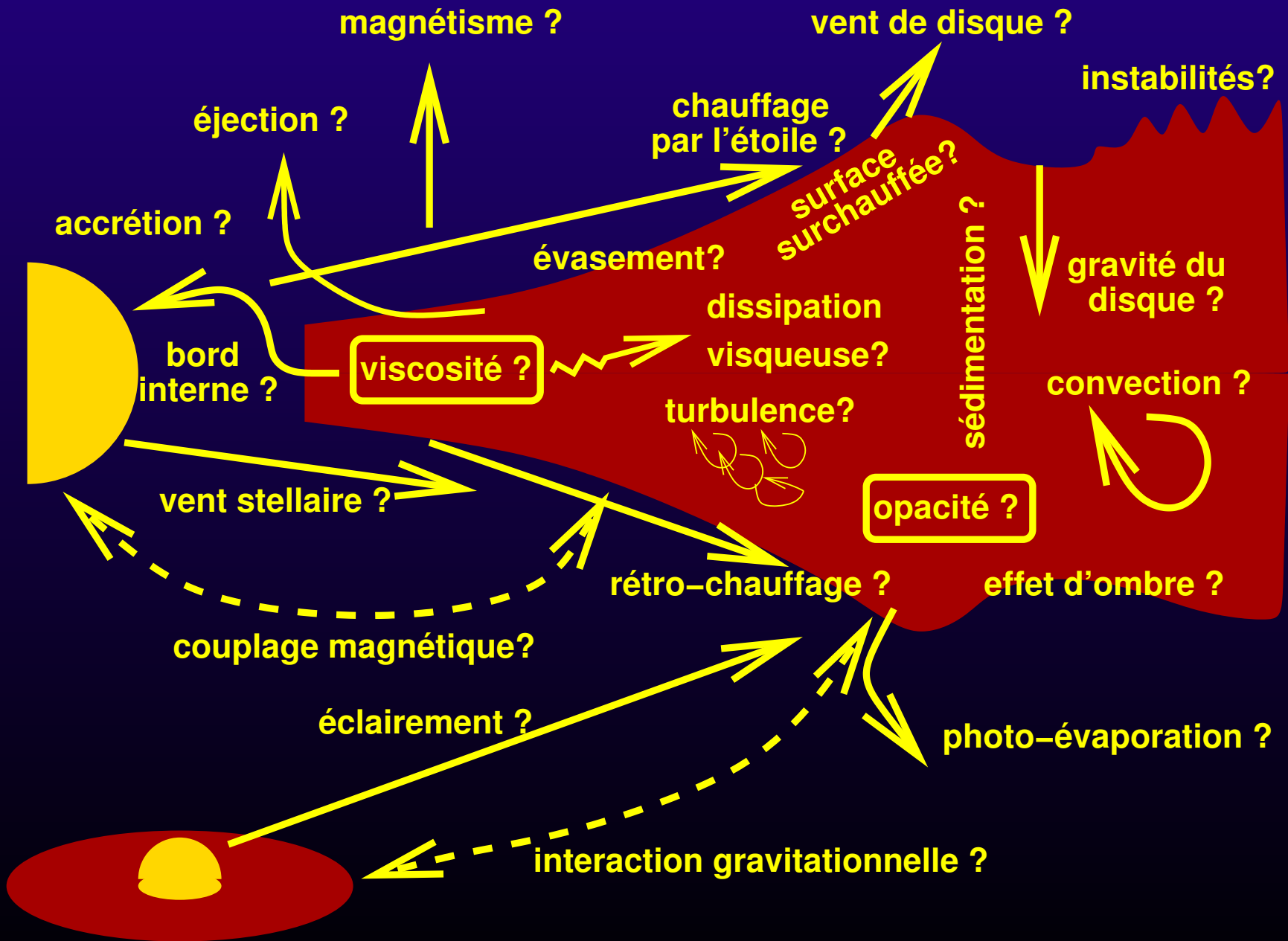


Bertout, Basri, Bouvier (1988)

Kenyon & Hartmann (1987)

⇒ Plus complexe : transfert, hydrostatique, ...

Ingrédients physiques à disposition

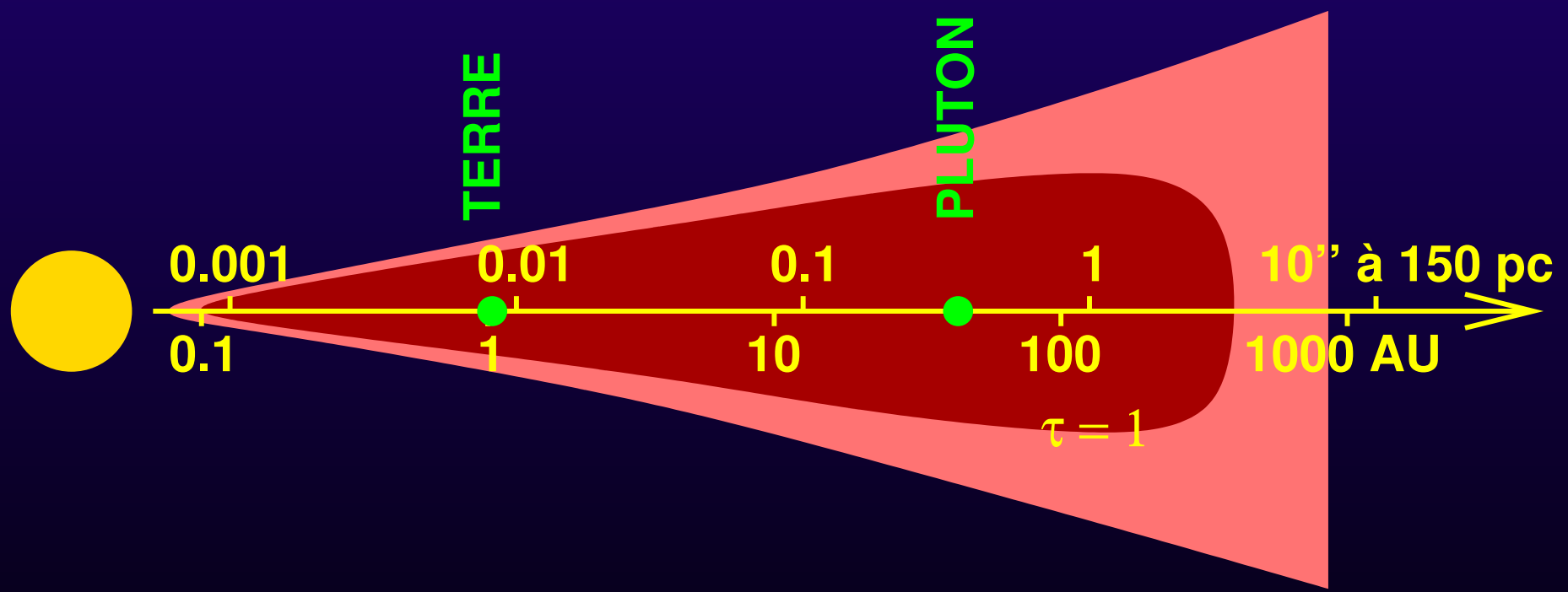


Quelque modèles de disque stationnaires

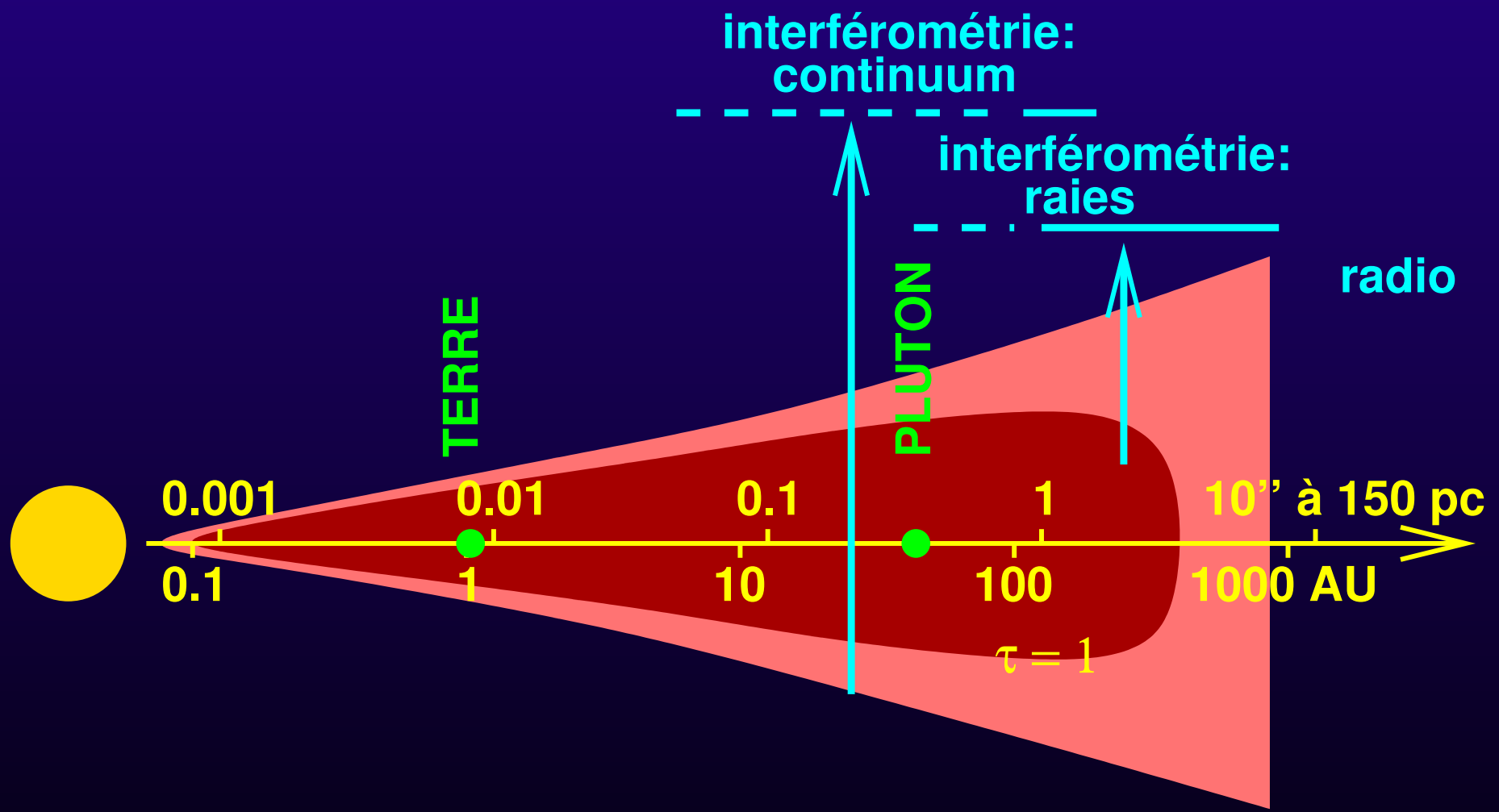
Couplage hydrostatique-rayonnement, sans \vec{B} .

Transfert		Ingrédients	Éclairement (étoile) (disque passif)	Chauffage visqueux (disque actif)	Gravité du disque
		Conditions moyennées	1 couche		Shakura, Sunyaev 73 LyndenBell, Pringle 74
	Adams, Lada, Shu 87				
Transfert 1D	2 couches		Chiang, Goldreich 97		
	gris		Bell et coll. 97		
		D'Alessio et coll. 97			
		Huré 00			
3D	multi- λ		Dullemond et coll. 02		
			Wolf et coll. 99 (à structure fixée)		

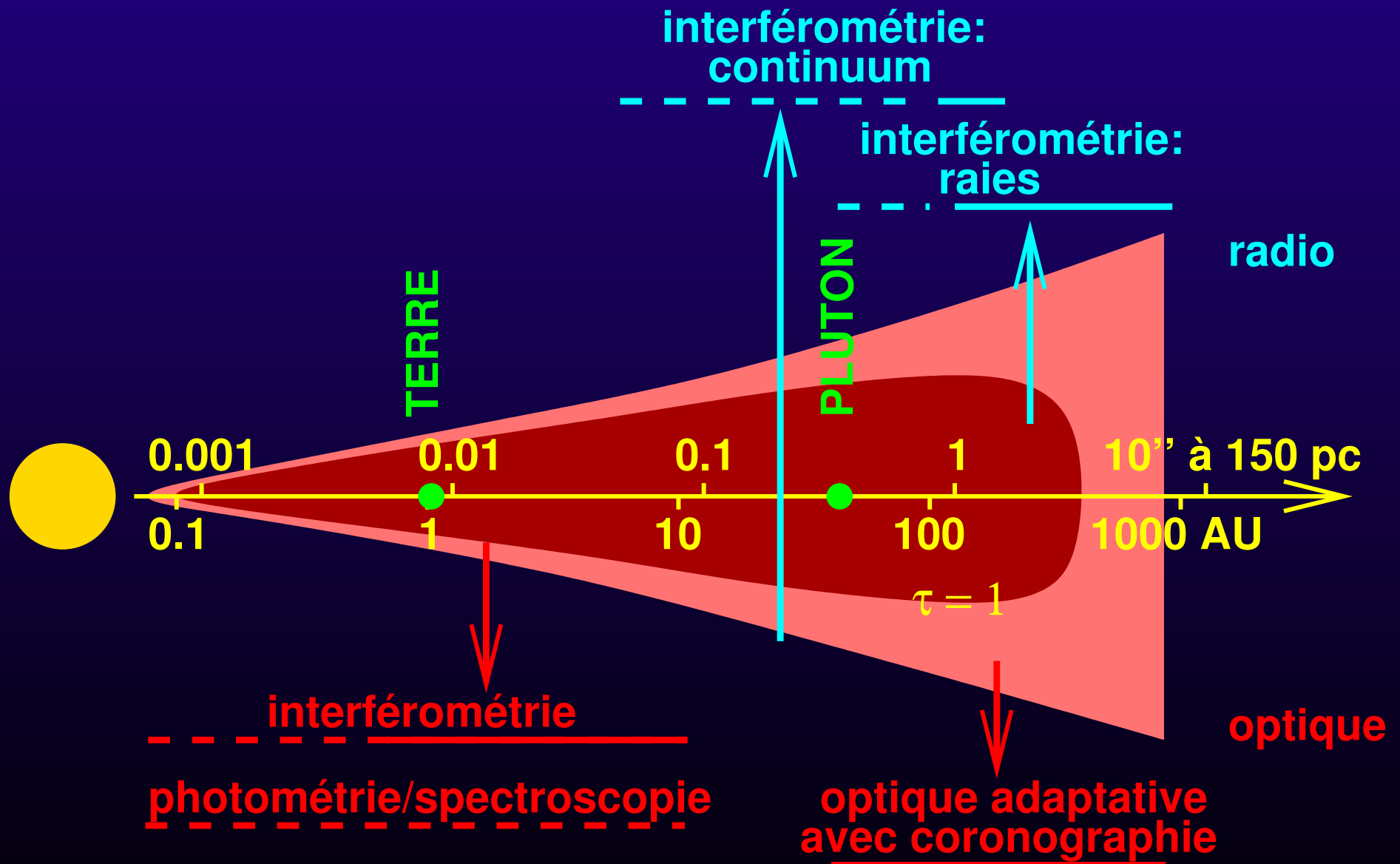
Contraintes observationnelles



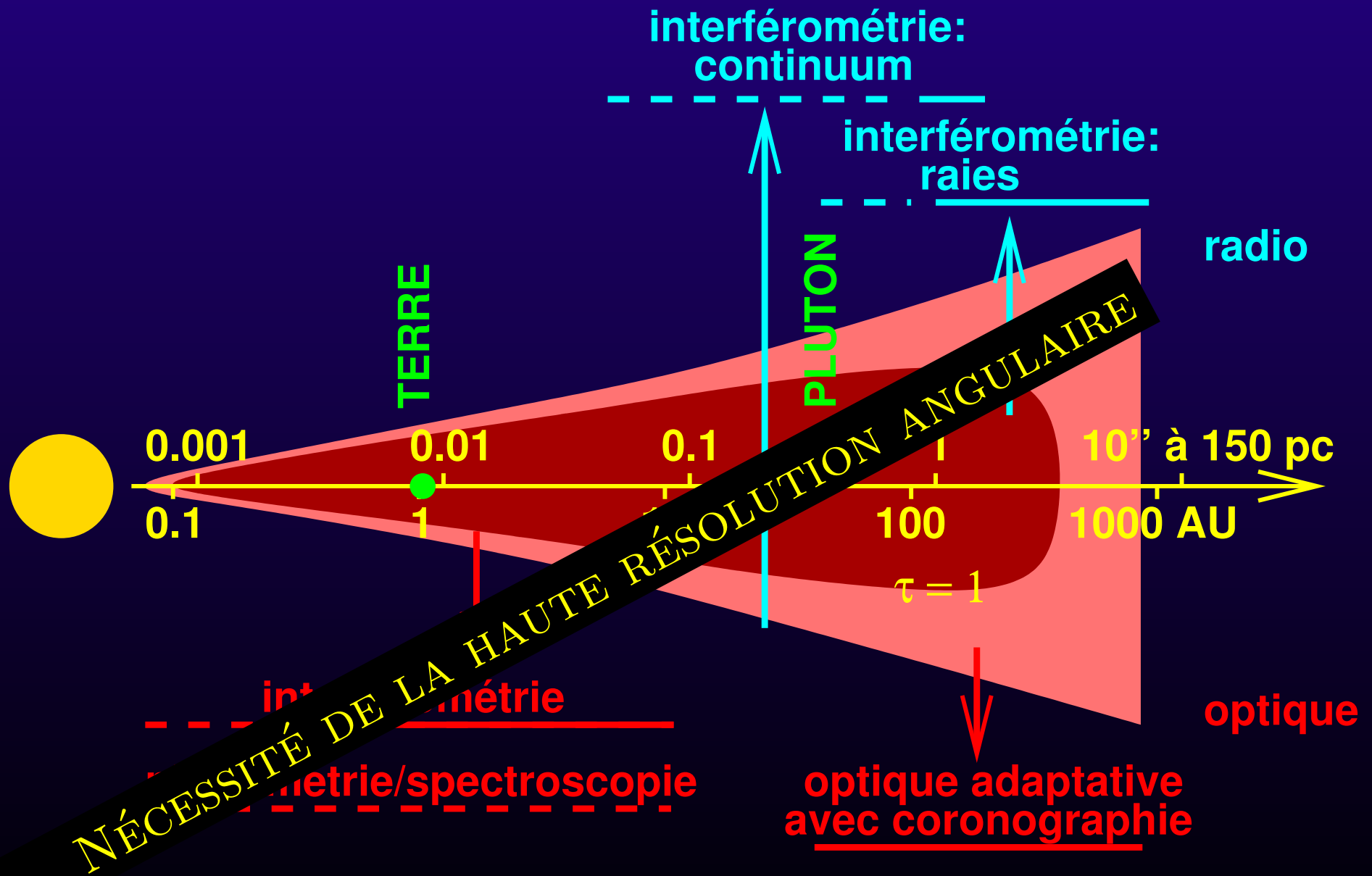
Contraintes observationnelles



Contraintes observationnelles

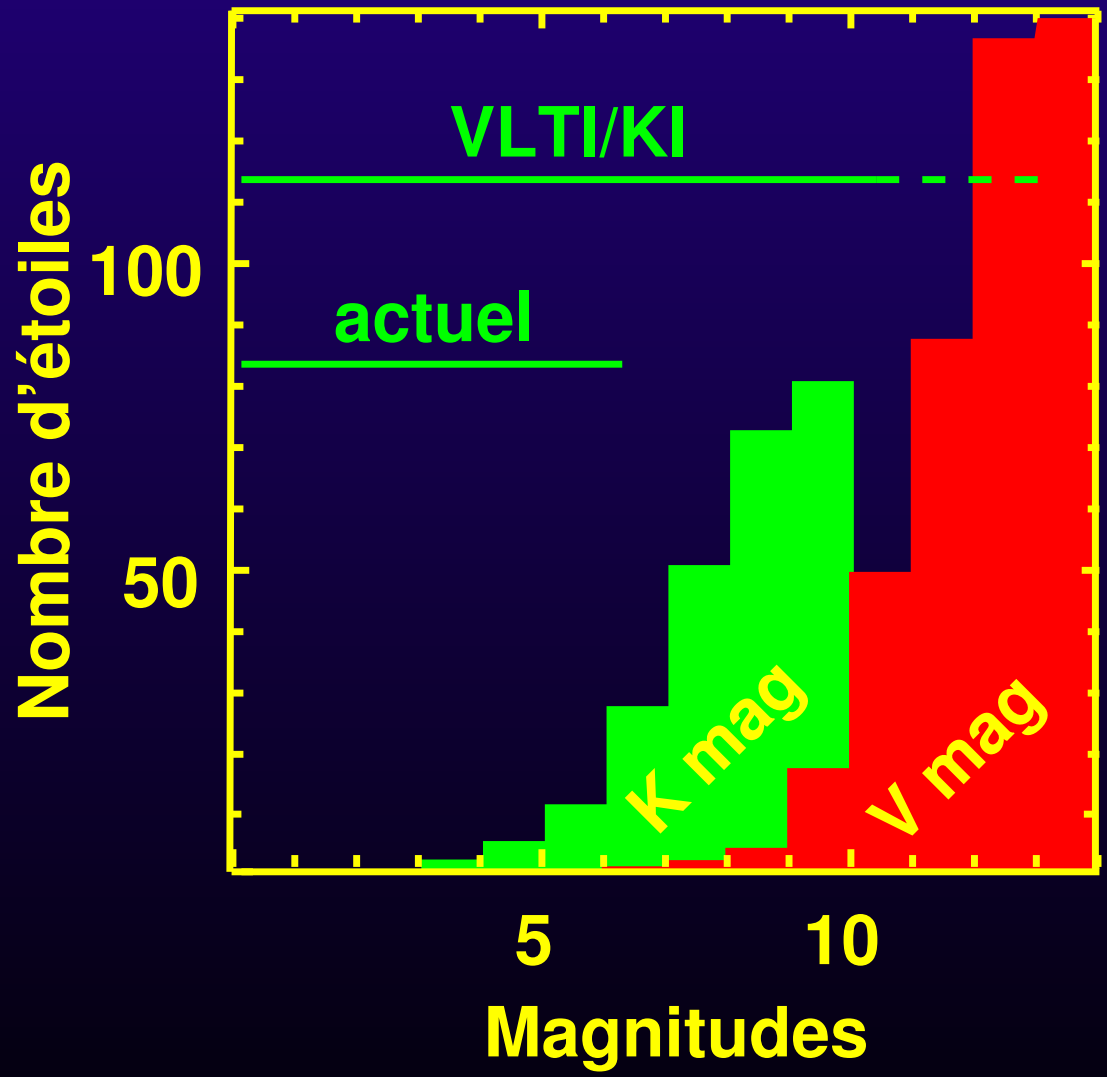


Contraintes observationnelles



Progrès de l'interférométrie optique

Sensibilité



Centaines d'étoiles jeunes.

Comprendre les conditions physiques

★ Processus de chauffage dominants ?

viscosité, chauffage stellaire, rétro-chauffage...

★ Structure verticale ?

transfert radiatif, gravité du disque...

Contraindre ces conditions

★ Distribution spectrale d'énergie

★ Visibilités optiques

De nouveaux instruments, bientôt

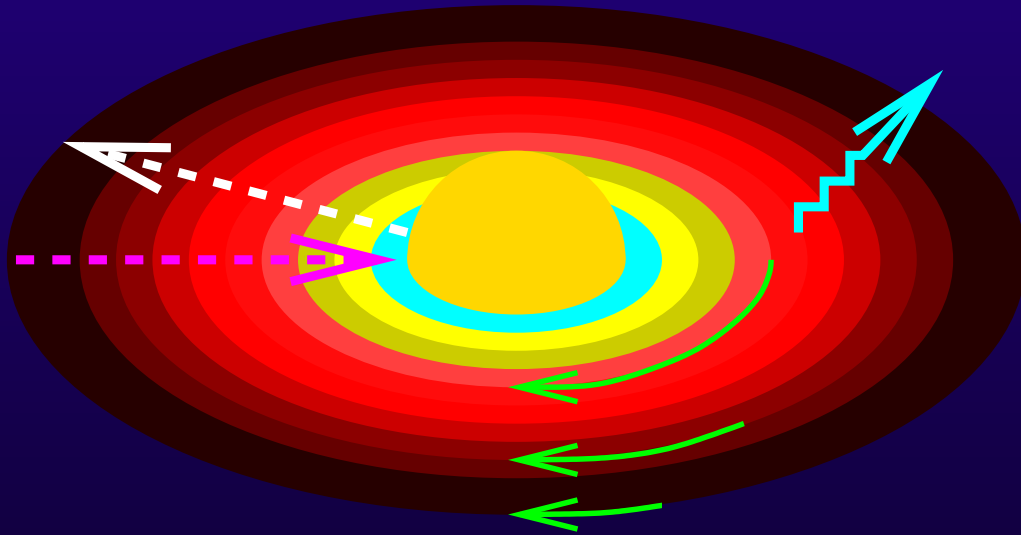
★ Interféromètres optiques (VLTI, KI)

★ Satellite IR SIRTF

★ Interféromètre radio ALMA

Un modèle de disque à deux couches

Prendre en compte l'accrétion




Rotation différentielle:

Friction entre les anneaux

 chauffage (IR)

 accrétion (UV)

 évacuation du moment
cinétique

Accrétion stationnaire: \dot{M}

Viscosité ν

mal connue

\implies paramétrée

Flux émis

$$F \propto \frac{\dot{M}}{r^3}$$

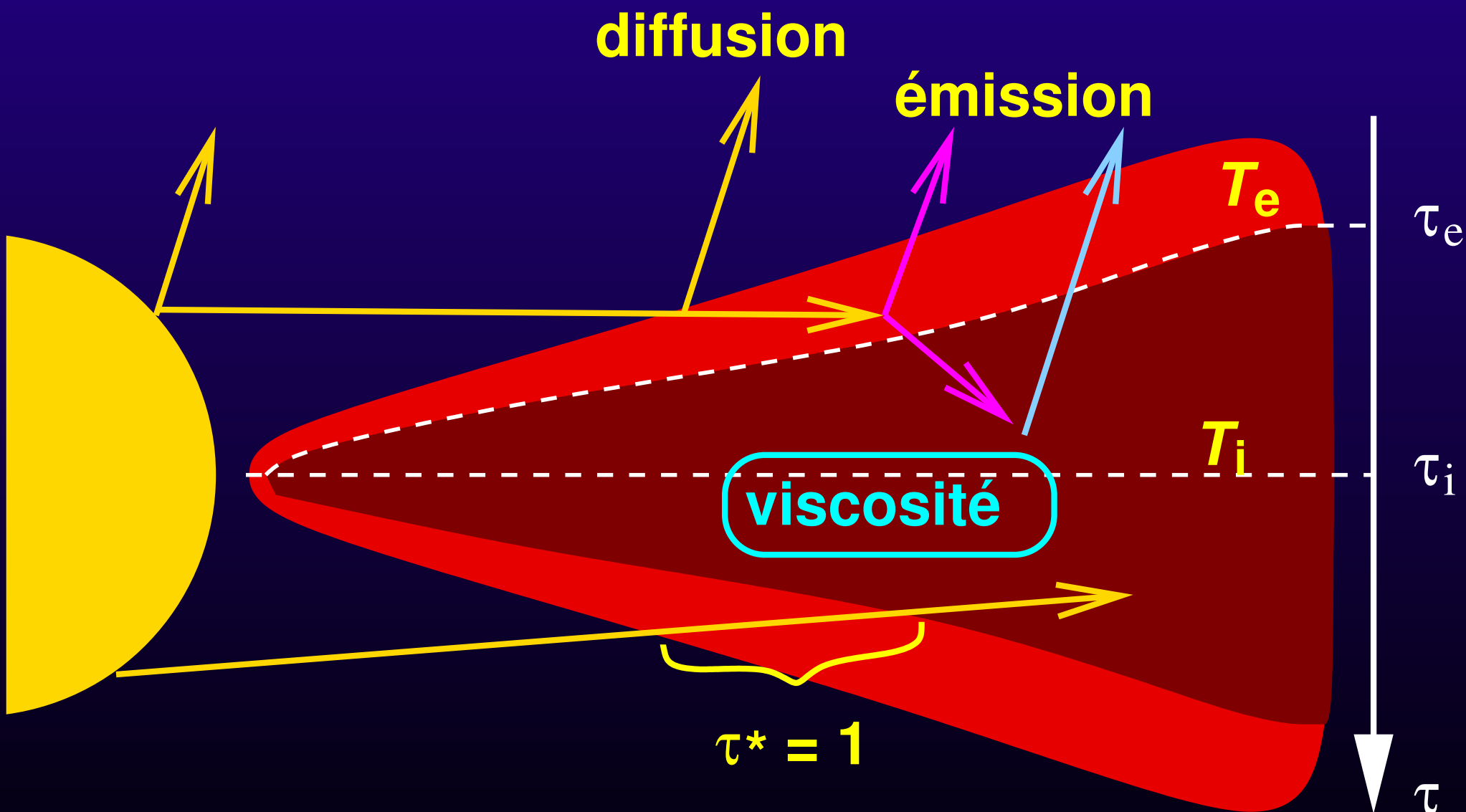
\implies indépendant de ν

Densité de surface

$$\Sigma \propto \frac{\dot{M}}{\nu}$$

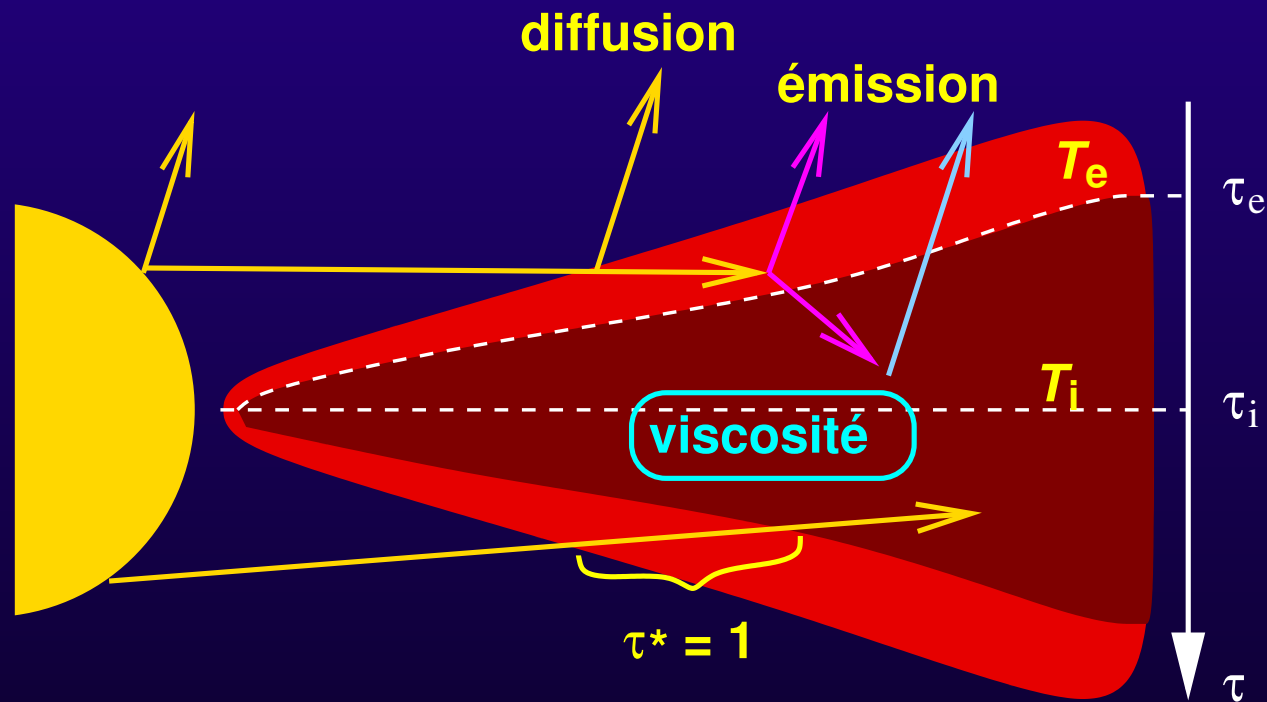
\implies dépend de ν

Ajouter l'éclairement par l'étoile



d'après Chiang & Goldreich (1997)

Ajouter l'éclairement par l'étoile



d'après Chiang & Goldreich (1997)

$$T_e^4 = \frac{1}{2\tau_e} T_r^4 + \frac{1}{2} T_v^4 + T_a^4$$

$$T_i^4 = \underbrace{\frac{1}{2} T_r^4}_{\text{irradiation}} + \underbrace{\tau_i T_v^4}_{\text{viscosité}} + \underbrace{T_a^4}_{\text{milieu}}$$

Une formulation analytique

Viscosité paramétrée $\nu = \alpha c h_P$.

$$T_i^4 = t_1^4 + t_2^4 + t_3^4 + t_4^4$$

1 : éclairément, disque plat

Une formulation analytique

Viscosité paramétrée $\nu = \alpha c h_P$.

$$T_i^4 = t_1^4 + t_2^4 + t_3^4 + t_4^4$$

$$t_1^4 \sim r^{-3}$$

$$\gamma_1 = 1/8$$

2 : éclaircissement, disque évasé

Évasement $H/r \propto r^\gamma$

Une formulation analytique

Viscosité paramétrée $\nu = \alpha c h_P$.

$$T_i^4 = t_1^4 + t_2^4 + t_3^4 + t_4^4$$

$$t_1^4 \sim r^{-3}$$

$$\gamma_1 = 1/8$$

$$t_2^4 \sim \gamma r^{-3/2} T_i^{1/2}$$

$$\gamma_2 = 2/7$$

3 : dissipation visqueuse

Évasement $H/r \propto r^\gamma$ (localement)

Une formulation analytique

Viscosité paramétrée $\nu = \alpha c h_P$.

$$T_i^4 = t_1^4 + t_2^4 + t_3^4 + t_4^4$$

$$t_1^4 \sim r^{-3}$$

$$\gamma_1 = 1/8$$

$$t_2^4 \sim \gamma r^{-3/2} T_i^{1/2}$$

$$\gamma_2 = 2/7$$

$$t_3^4 \sim r^{-3l-9/2} T_i^{-3/2l+m-1}$$

$$\gamma_3 = f(l, m)$$

4 : thermalisation avec le milieu

Évasement $H/r \propto r^\gamma$ (localement)

Opacité $\kappa(\rho, T) \propto \rho^l T^m$ (localement)

Une formulation analytique

Viscosité paramétrée $\nu = \alpha c h_P$.

$$T_i^4 = t_1^4 + t_2^4 + t_3^4 + t_4^4$$

$$t_1^4 \sim r^{-3} \quad \gamma_1 = 1/8$$

$$t_2^4 \sim \gamma r^{-3/2} T_i^{1/2} \quad \gamma_2 = 2/7$$

$$t_3^4 \sim r^{-3l-9/2} T_i^{-3/2l+m-1} \quad \gamma_3 = f(l, m)$$

$$t_4^4 \sim 1 \quad \gamma_4 = 1/2$$

Évasement $H/r \propto r^\gamma$ (localement)

Opacité $\kappa(\rho, T) \propto \rho^l T^m$ (localement)

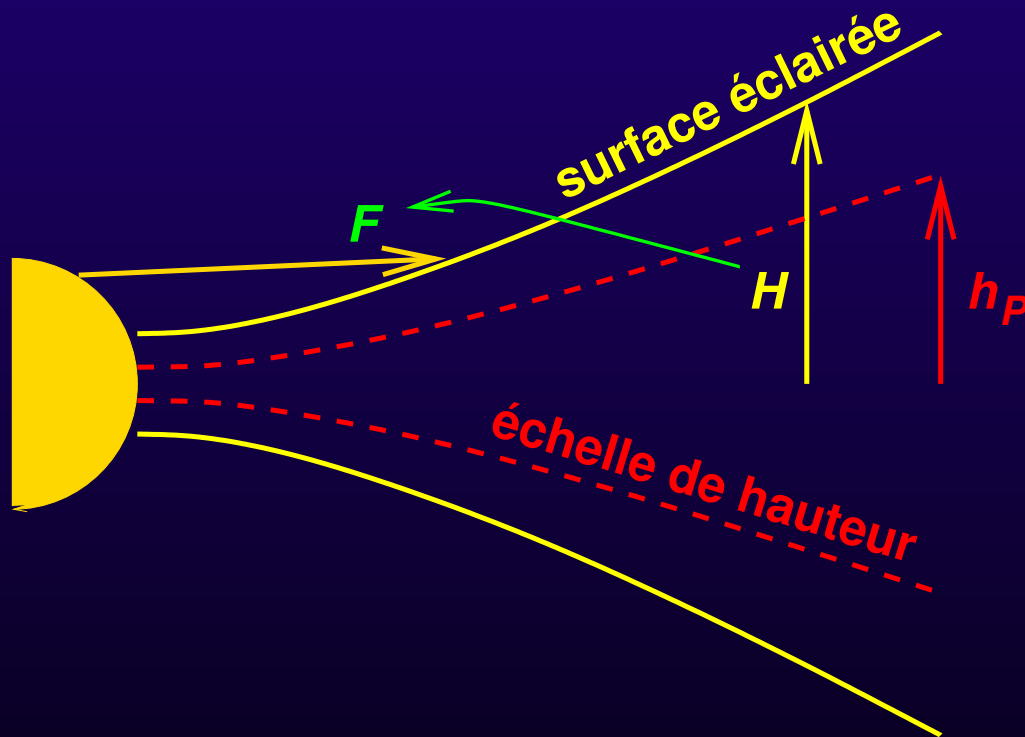
Structure verticale ?Disque plutôt passif

$$H \propto h_P$$

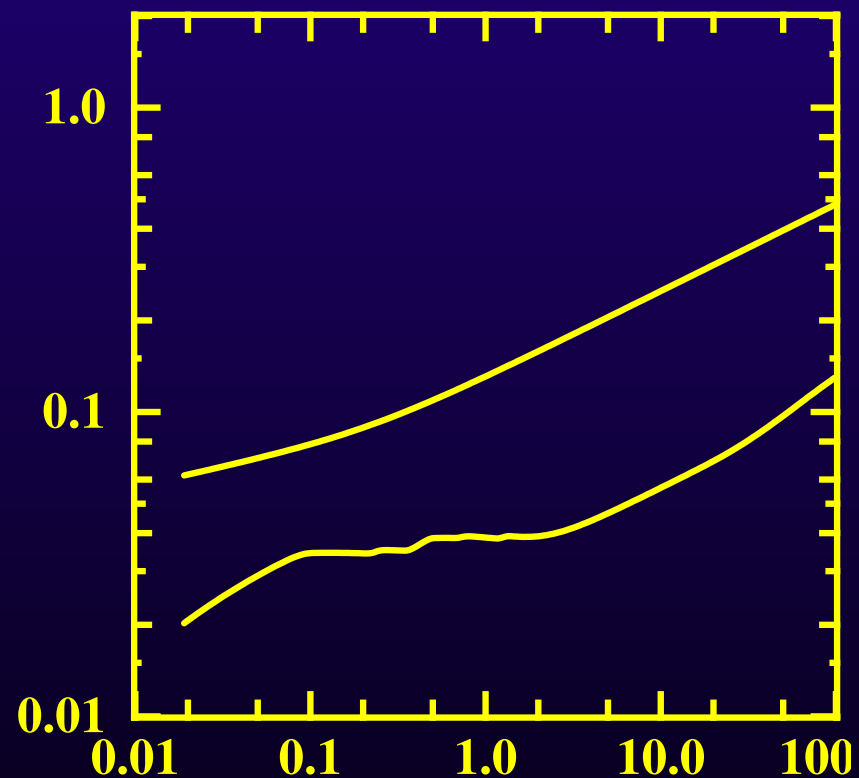
$$H \propto r^{9/8-9/7}$$

Disque plutôt actif

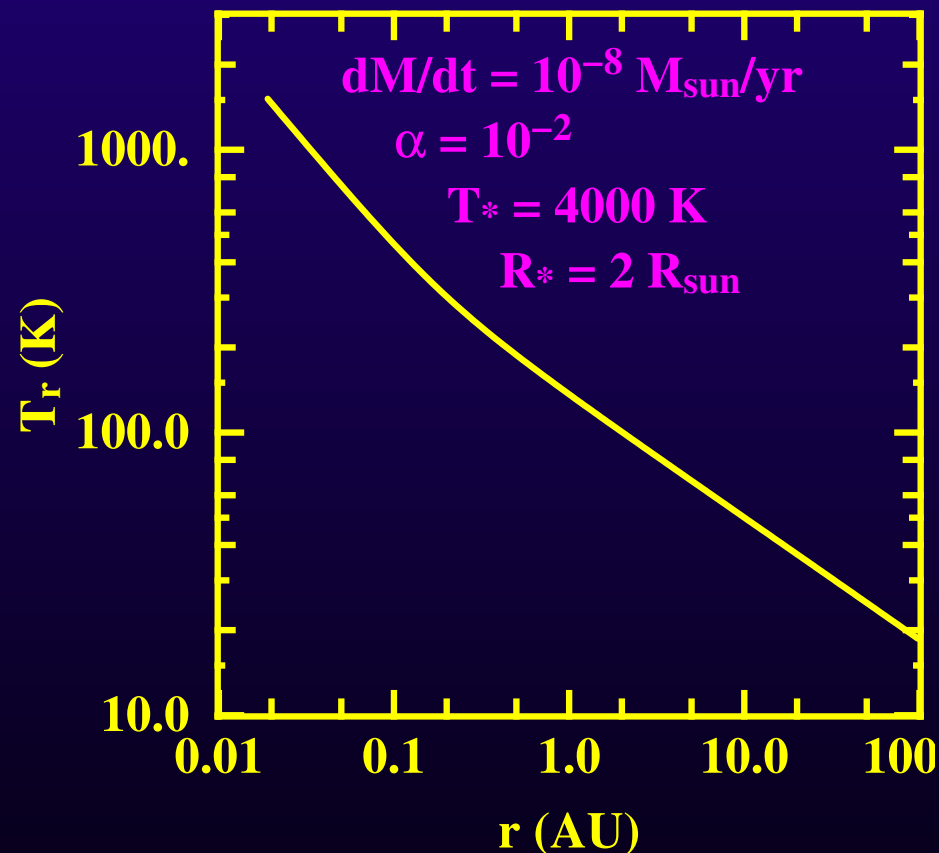
$$H = ???$$



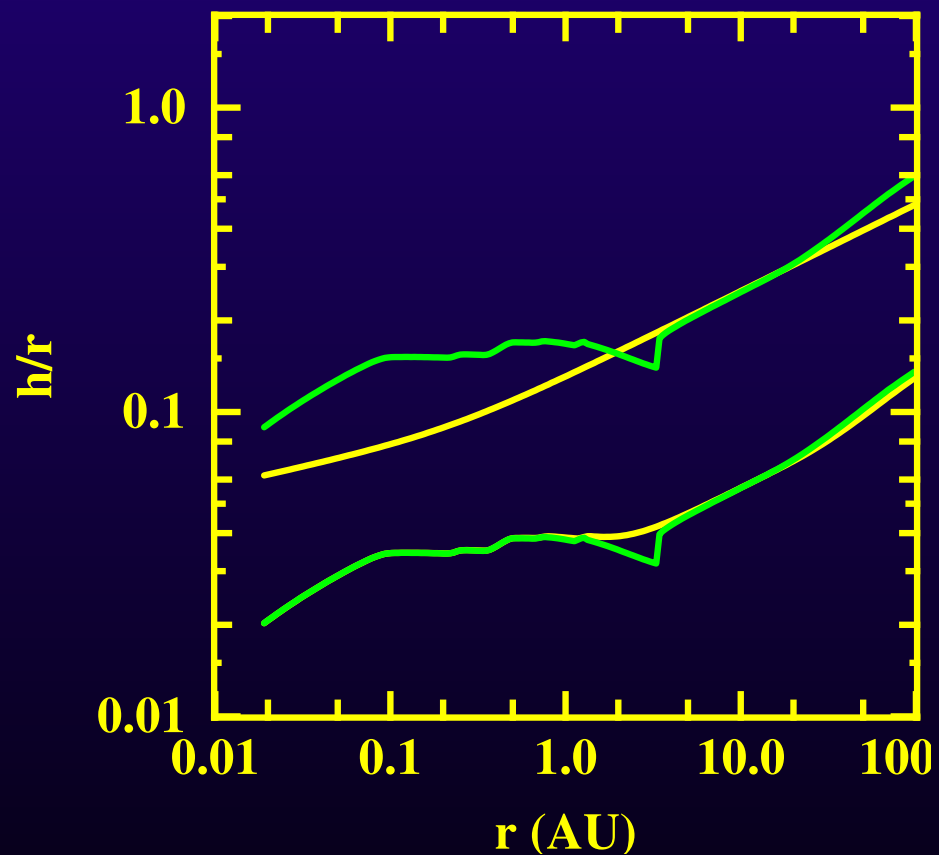
Structure verticale : essais

Échelle de hauteur

ce travail avec $H \propto r^{9/8-9/7}$

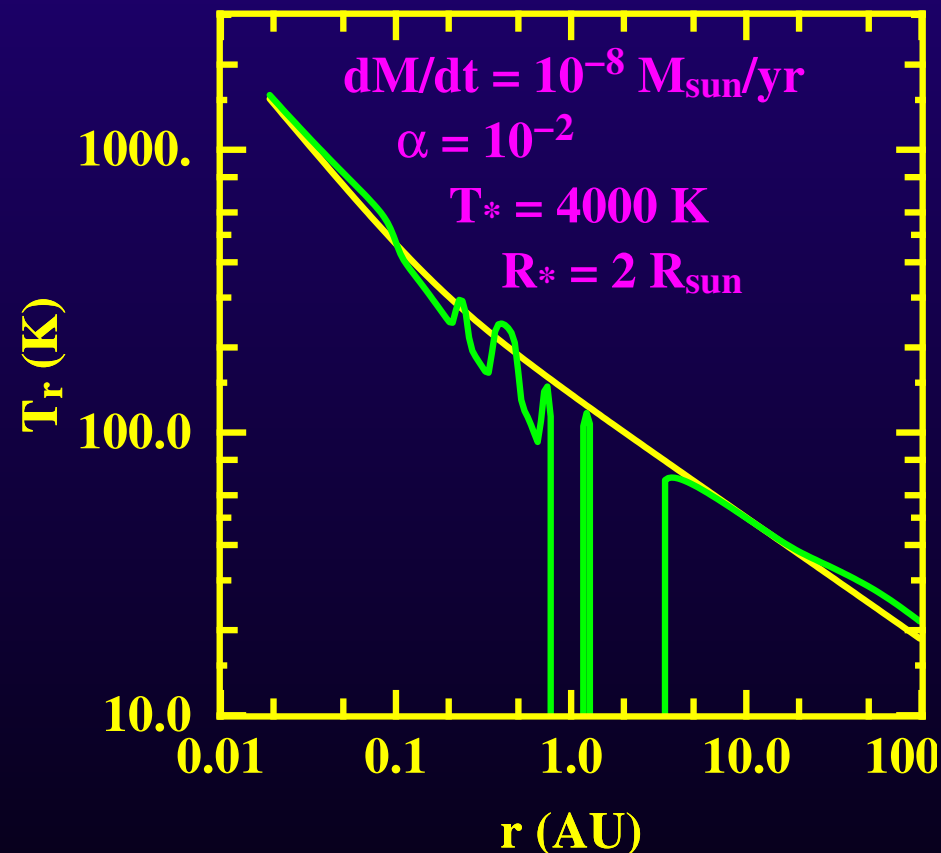
Température d'irradiation

Structure verticale : essais

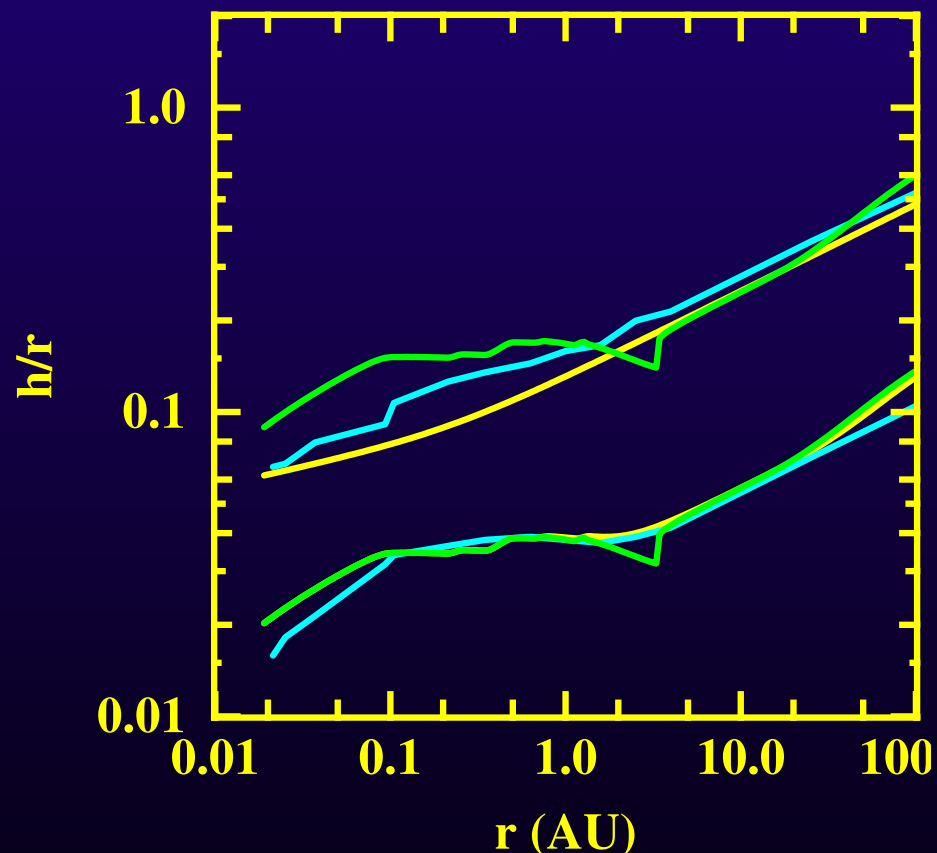
Échelle de hauteur

ce travail avec $H \propto r^{9/8-9/7}$

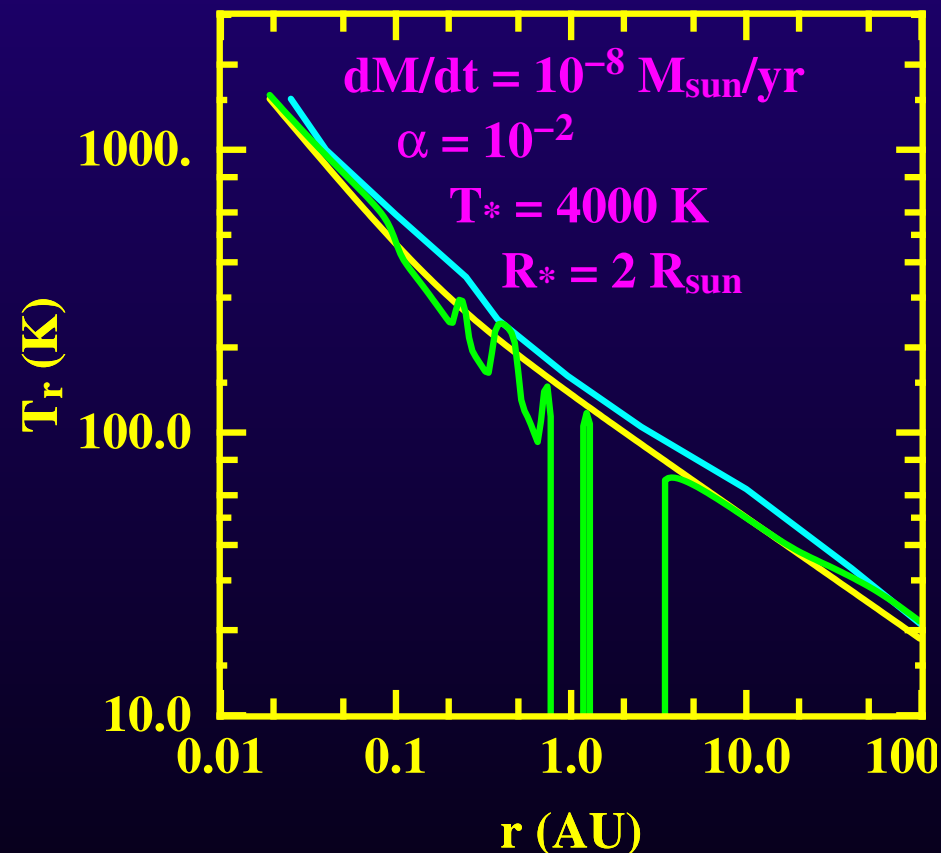
ce travail avec $H \propto h$

Température d'irradiation

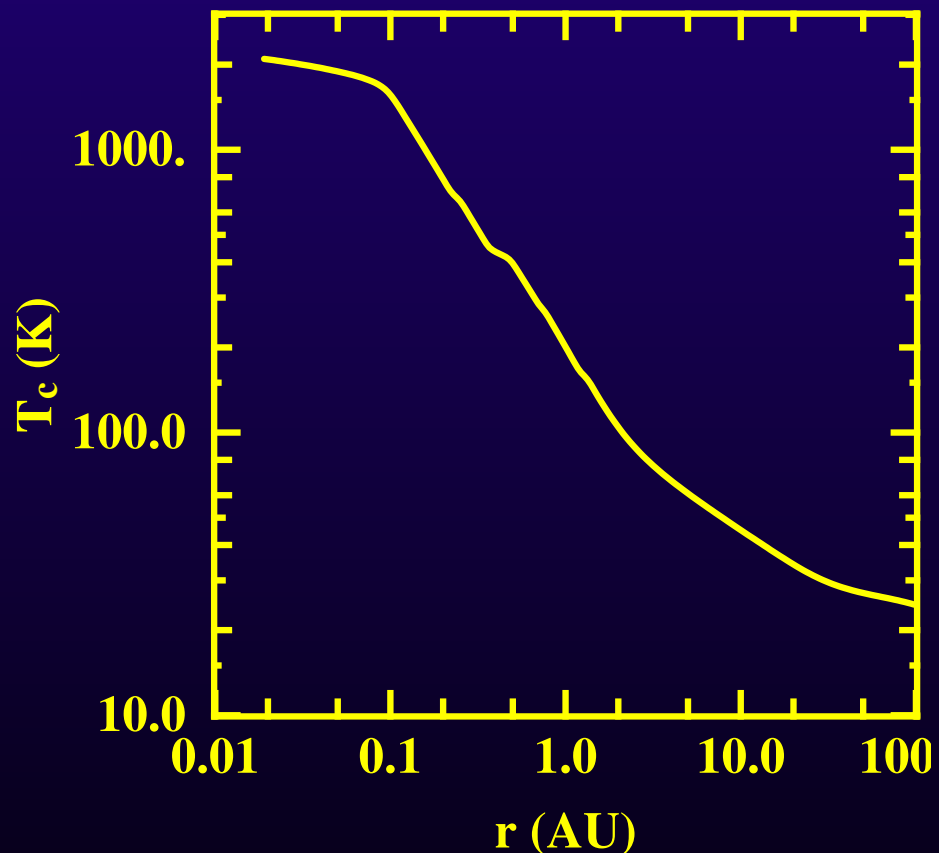
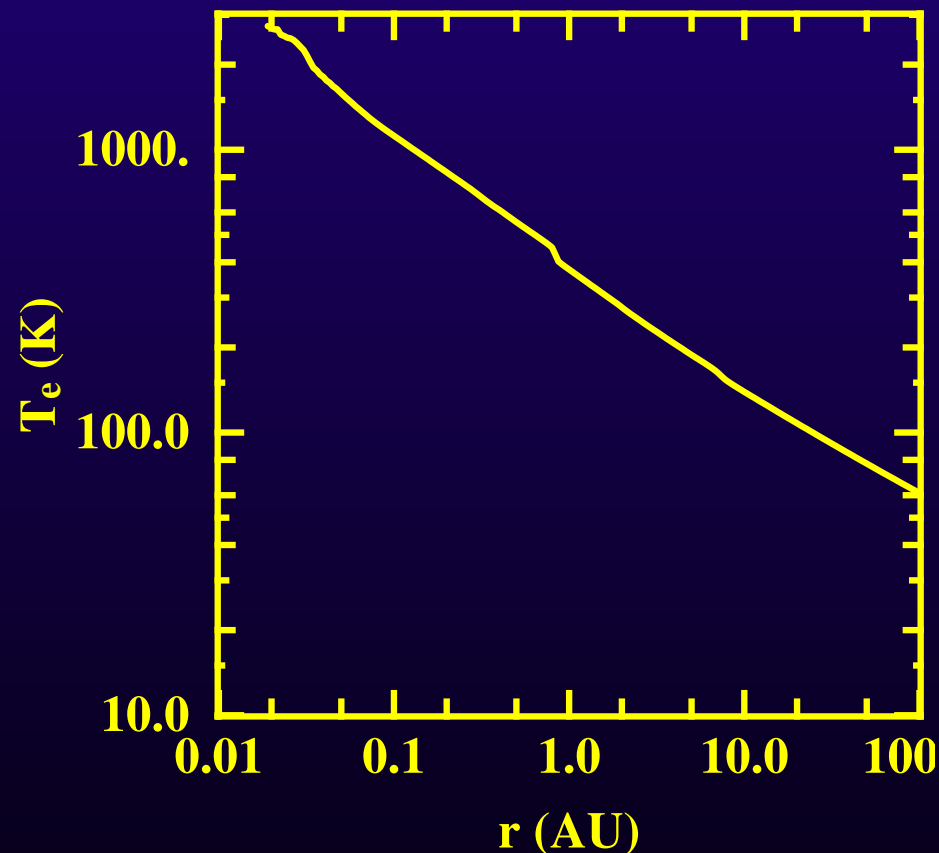
Structure verticale : essais

Échelle de hauteur

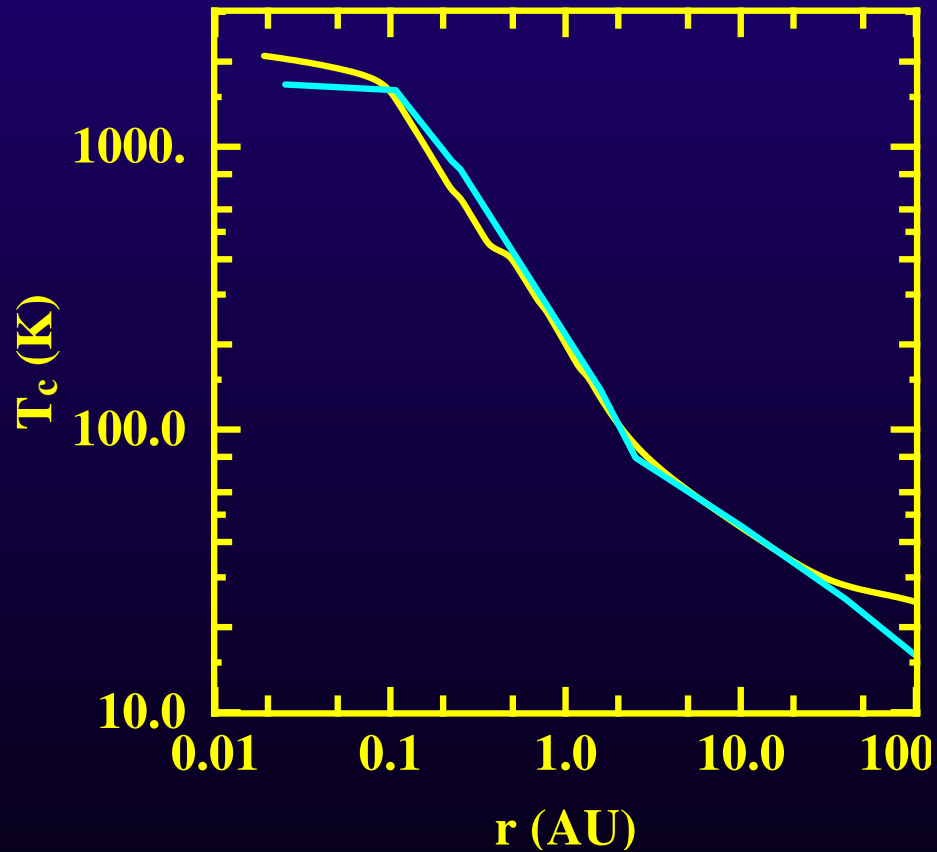
ce travail avec $H \propto r^{9/8-9/7}$
 ce travail avec $H \propto h$

Température d'irradiation

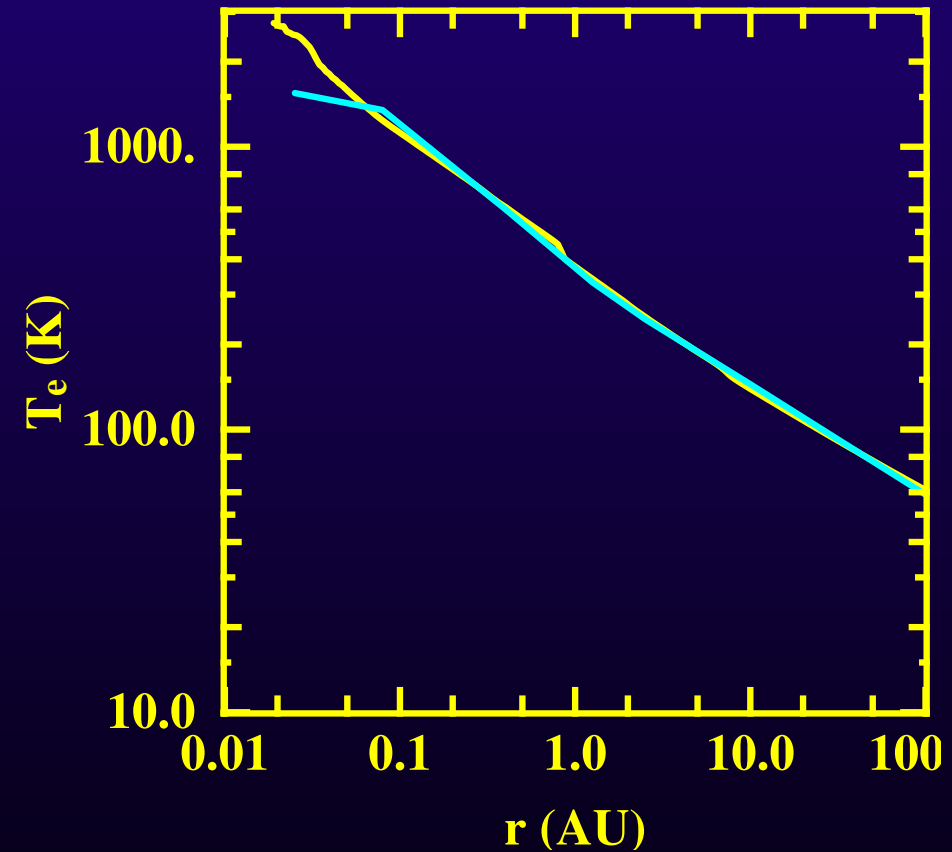
D'Alessio et coll. : H calculé

Banc d'essai (1) : températureTempérature médianeTempérature en surface

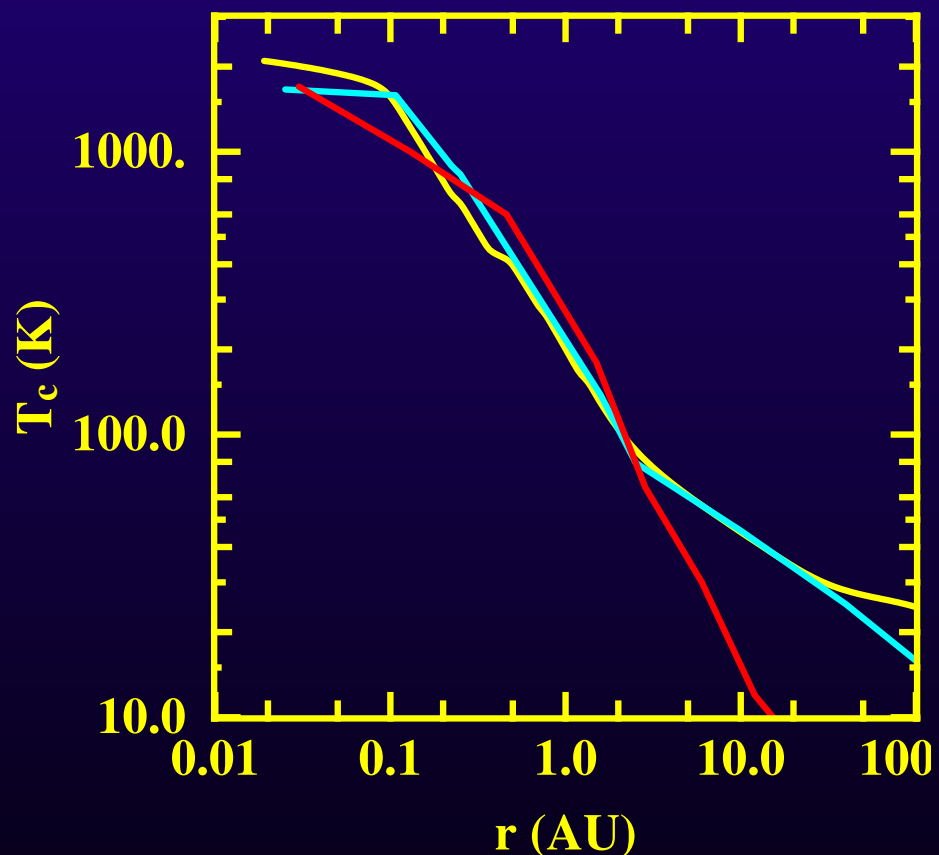
Lachaume et coll. (2003)

Banc d'essai (1) : températureTempérature médiane

Lachaume et coll. (2003)

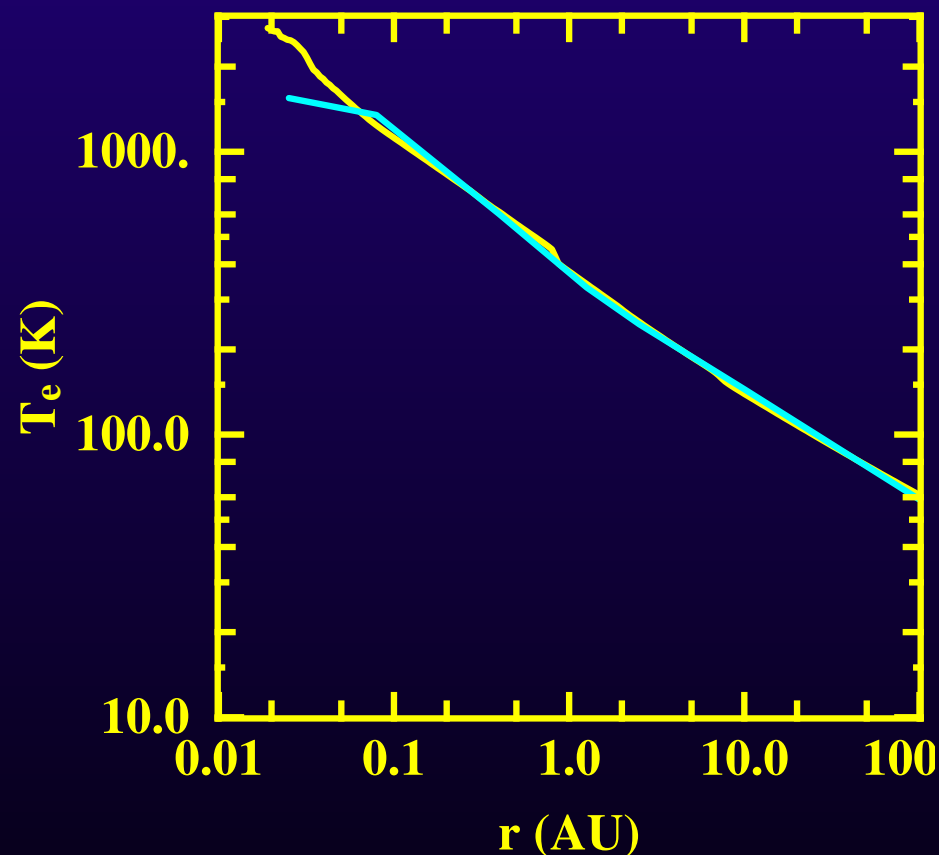
Température en surface

D'Alessio et coll. (1997)

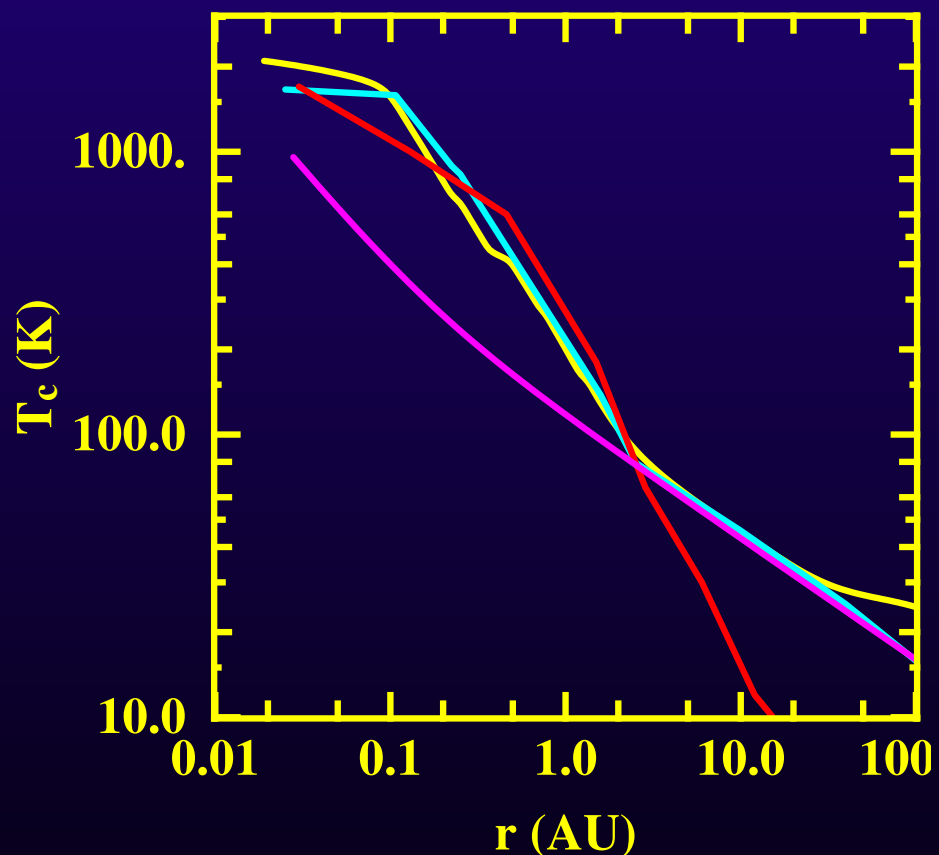
Banc d'essai (1) : températureTempérature médiane

Lachaume et coll. (2003)

Bell et coll. (1997)

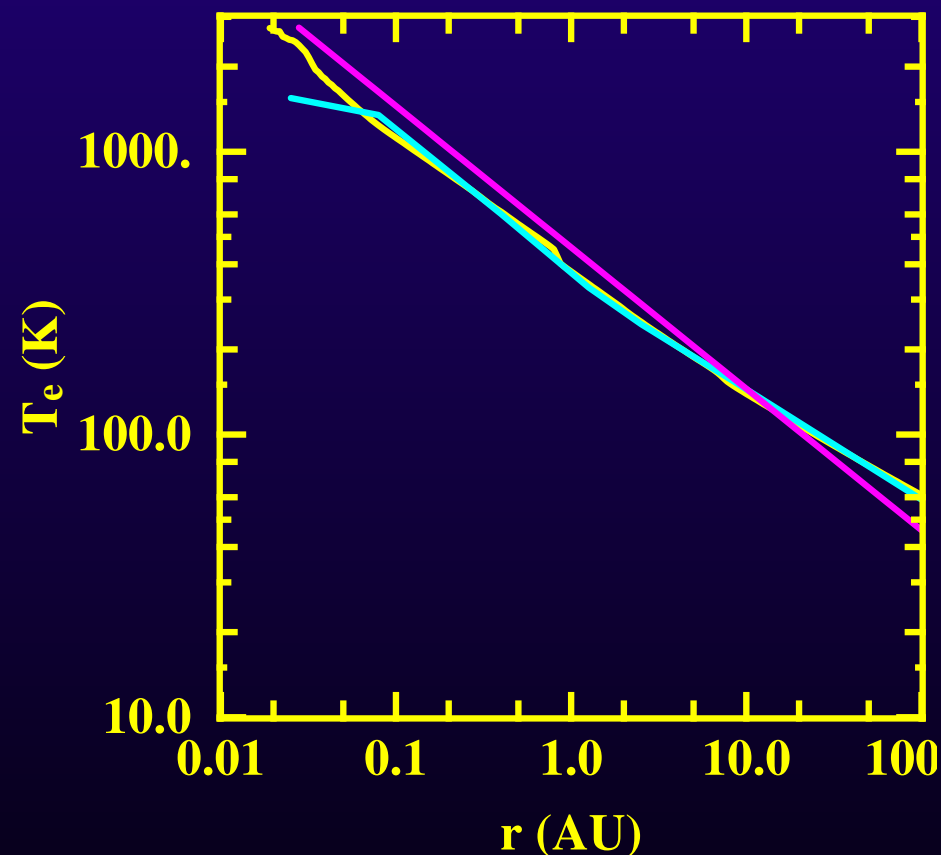
Température en surface

D'Alessio et coll. (1997)

Banc d'essai (1) : températureTempérature médiane

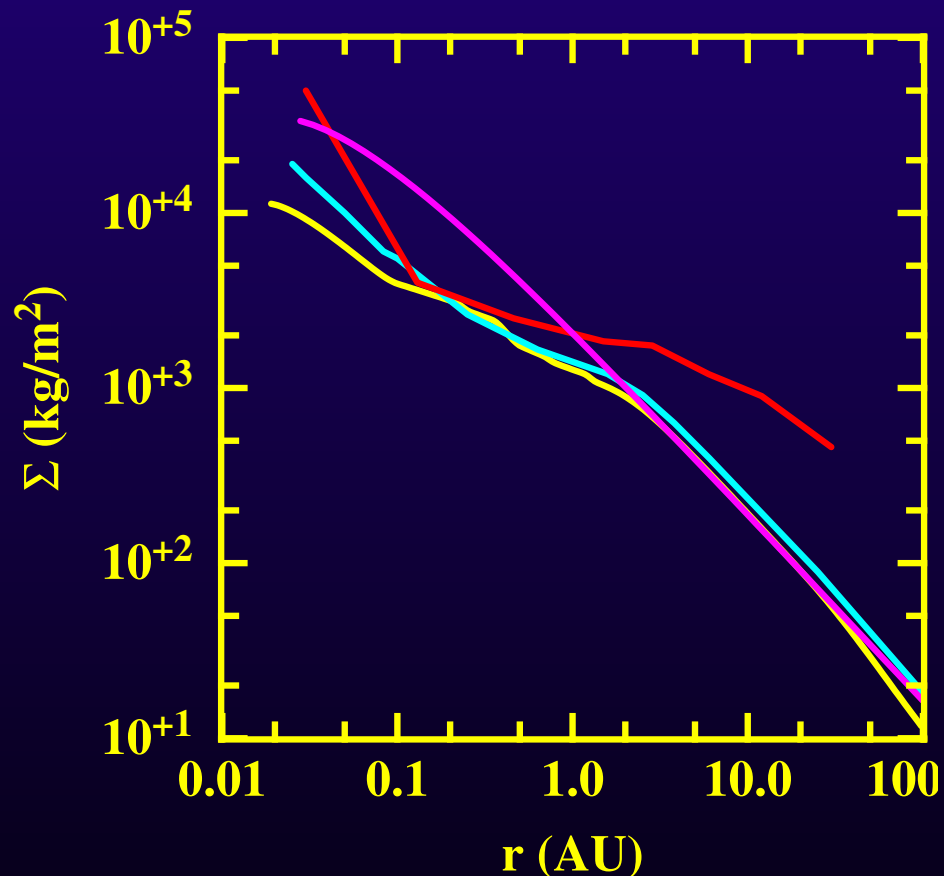
Lachaume et coll. (2003)

Bell et coll. (1997)

Température en surface

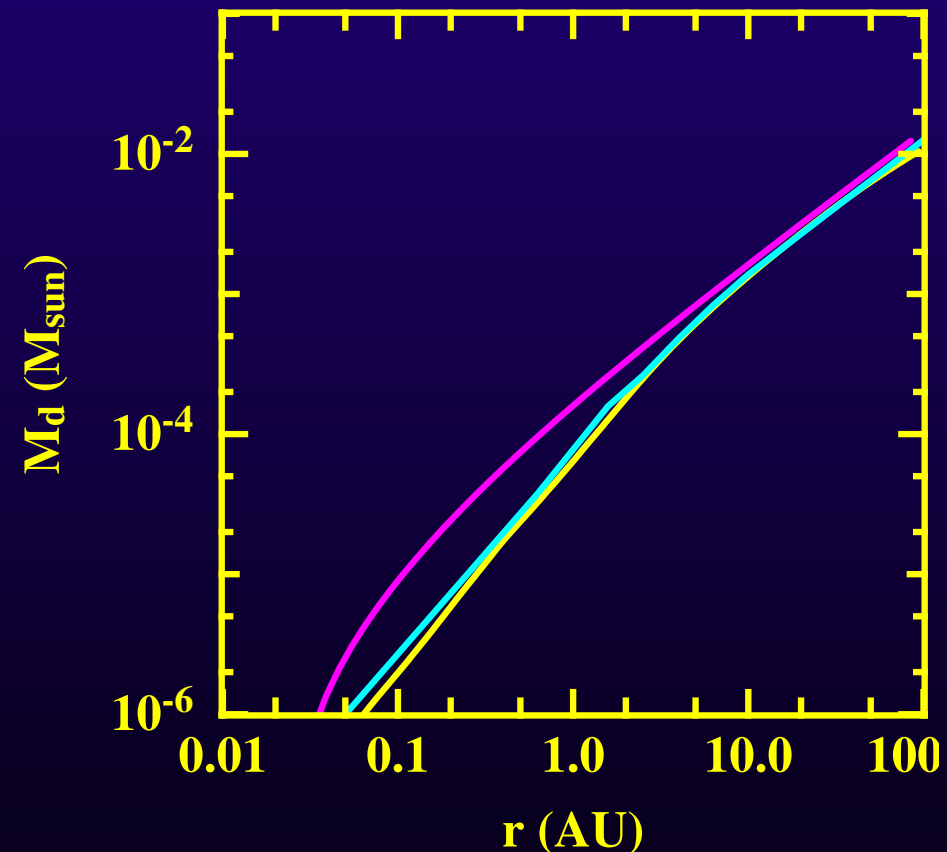
D'Alessio et coll. (1997)

Chiang & Goldreich (1997)

Banc d'essai (2) : quantité de matièreDensité de colonne

Lachaume et coll. (2003)

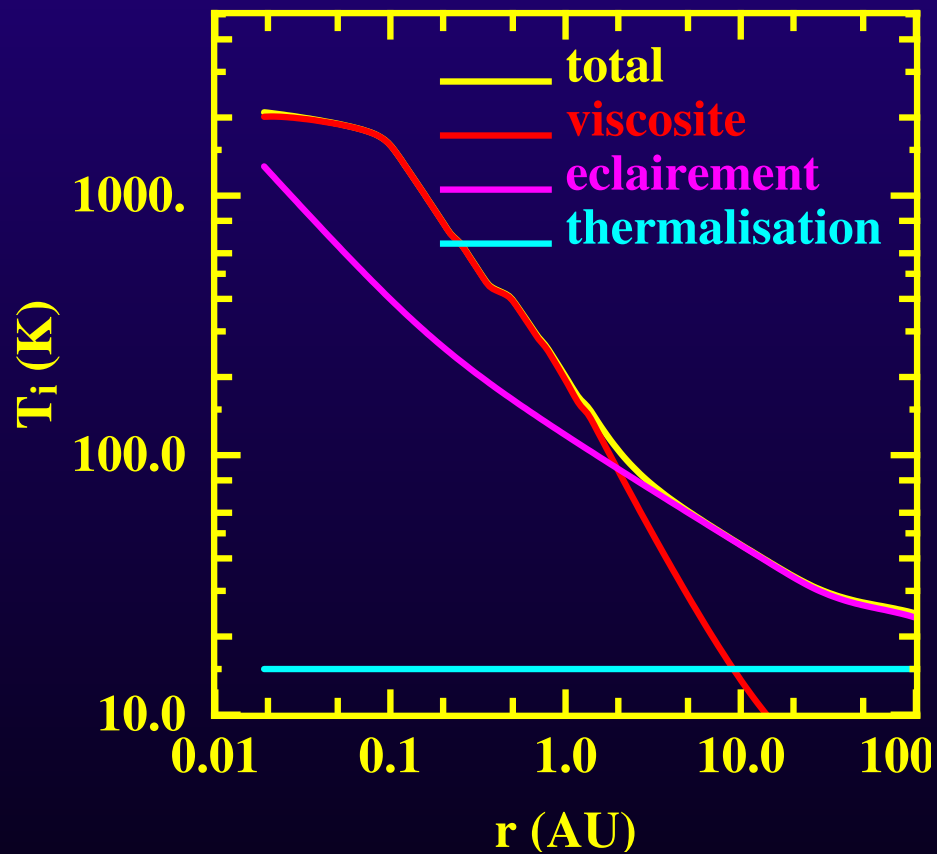
Bell et coll. (1997)

Masse cumulée

D'Alessio et coll. (1997)

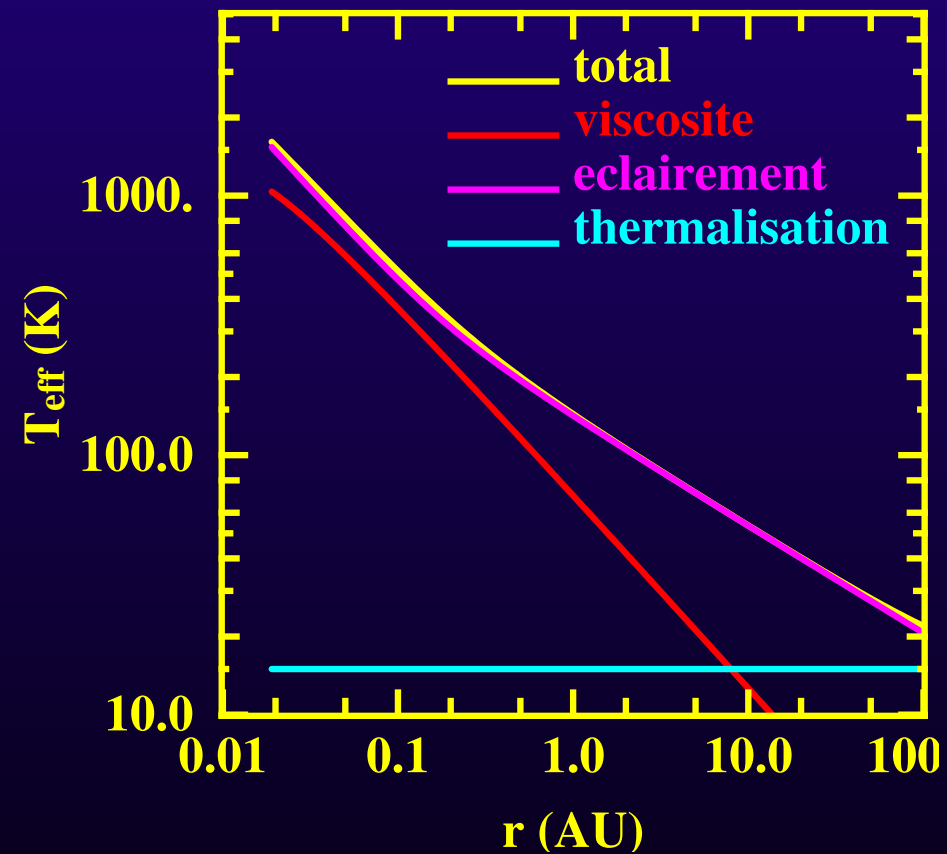
Chiang & Goldreich (1997)

Disque actif ou passif ?

Température médiane

$$(\dot{M} = 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr})$$

Température médiane
Température effective

Température effective

actif pour $r < 2\text{AU}$
passif pour tout r

Ce modèle à deux couches

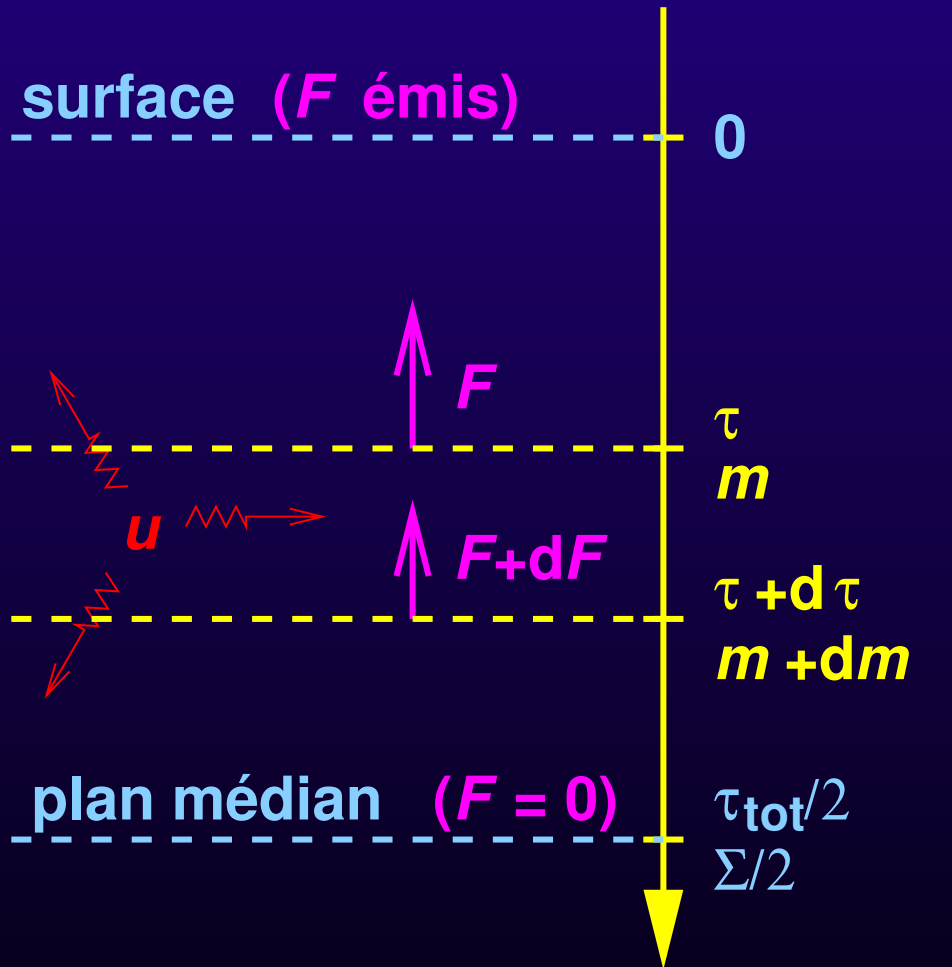
- ★ est simple à mettre en place
- ★ combine les sources de chauffage principales
- ★ reproduit les prédictions des modèles numériques
- ★ permet de pointer la physique sous-jacente

Mieux modéliser la structure verticale

- ★ transfert plutôt que couches isothermes
- ★ hydrostatique

Transfert radiatif et structure verticale

Principe de la solution



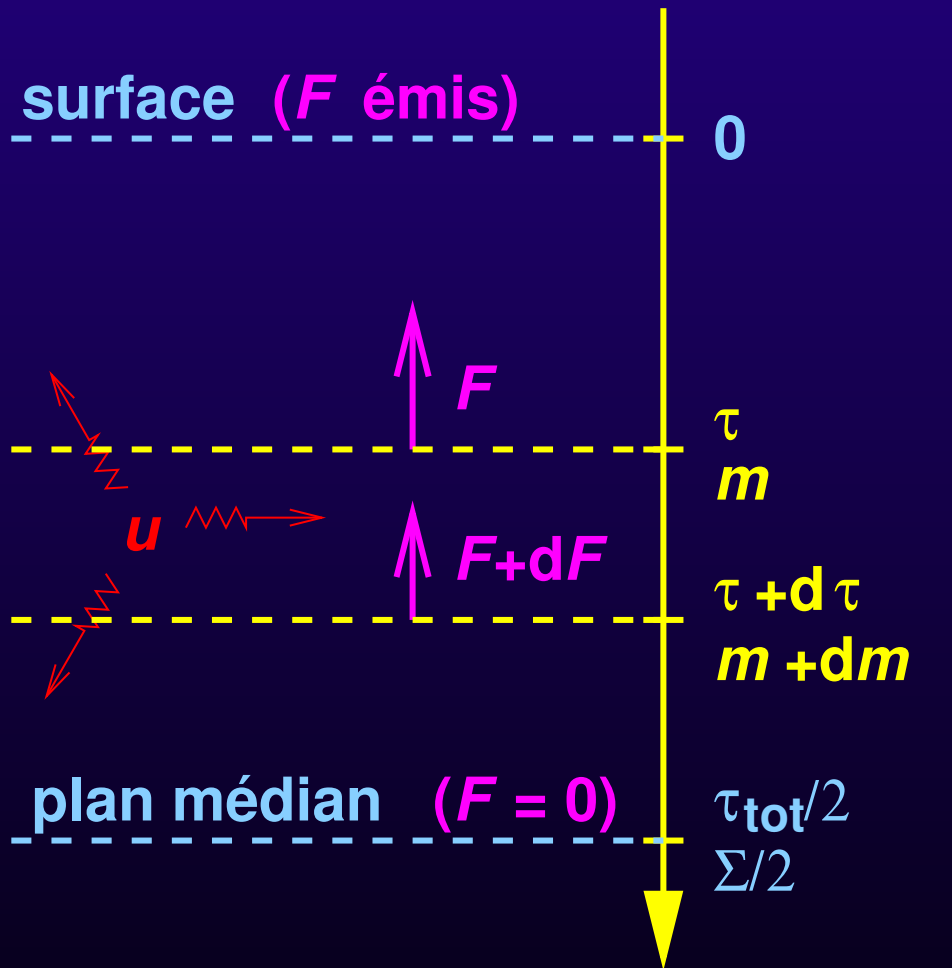
$$dF \propto -u dm$$

$$dP_{\text{rad}} \propto \kappa F dm$$

$$T^4 \leftarrow P_{\text{rad}} \ \& \ u$$

- F flux vertical
- u chauffage massique
- P_{rad} pression de radiation

Principe de la solution



$$dF \propto -u dm$$

$$dP_{\text{rad}} \propto \kappa F dm$$

$$T^4 \leftarrow P_{\text{rad}} \ \& \ u$$

F flux vertical

u chauffage massique

P_{rad} pression de radiation

Hubeny (1990)
Malbet & Bertout (1991)

viscosité
éclairage en opacité grise

Formalisation de la solution

Intensité spécifique de rayonnement $I_\nu(\mu, m)$:

$$\mu \frac{dI_\nu}{dm} = \chi_\nu I_\nu - \kappa_\nu S_\nu$$

Moments de l'intensité :

$$J = \iint I_\nu \mu^0 d\mu d\nu \quad \text{(intensité)}$$

$$H = \iint I_\nu \mu^1 d\mu d\nu \quad \text{(flux)}$$

$$K = \iint I_\nu \mu^2 d\mu d\nu \quad \text{(pression)}$$

Formalisation de la solution

Intensité spécifique de rayonnement $I_\nu(\mu, m)$:

$$\mu \frac{dI_\nu}{dm} = \chi_\nu I_\nu - \kappa_\nu S_\nu$$

Moments de l'intensité :

$$J = \iint I_\nu \mu^0 d\mu d\nu \quad \text{(intensité)}$$

$$H = \iint I_\nu \mu^1 d\mu d\nu \quad \frac{dH}{dm} = \mathbf{u}/(4\pi) \quad \text{(flux)}$$

$$K = \iint I_\nu \mu^2 d\mu d\nu \quad \frac{dK}{dm} = \chi_H H \quad \text{(pression)}$$

Solution générale

$$T^4 = \frac{\kappa_J}{4\kappa_B f_K} \left[\sum_i T_i^4 \left(\tau_H - \underbrace{(\Delta\tau_H)_i}_{\text{transport}} + \frac{f_K(0)}{f_H} + \underbrace{\frac{f_K u_i}{\sigma T_i^4 \kappa_J}}_{\text{terme local}} \right) \right]$$

★ Atmosphère stellaire + termes de chauffage.

★ Superposition du flux.

★ $\Delta\tau_H$: profondeur optique pondérée par u .

* chauffage en surface

$$\Delta\tau_H = \tau_H \implies T \text{ constant}$$

* chauffage dans le plan médian

$$\Delta\tau_H = 0 \implies T \text{ d'atmosphère stellaire}$$

L'éclairement : formalisme

trois rayonnements	thermalisé	isotrope
stellaire incident I^0	non	non
stellaire diffusé I^d	non	\approx
émis par le disque I	\approx	\approx

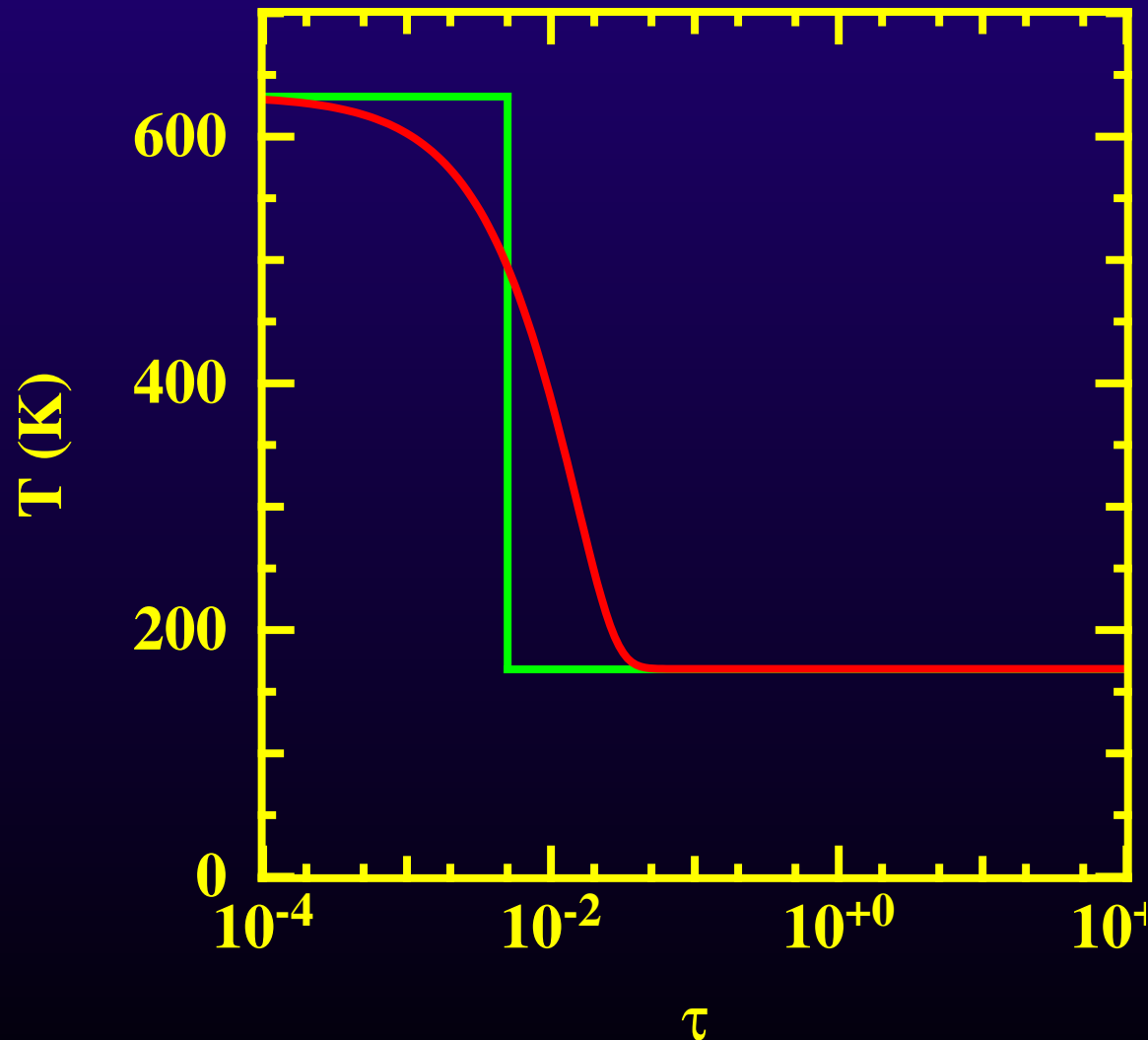
Rayonnement stellaire à part, source de chauffage

$$u = 4\pi(\kappa_J^0 J^0 + \kappa_J^d J^d)$$

$$\tau - \Delta\tau = \frac{\omega^0(K^0 - K^0(0)) + \omega^d(K^d - K^d(0))}{H^0(0) - H^d(0)}$$

$$\omega = \frac{\text{opacité pour le rayonnement stellaire}}{\text{opacité pour le rayonnement thermique}}$$

L'éclairement : disque passif

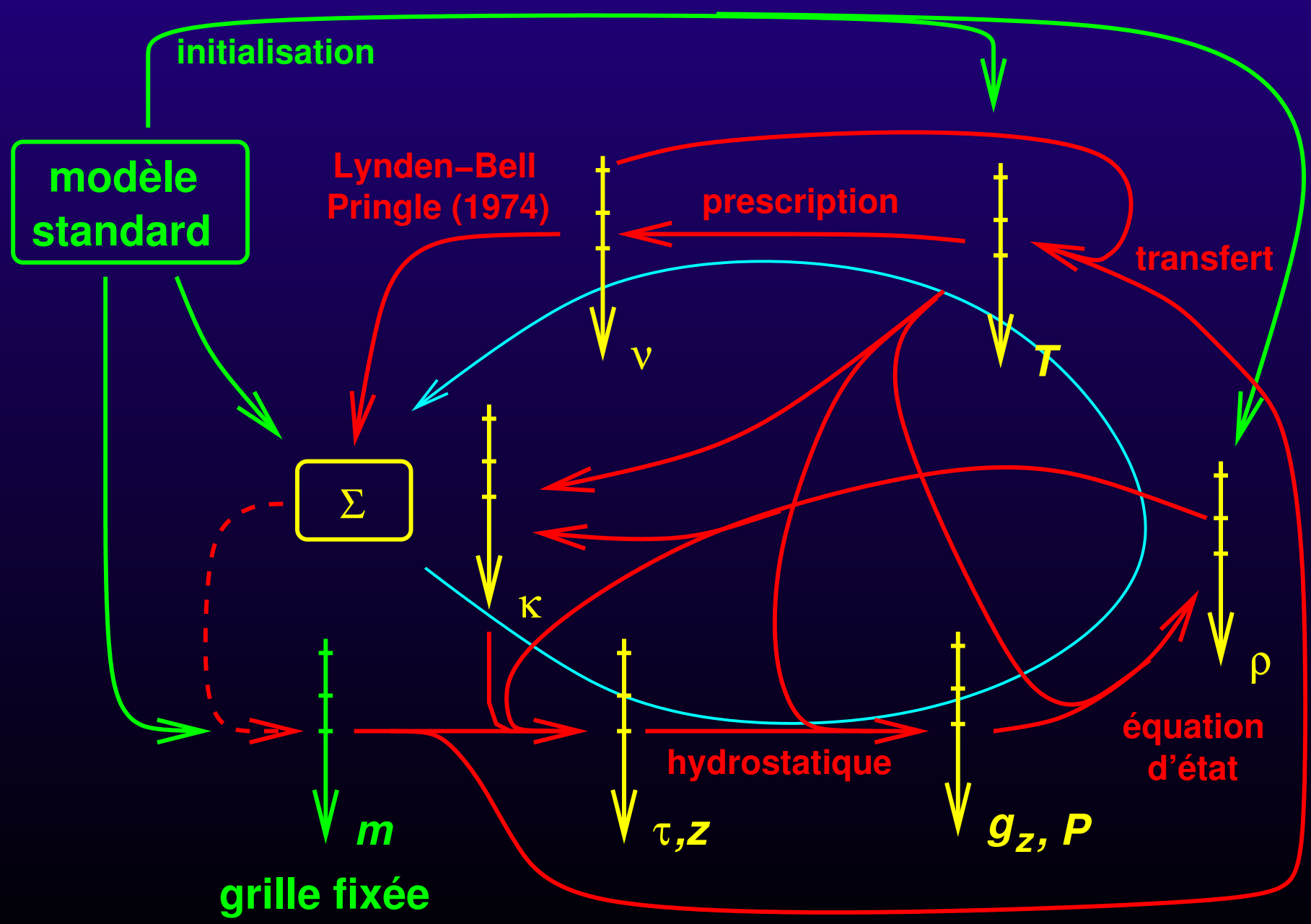


Modèles

Chiang & Goldreich
deux couches

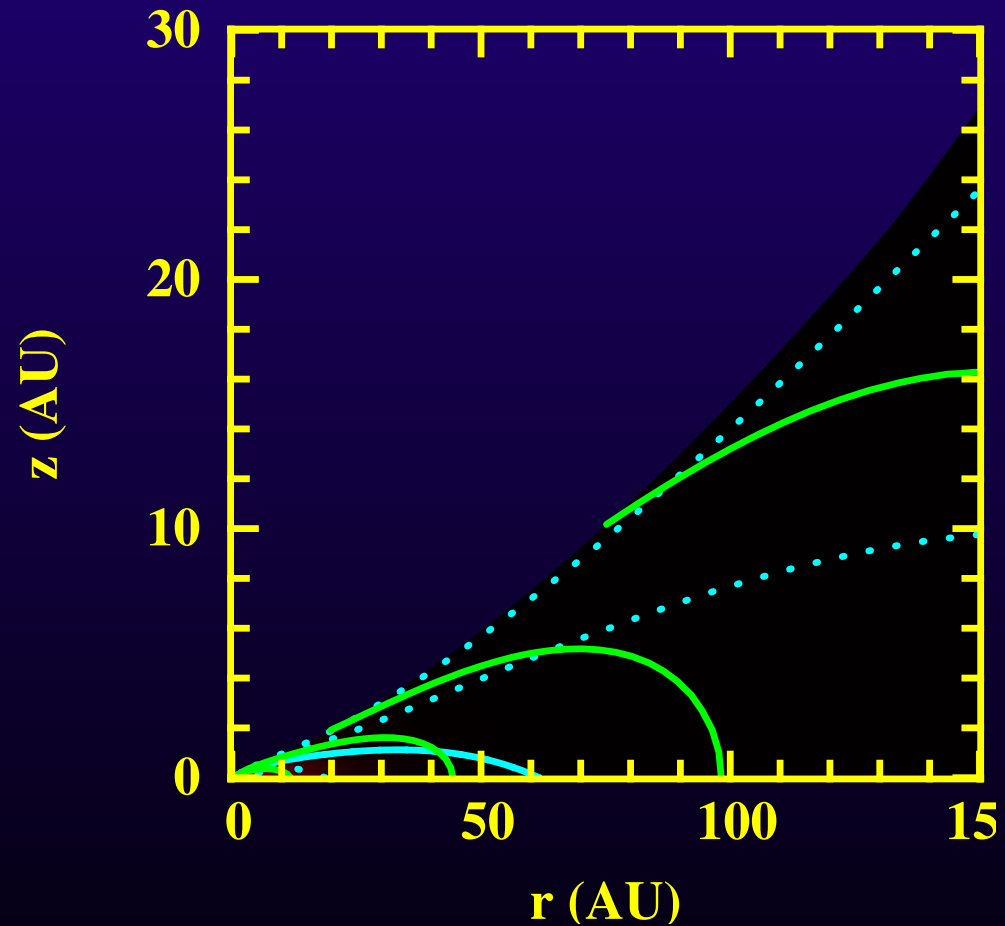
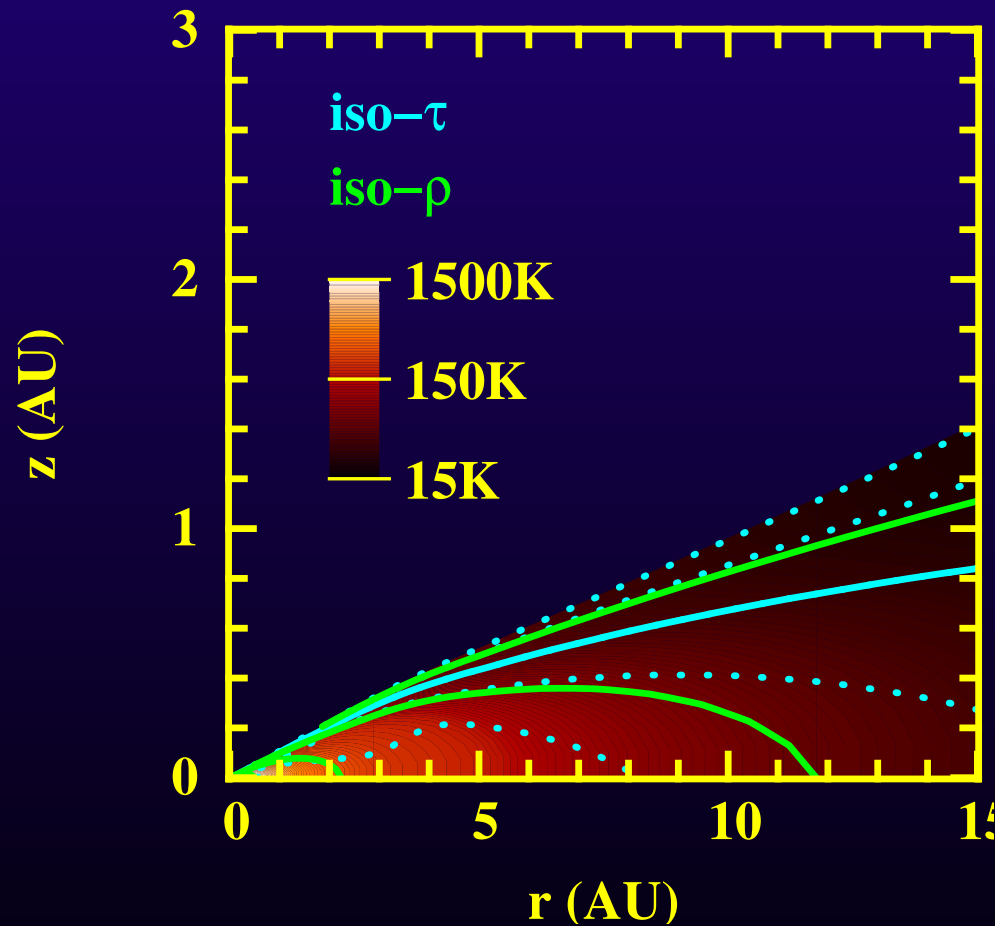
Ce travail
structure verticale
($I^d = 0$, ω^0 constant)

Approche numérique : viscosité



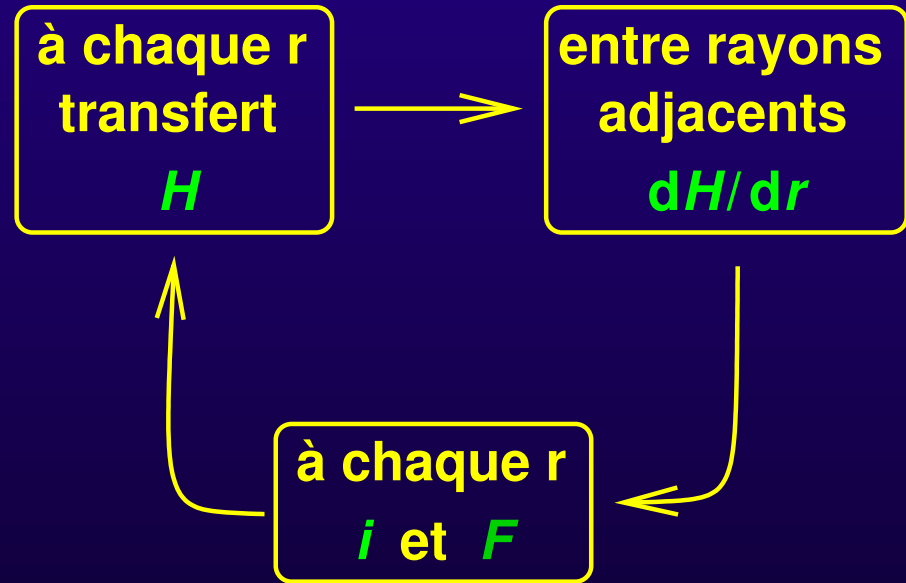
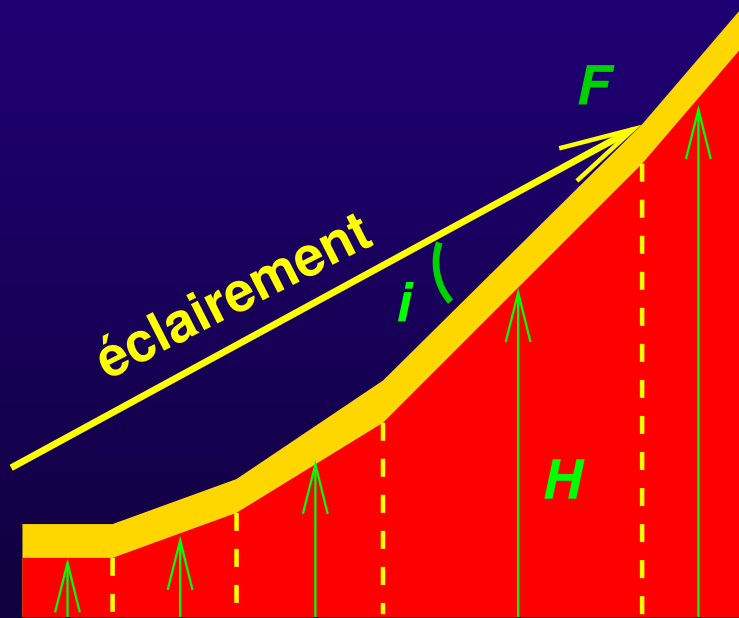
Résultats pour le disque actif

$$\dot{M} = 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$$



Malbet, Lachaume & Monin 2001

Difficultés numériques avec l'éclairement



Résultat:



Solution numérique pour l'éclairement

★ Sauts d'opacités ?

⇒ Non.

★ Solution initiale trop éloignée ?

⇒ modèle à deux couches

★ Instabilité vis-à-vis de l'éclairement ?

⇒ Oui en 1D (Dullemond 2000)

Mais en 3D ? Problème dynamique...

Solution numérique :
stabilisation par lissage du profil de H .

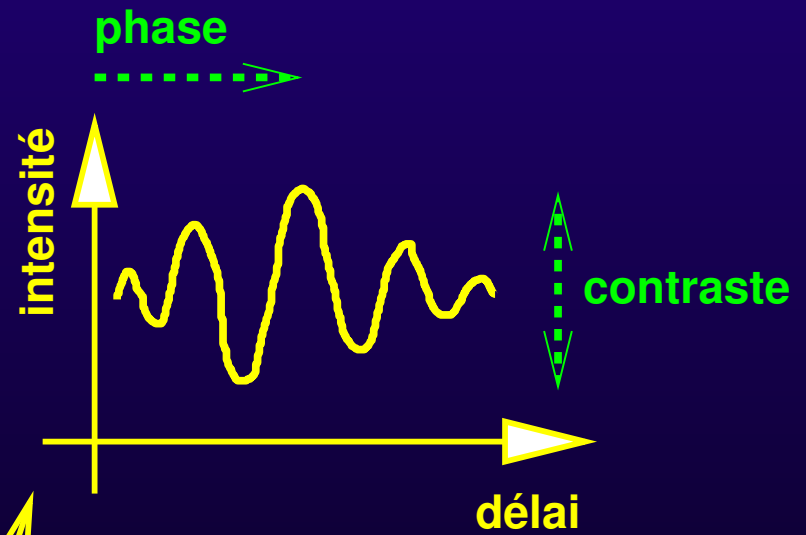
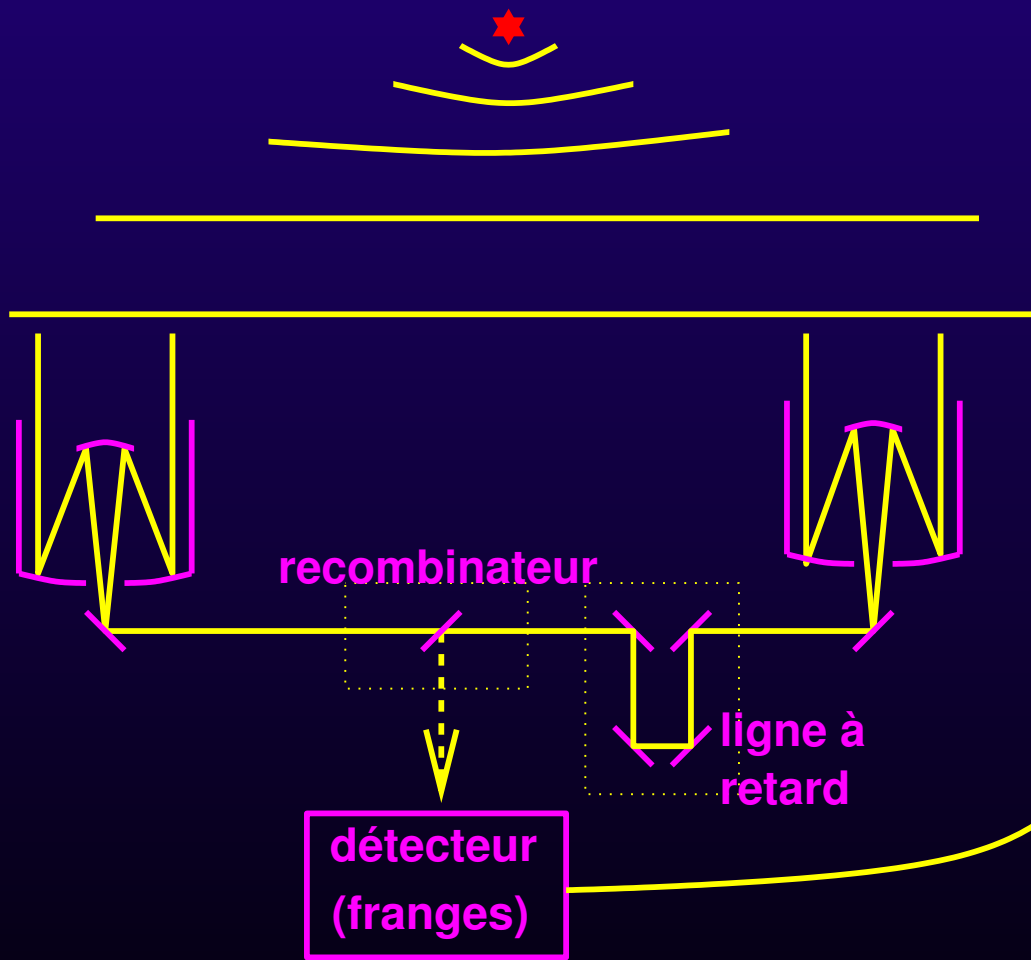
Un formalisme général

Mise en œuvre numérique

- ★ Viscosité seule : *grille* (r, z, ρ, T)
- ★ Viscosité + éclaircissement : *en cours de résolution*

Observables

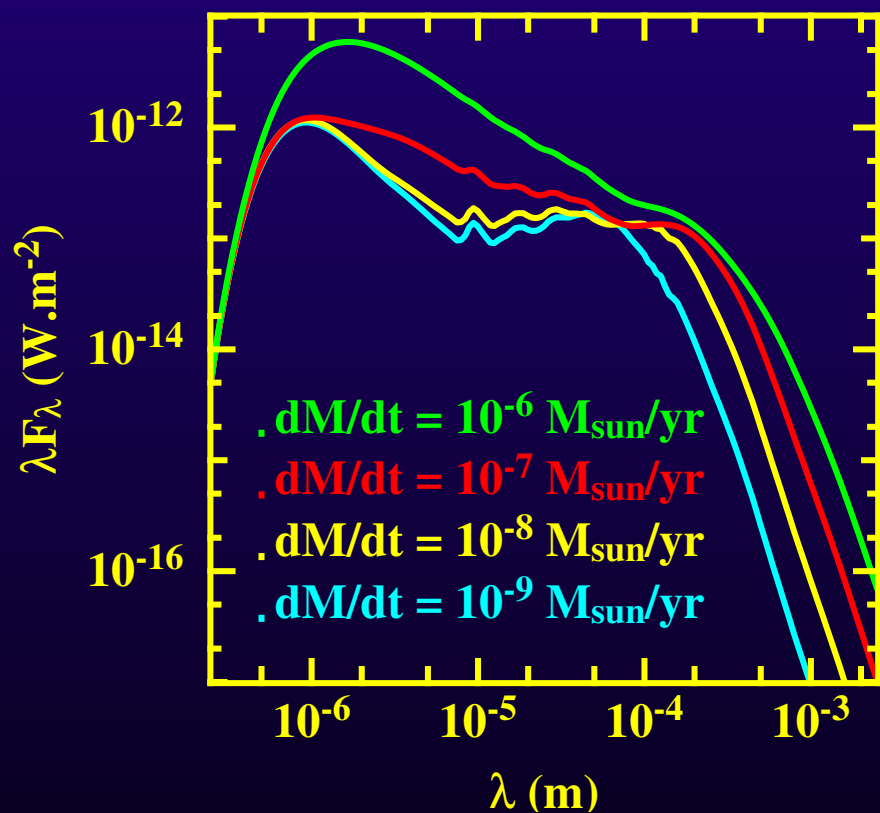
Principe de l'interférométrie optique



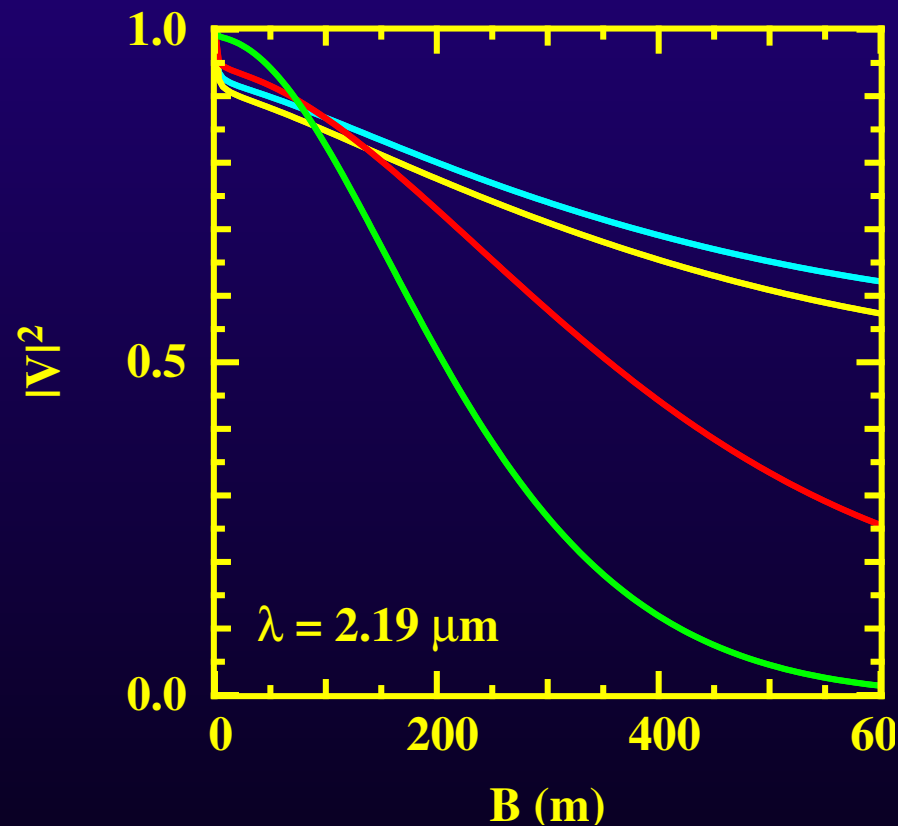
- objet ponctuel \Rightarrow contraste = 1
- objet étendu \Rightarrow contraste = 0
- taille de l'objet \Rightarrow contraste
- asymétrie \Rightarrow phase (clôture)

Influence du taux d'accrétion

SED

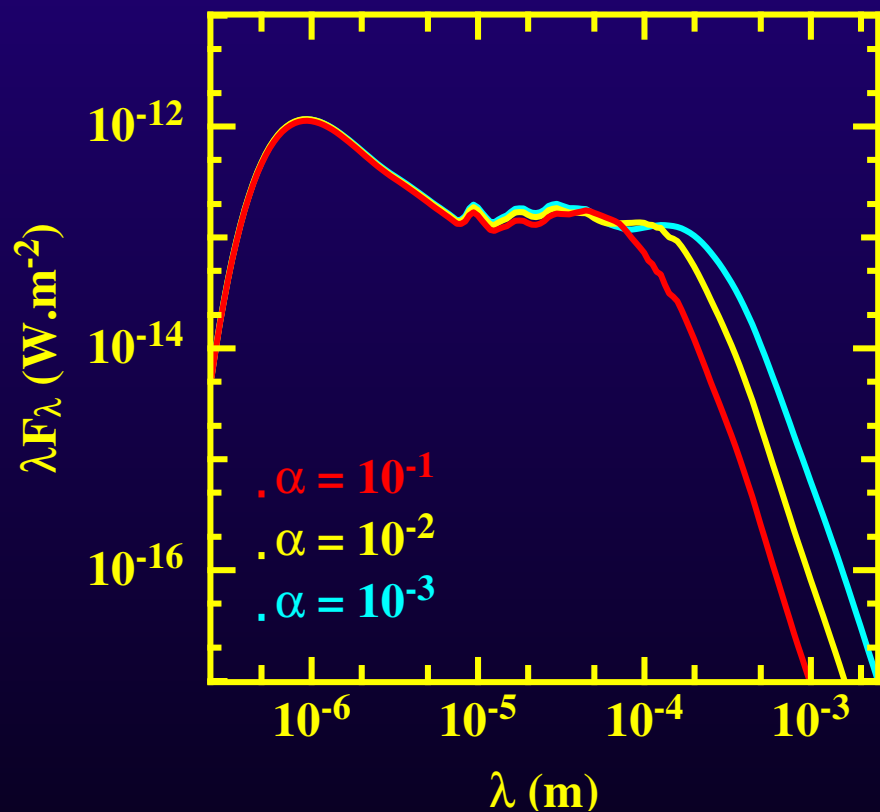
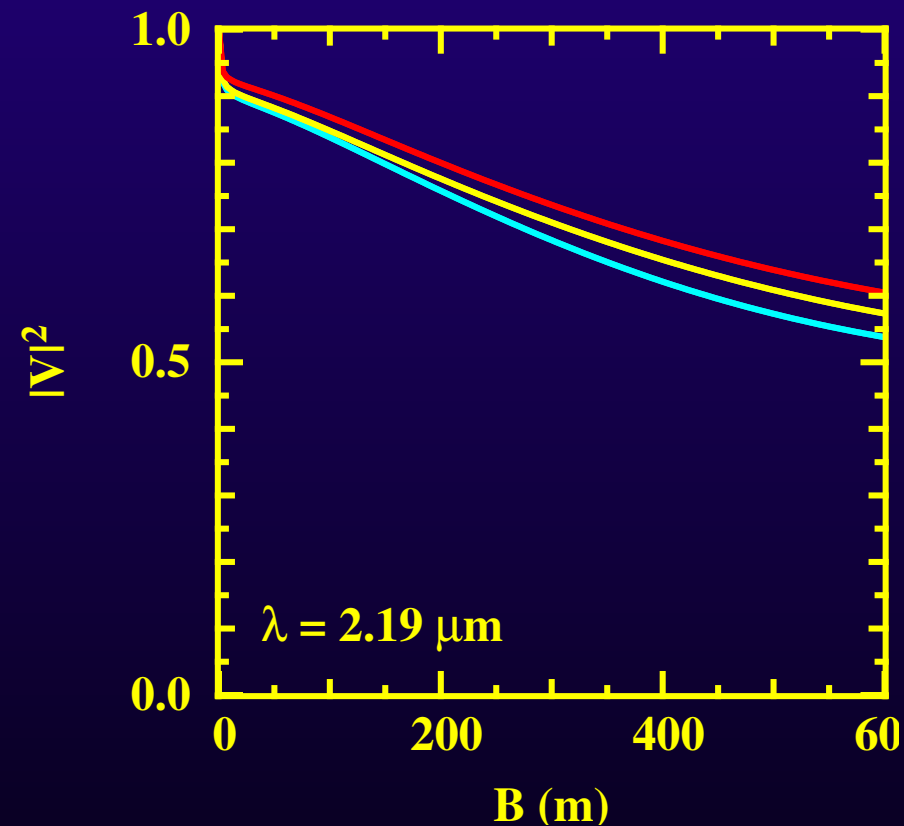


Visibilités



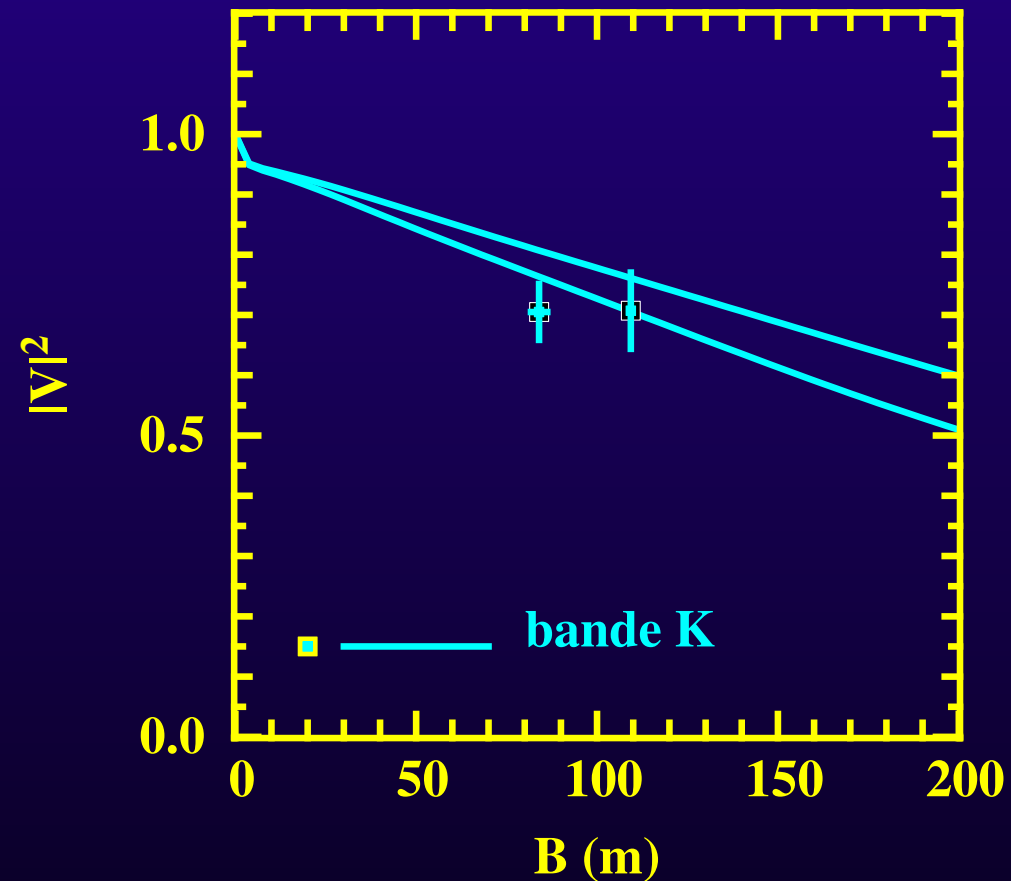
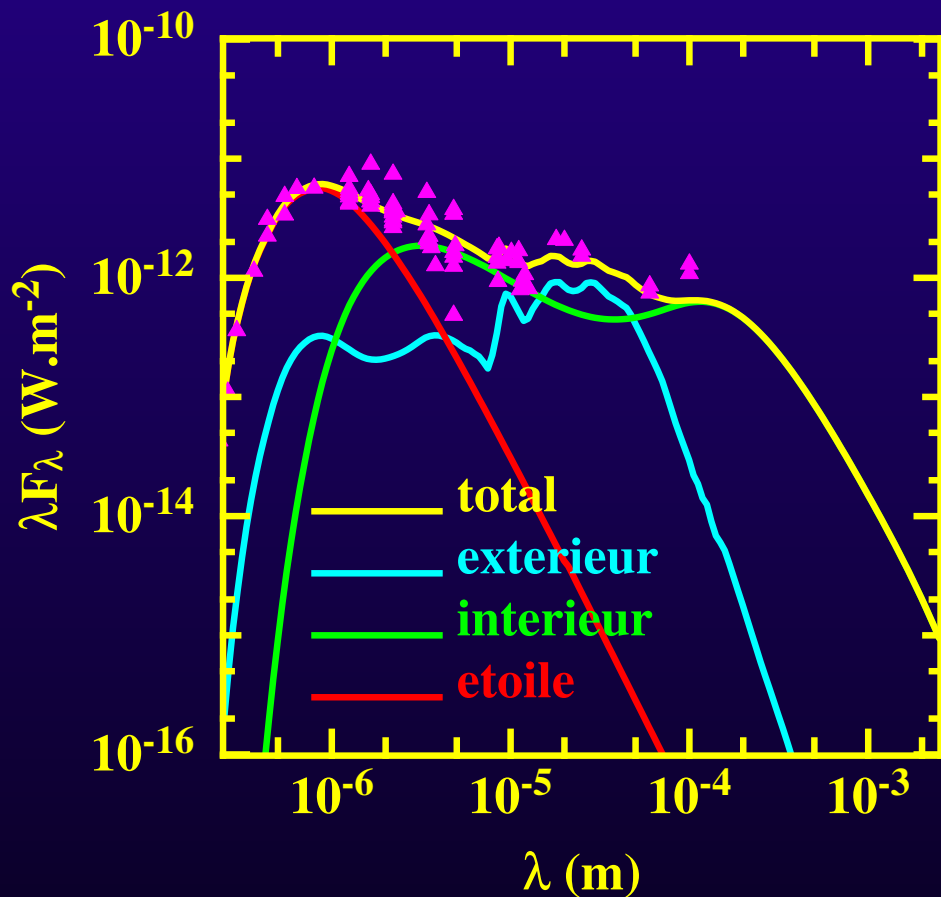
$$\dot{M} \implies \begin{cases} \Sigma & \implies \text{flux radio} \\ T_v & \implies \text{flux IR proche} \end{cases}$$

Influence de la viscosité

SEDVisibilités

$\nu \implies \Sigma \implies$ flux radio

Ajustement du modèle à SU Aurigae



$$\dot{M} = 2.0 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$$

$$\alpha = 2 \times 10^{-4}$$

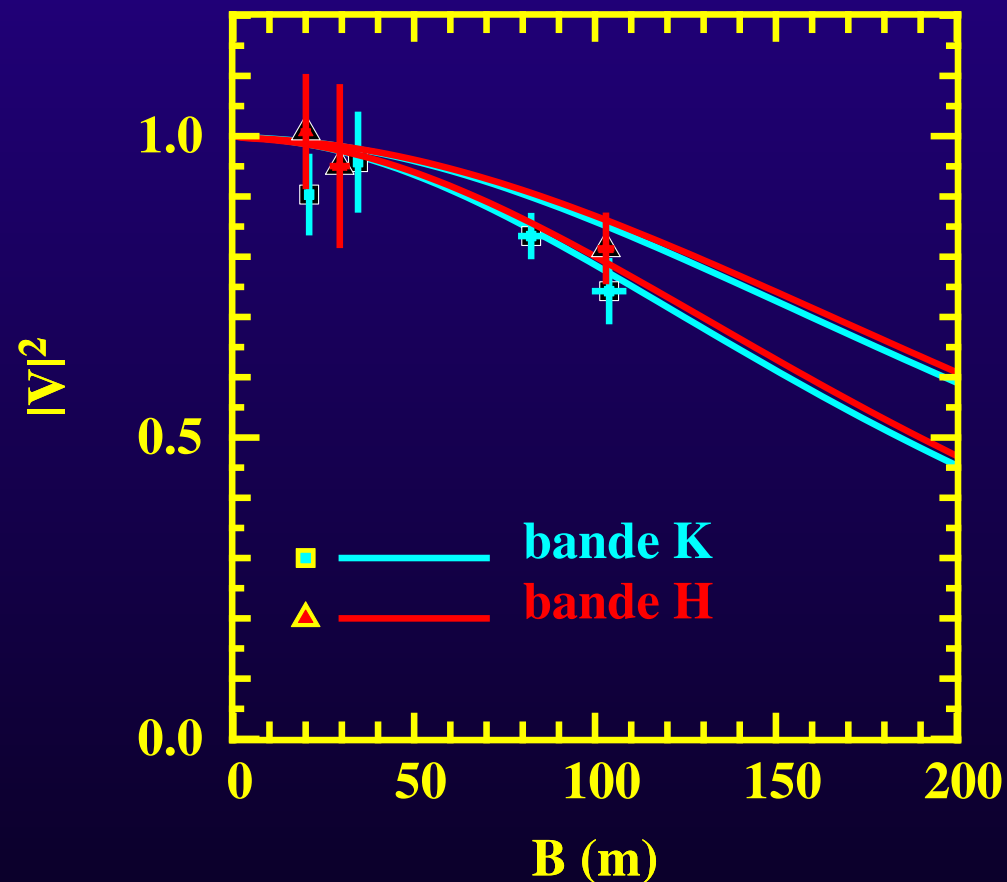
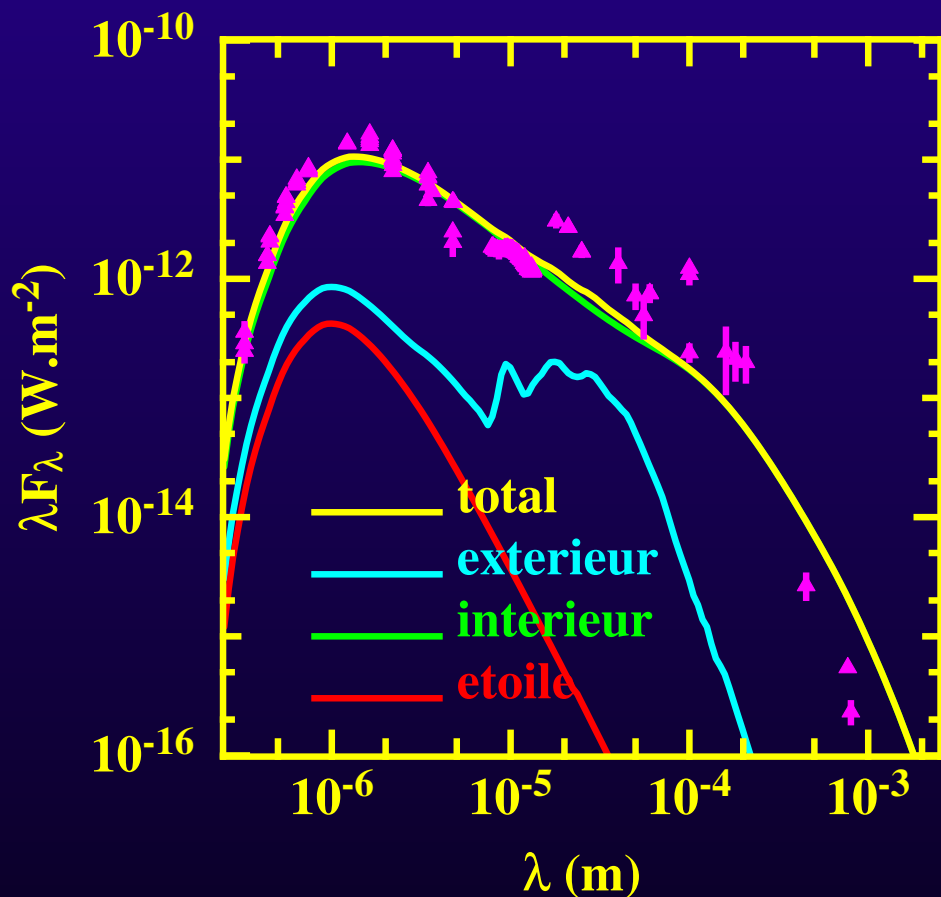
$$r_{\min} = 8.2 R_{\odot}$$

$$r_{\star} = 3.1 R_{\odot}$$

$$M_{\star} = 2.2 M_{\odot}$$

$$T_{\star} = 5600 \text{ K}$$

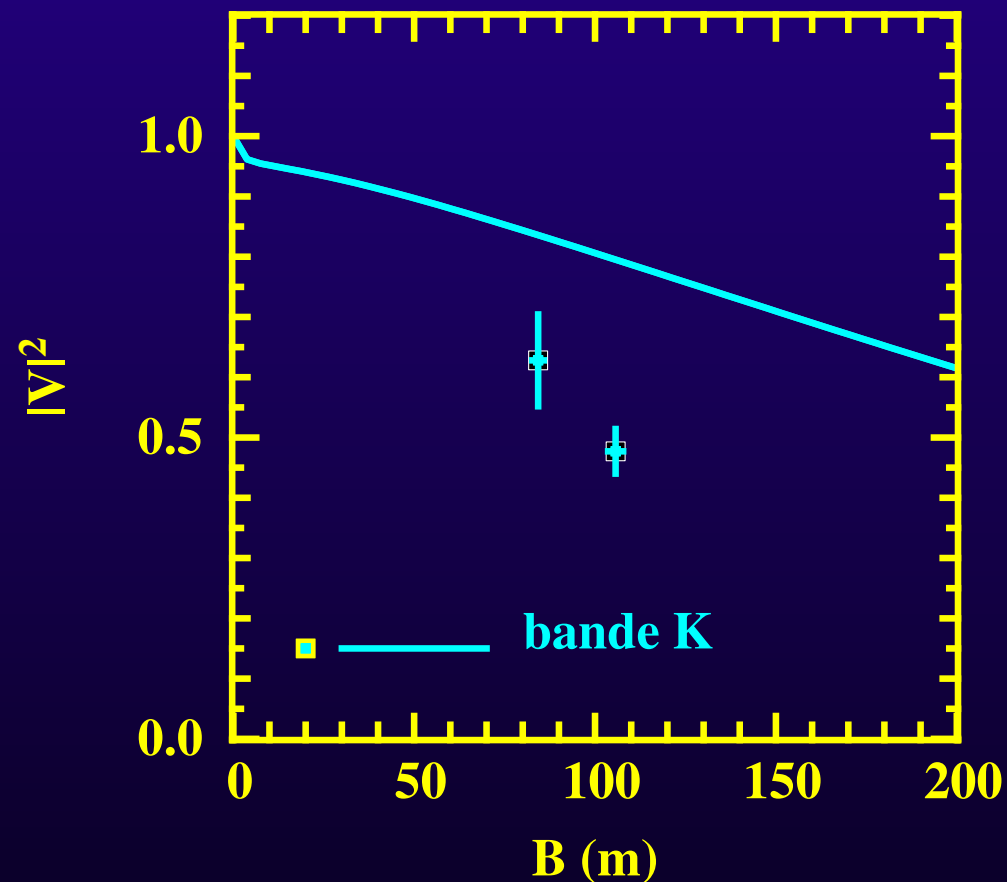
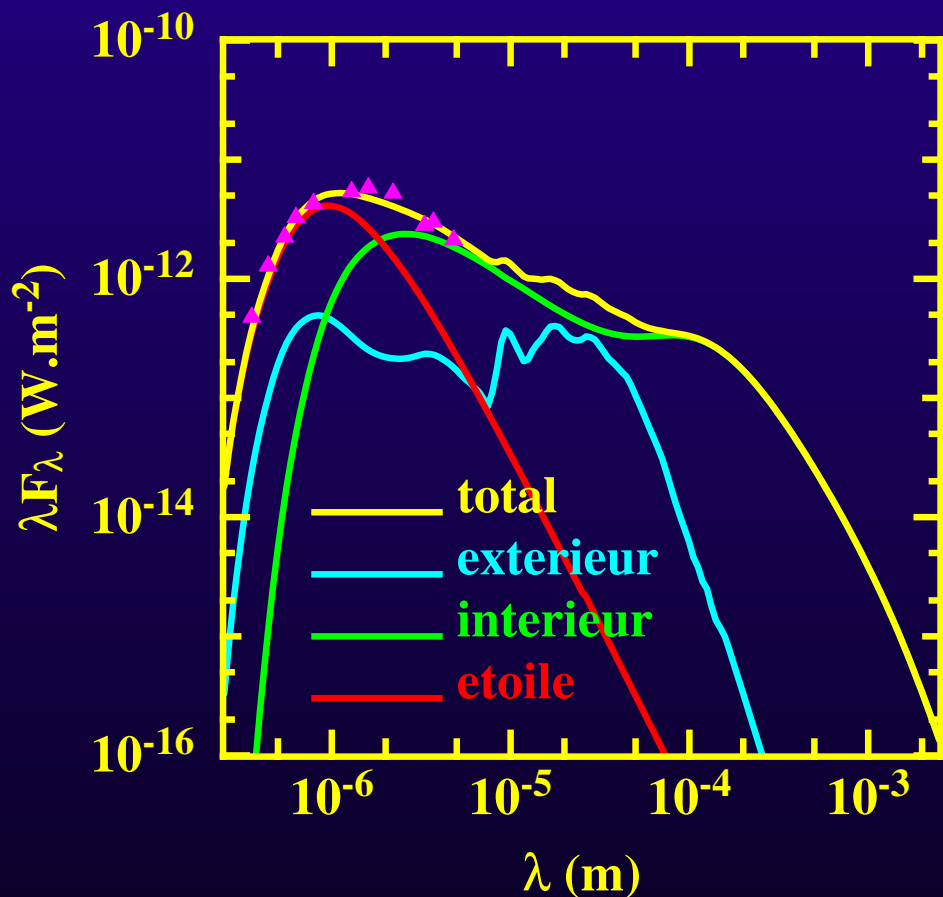
Ajustement du modèle à FU Orionis



$$\dot{M} = 3.5 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr} \quad \alpha = 1 \times 10^{-1} \quad r_{\min} = 4.4 R_{\odot}$$

$$r_{\star} = 4.0 R_{\odot} \quad M_{\star} = 1.0 M_{\odot} \quad T_{\star} = 5000 \text{ K}$$

Ajustement du modèle à T Tauri



$$\dot{M} = 1.4 \times 10^{-7} M_\odot/\text{yr}$$

$$\alpha = 1 \times 10^{-3}$$

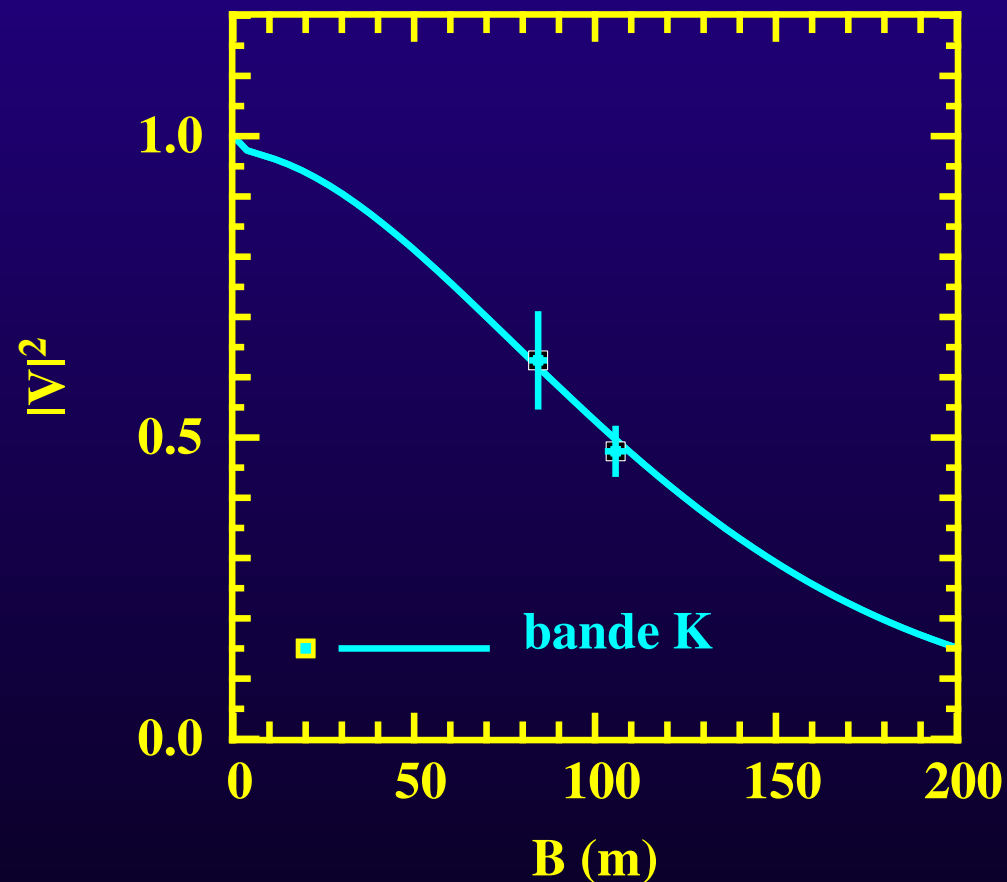
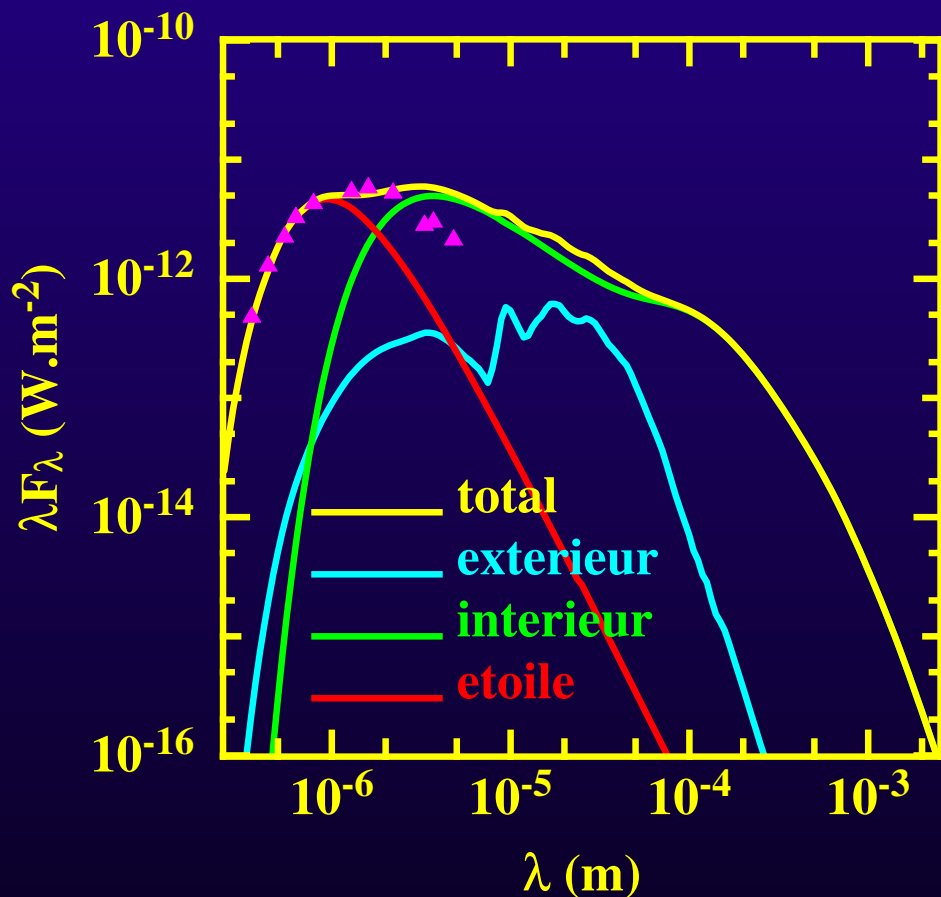
$$r_{\min} = 3.6 R_\odot$$

$$r_\star = 3.5 R_\odot$$

$$M_\star = 2.0 M_\odot$$

$$T_\star = 4600 \text{ K}$$

Ajustement du modèle à T Tauri



$$\dot{M} = 8.0 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$$

$$\alpha = 1 \times 10^{-2}$$

$$r_{\min} = 18.0 R_{\odot}$$

$$r_{\star} = 3.8 R_{\odot}$$

$$M_{\star} = 2.0 M_{\odot}$$

$$T_{\star} = 4700 \text{ K}$$

Conclusion & Perspectives

Modèle à deux couches

- ★ Simple à mettre en place et à analyser
- ★ Prédiction proche des modèles numériques
- ★ Explique à la fois SED et visibilités

Modèle de structure verticale

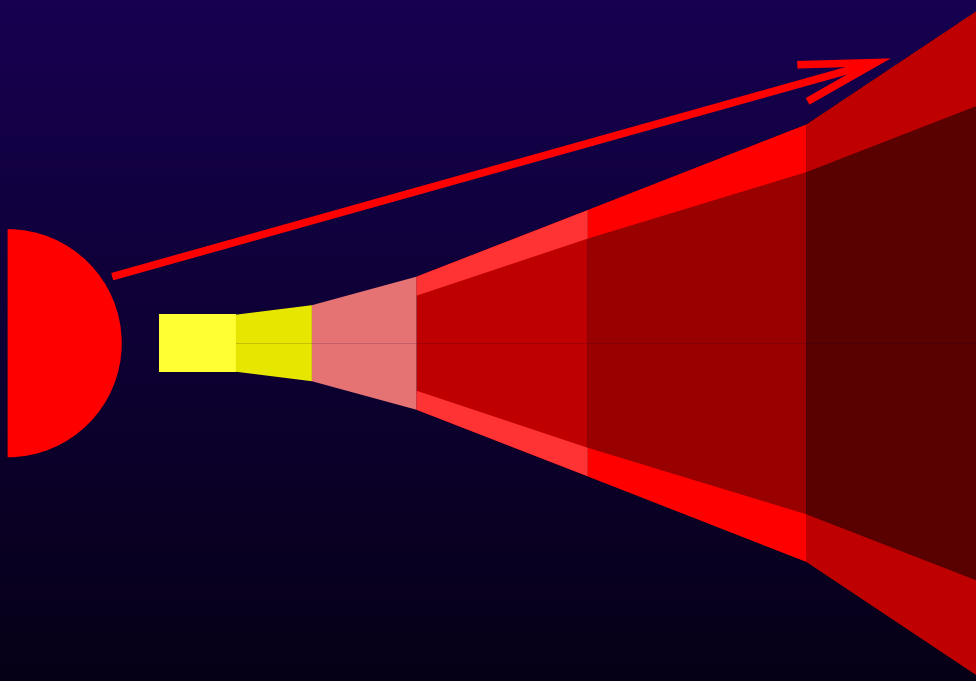
- ★ Obtention de cartes (r, z) pour le disque actif
- ★ Difficultés avec l'éclairement par l'étoile
⇒ en cours de résolution

Utilisation des données interférométriques

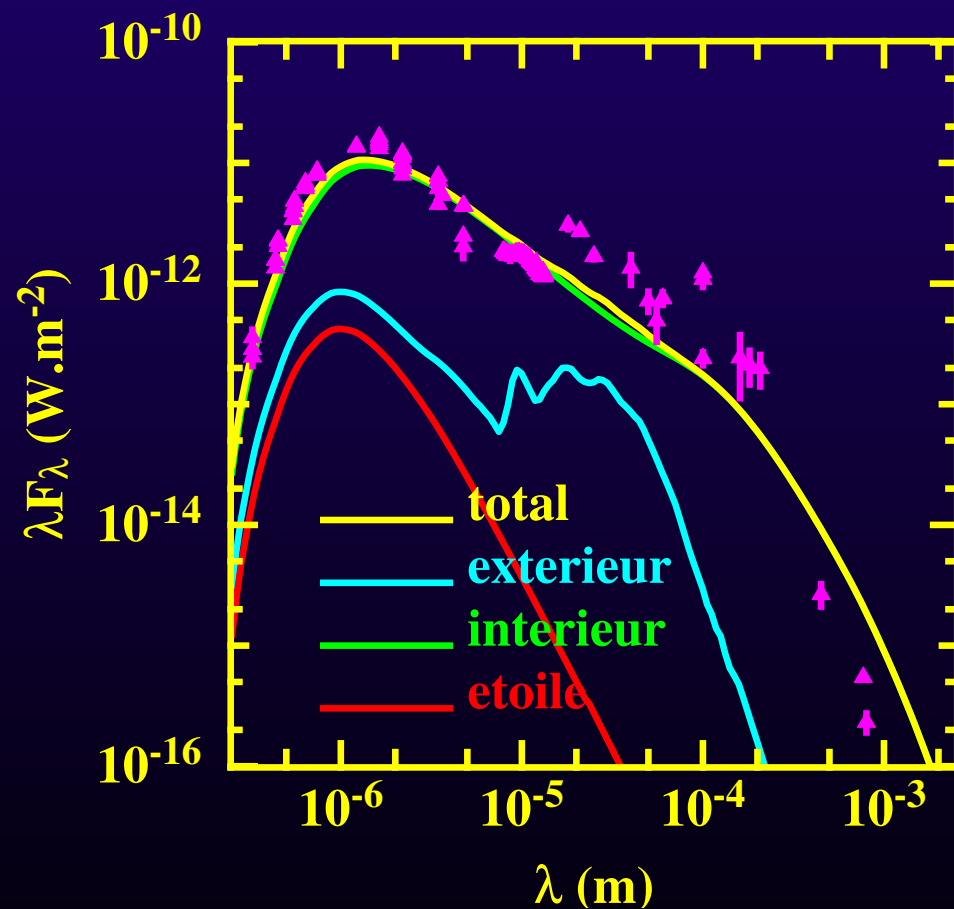
- ★ SED + visibilités = meilleures contraintes
- ★ Géométrie de la source et visibilités (*Lachaume 2003*)

Rétro-chauffage ?

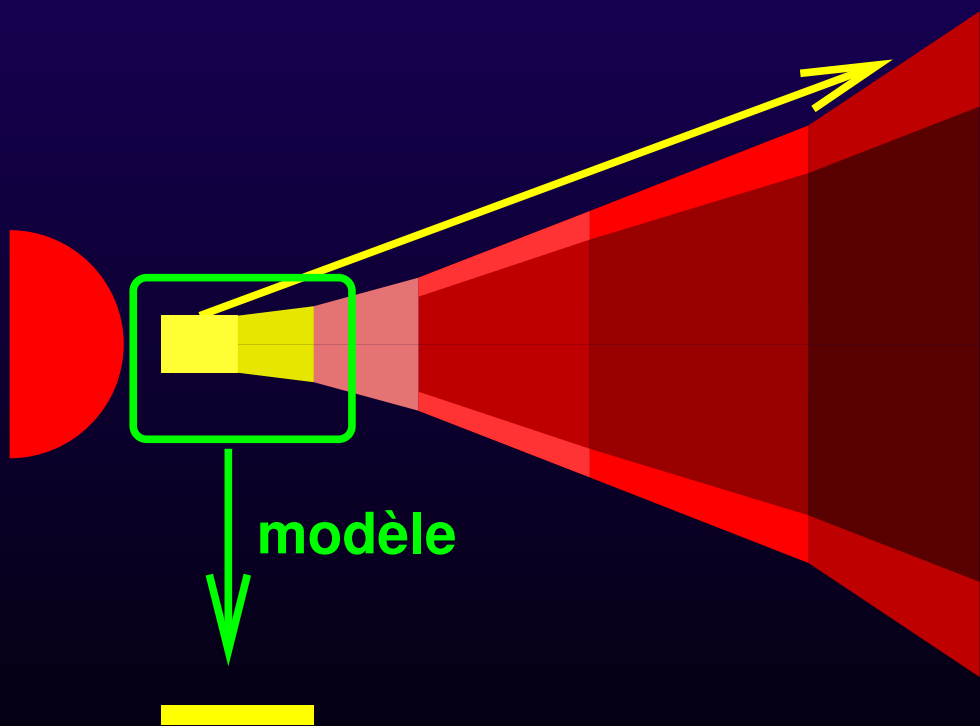
Le principe



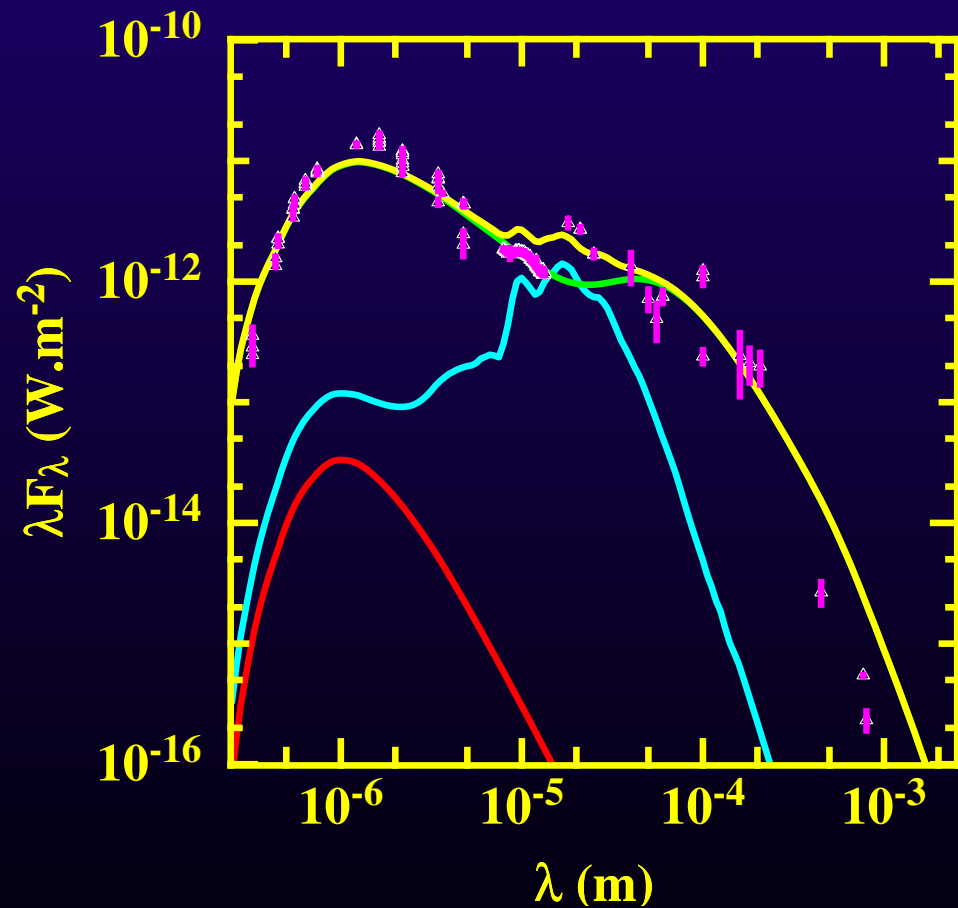
SED de FU Ori



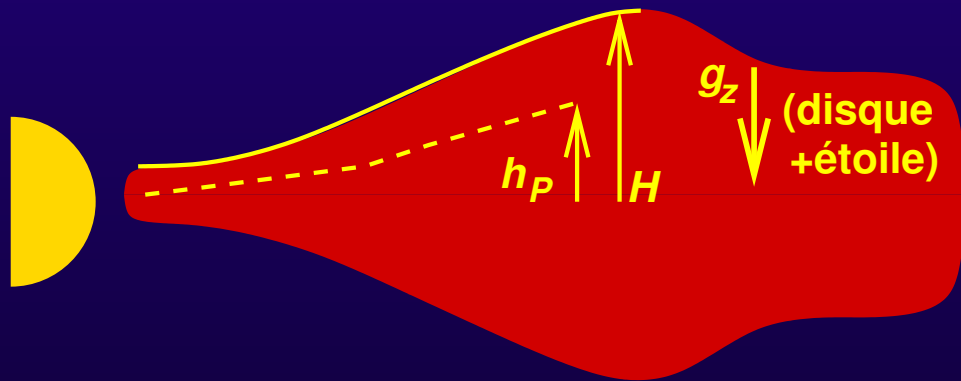
Le principe



SED de FU Ori



Autogravité marginale ?

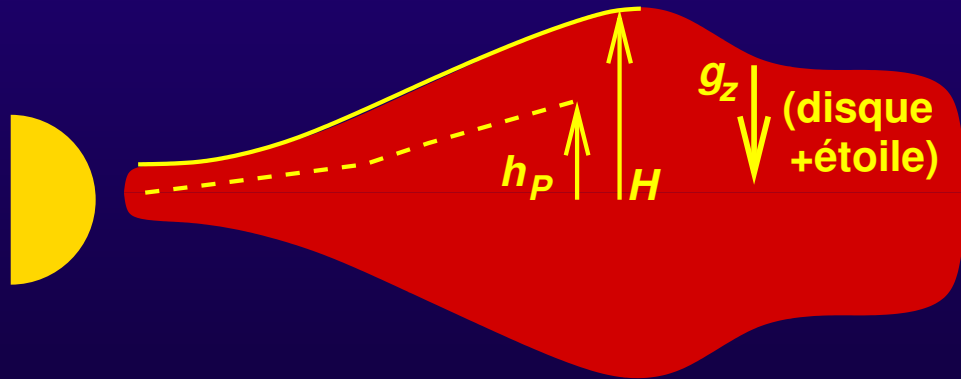
Le principe

$$g_z \approx \left(\underbrace{\frac{M_* z}{r^3}}_{\text{étoile}} + \underbrace{4\pi(\Sigma - m)}_{\text{disque}} \right) G$$

$$(\dot{M} = 10^{-7} M_{\odot} / \text{yr})$$

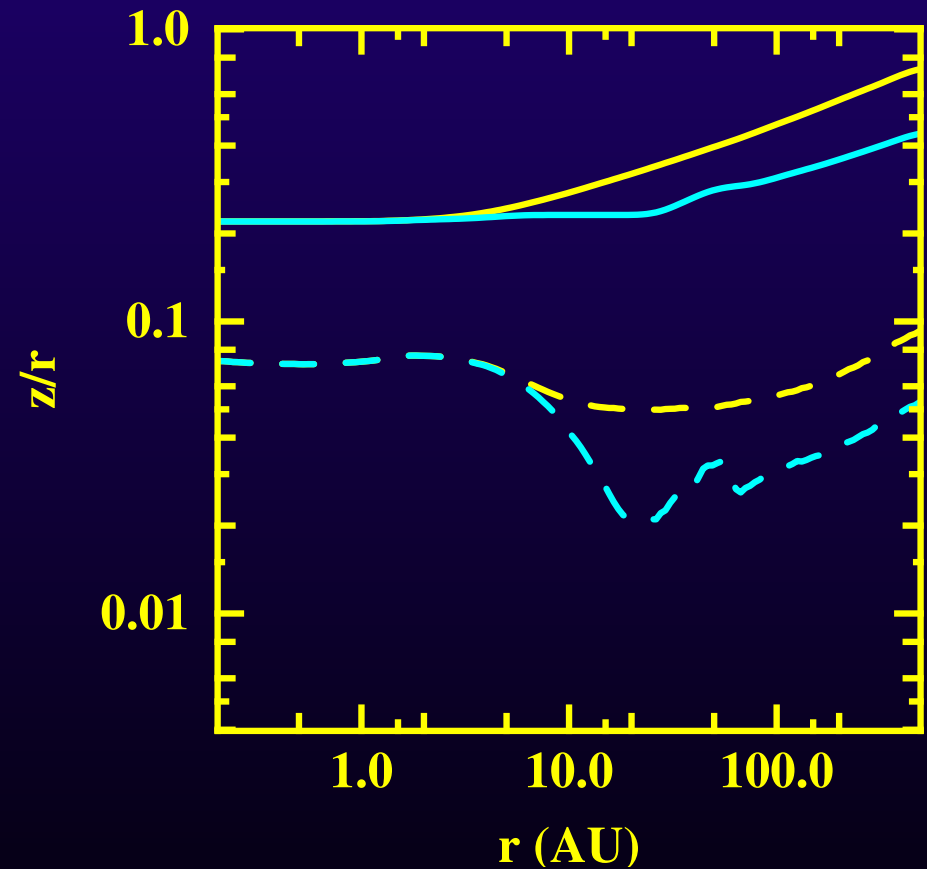
Autogravité marginale ?

Le principe



$$g_z \approx \left(\underbrace{\frac{M_* z}{r^3}}_{\text{étoile}} + \underbrace{4\pi(\Sigma - m)}_{\text{disque}} \right) G$$

Échelle de hauteur



$$(\dot{M} = 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr})$$

Meilleure compréhension de la physique

- ★ Dynamique : *autogravité, éjection de matière*
- ★ Chauffage : *rétro-chauffage, advection d'énergie*

Amélioration du code

- ★ Éclairement
- ★ Observables synthétiques
 - * disques vus par la tranche (*transfert 2-3D*)
 - * lumière diffusée & polarimétrie (*interface avec MC*)
- ★ Naines brunes
- ★ Traitement multi- λ ?

Contraintes observationnelles

- ★ Observations VLTI (*FU Ori en détail + survey Tau*)

