Modélisation du Transfert Radiatif

Edouard Audit, Service d'Astrophysique, CEA/saclay

Le Transfert Radiatif

(presque) **Toute l'information nous arrivent sous forme de photons**

- **Diagnostique** $\longrightarrow$ transfert fin, beaucoup de raies....
- **Hydrodynamique Radiative** $\longrightarrow$ Effets dynamiques

- Les deux aspects peuvent être couplés.....
- Opacitées, données de physique atomique

L'équation du Transfert

$$\frac{1}{c}\partial_t I(x,t,\overrightarrow{n},\nu) + \overrightarrow{n}.\nabla I(x,t,\overrightarrow{n},\nu) =$$

$$\eta(x,t,\overrightarrow{n},\nu) - \chi(x,t,\overrightarrow{n},\nu) I(x,t,\overrightarrow{n},\nu)$$

Comment résoudre l'équation du Transfert...

- ▶ Intégration directe
- ▶ Méthodes Monte-carlo
- ▶ Modèles aux moments

Le code Phoenix

▶ Résolution “*exacte*” de l'équation de transfert pour une atmosphère statique

▶ Itération pour trouver la population des niveaux des differentes espèces

▶ Entre 10^4 et 10^6 fréquences, 50 niveaux de stratifications

▶ Equation d'états avec 40 éléments (jusqu'à 26 degrés d'ionisation) et 206 molécules

▶ 42 millions de raies atomiques et ioniques

▶ 700 millions de raies moléculaires

6 jours de calculs.....

Le Transfert Radiatif

Equation du transfert :

$$\left(\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n}.\nabla\right) I(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu) = \eta(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu) - \chi(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu) I(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu)$$

- Trop gourmand en temps et en mémoire
- Trop précis (!!!...)

$\Longrightarrow$ **Modèle aux moments**

$$E_r(\mathbf{x},t,\nu) = \frac{1}{c}\int I(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu) \, d\omega$$

$$F_r(\mathbf{x},t,\nu) = \frac{1}{c}\int I(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu)\,\mathbf{n} \, d\omega$$

$$P_r(\mathbf{x},t,\nu) = \frac{1}{c}\int I(\mathbf{x},t,\mathbf{n},\nu)\,\mathbf{n}\otimes\mathbf{n} \, d\omega$$

Il faut une relation de fermeture pour clore le système (modèle M1):

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{D} E_r$$

$$\mathbf{D} = \frac{1-\chi}{2}\mathbf{I} + \frac{3\chi-1}{2}\mathbf{n}\otimes\mathbf{n}$$

$$\chi = \frac{3+4f^2}{5+2\sqrt{4-3f^3}} \quad \text{avec} \quad f = \frac{F_r}{cE_r}$$

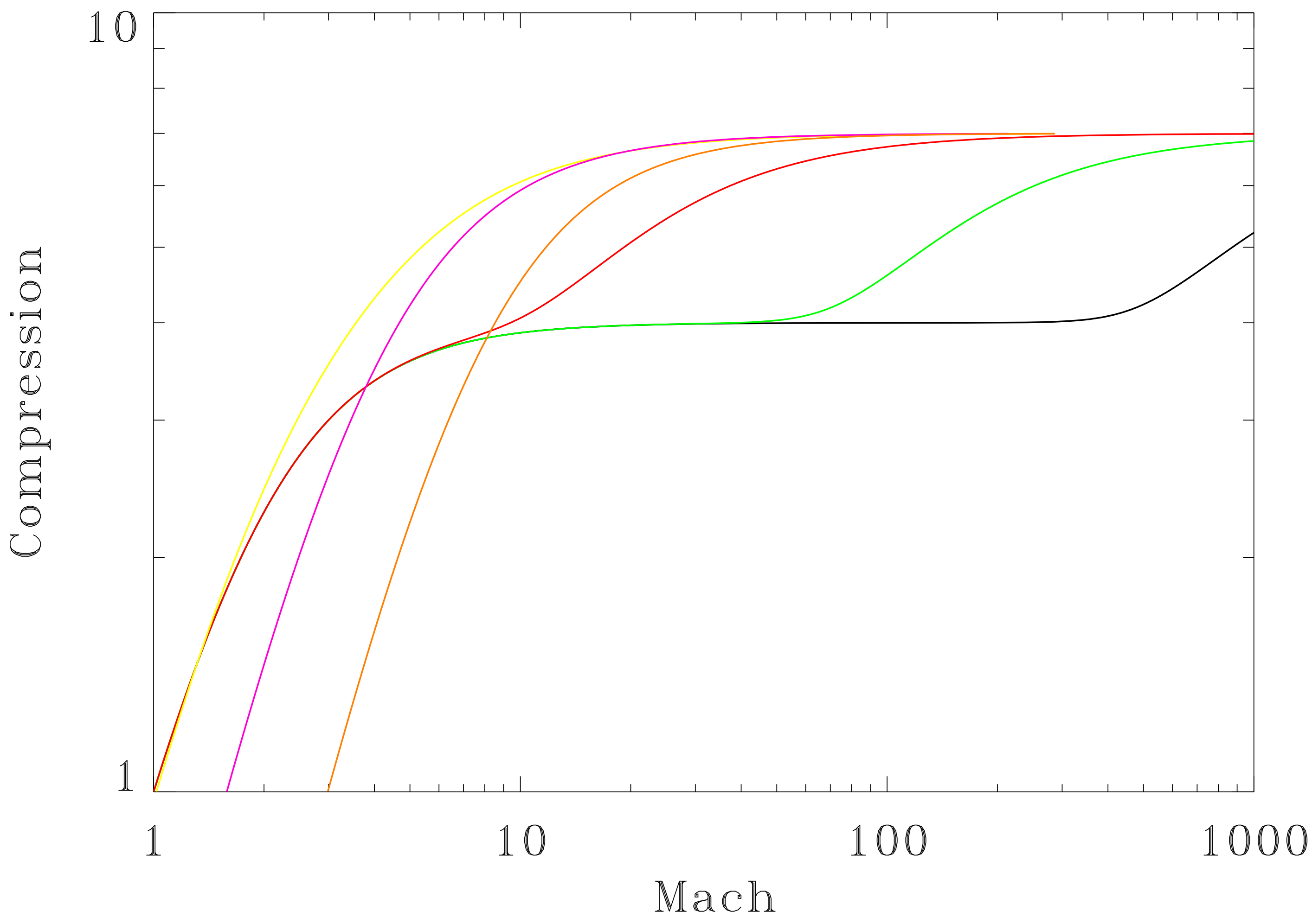
- Assez peu coûteux
- Permet de rendre compte des anisotropies du rayonnement

Hydrodynamique Radiative

Etude des effets dynamiques du rayonnement

$$
\begin{aligned}
\partial_t \rho + \quad & \nabla.[\rho u] & = \quad & 0 \\
\partial_t \rho u + \quad & \nabla.[\rho u \otimes u + P\mathbf{I}] & = \quad & \frac{\sigma}{c} F_r + F \\
\partial_t E + \quad & \nabla.[u(E+P)] & = \quad & -\sigma c(a_r T^4 - E_r) + (\frac{\sigma}{c} F_r + F).u \\
\partial_t E_r + \nabla.[E_r u] + \nabla.F_r + \mathbf{P}_r : \nabla u & & = \quad & \sigma c(a_r T^4 - E_r) \\
\partial_t F_r + \nabla.[F_r u] + c^2 \nabla.\mathbf{P}_r + (F_r.\nabla) u & & = \quad & -\sigma c F_r
\end{aligned}
$$

Compression d'un choc radiatif



de la raideur du rayonnement

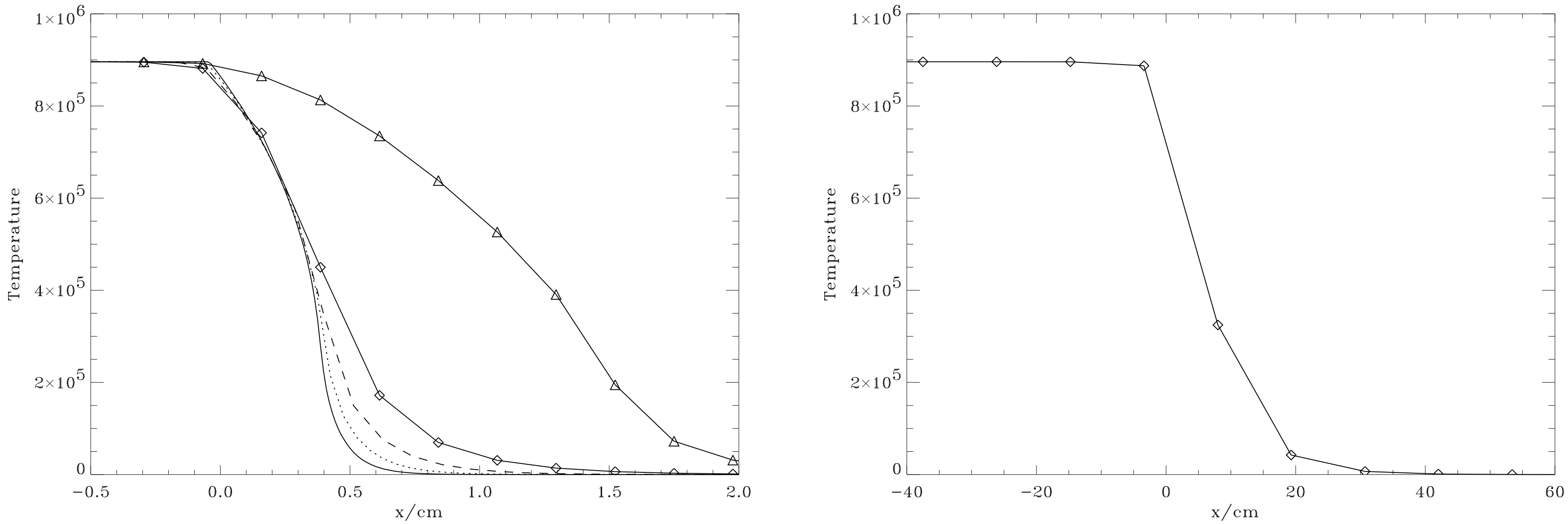
$$\epsilon = \frac{1}{\sigma l} = \frac{\lambda}{l}$$

$$\partial_t E_r + \partial_x F_r = \frac{(aT_m^4 - E_r)}{\epsilon^2}$$

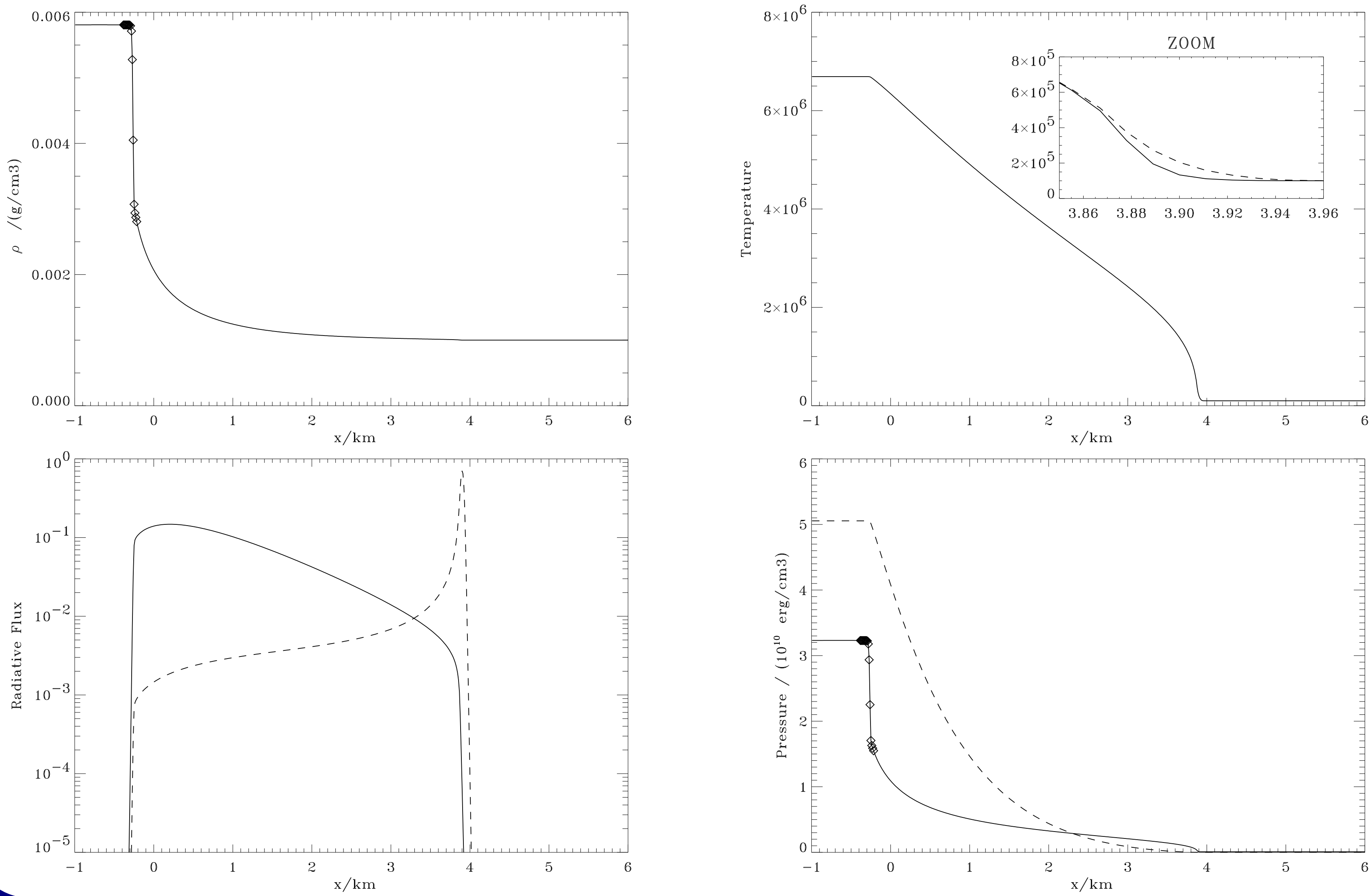
$$\partial_t F_r + \frac{1}{\epsilon^2}\partial_x \chi E_r = -\frac{1}{\epsilon^2} F_r$$

$$\partial_t F_r + \partial_x \chi E_r = -\frac{1}{\epsilon^2}(F + (1 - \epsilon^2)\partial_x \chi E_r)$$

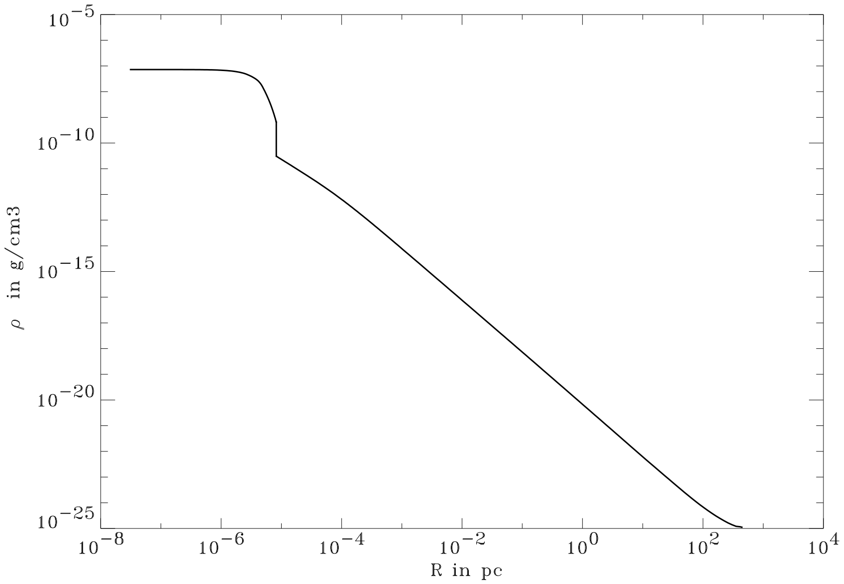
Précurseur thermique d'un choc radiatif

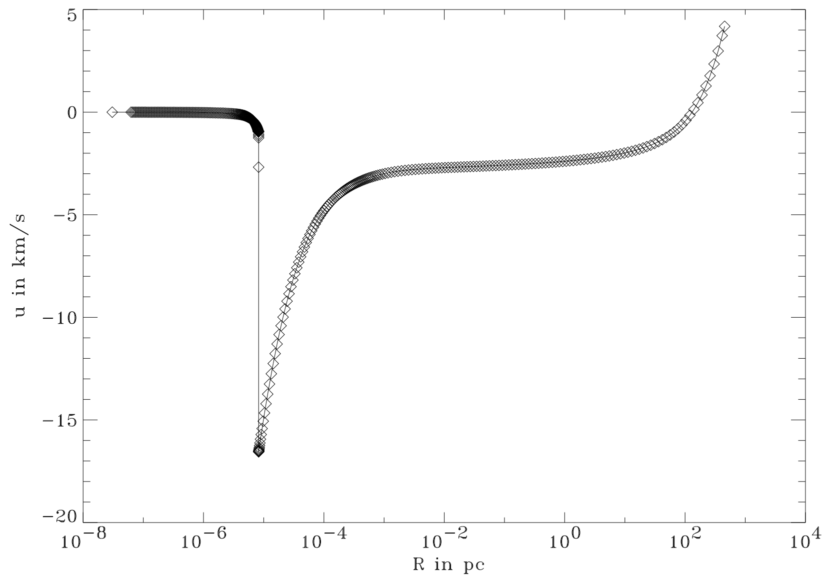


Choc dominé par la pression radiative

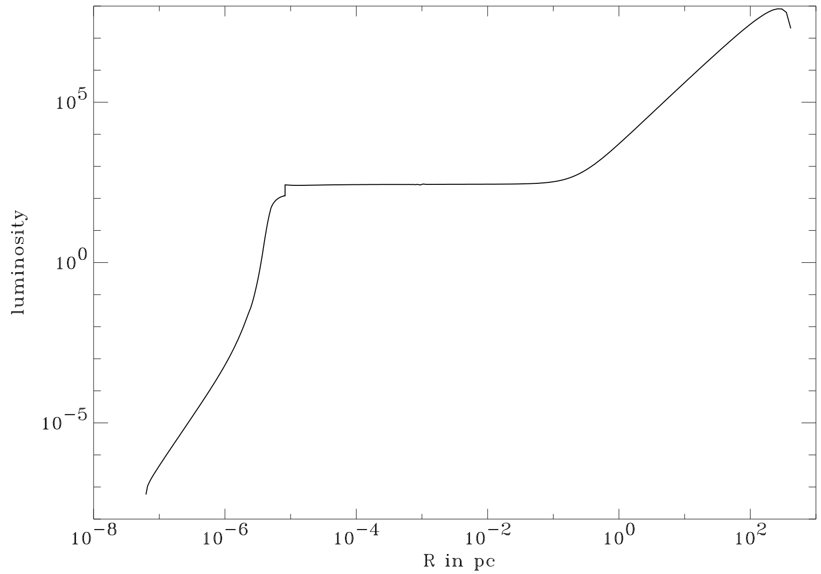


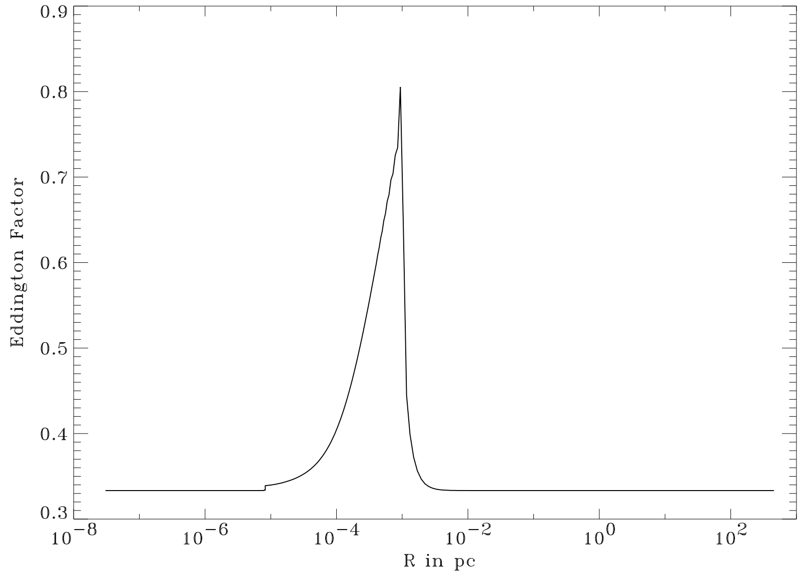
Profil de vitesse et de densité

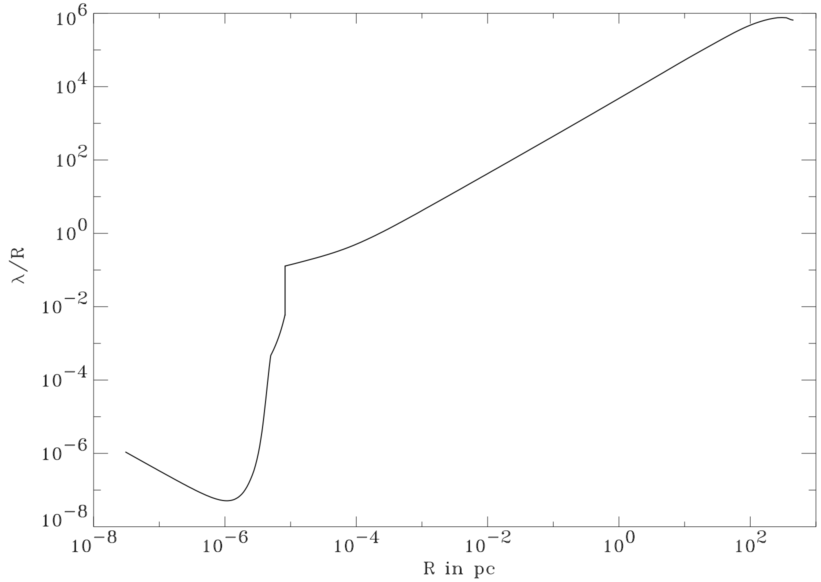


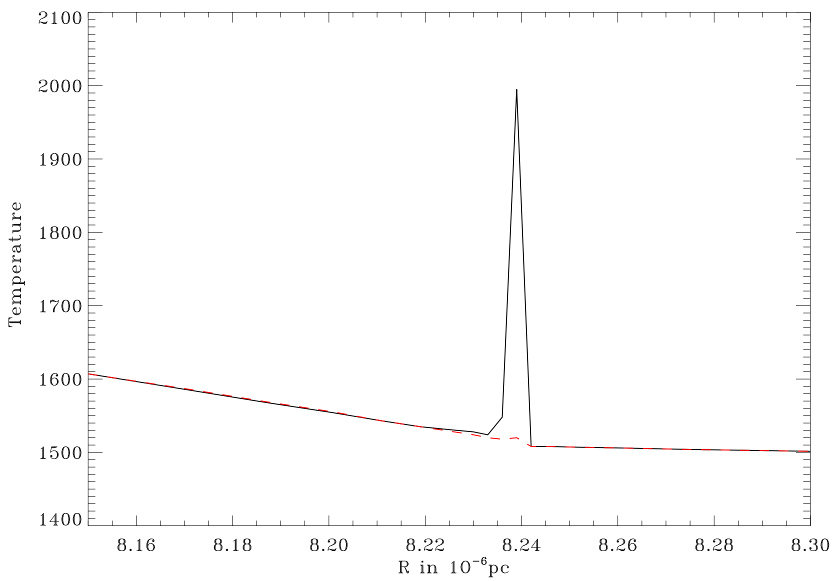


Luminosité et facteur d'Eddington

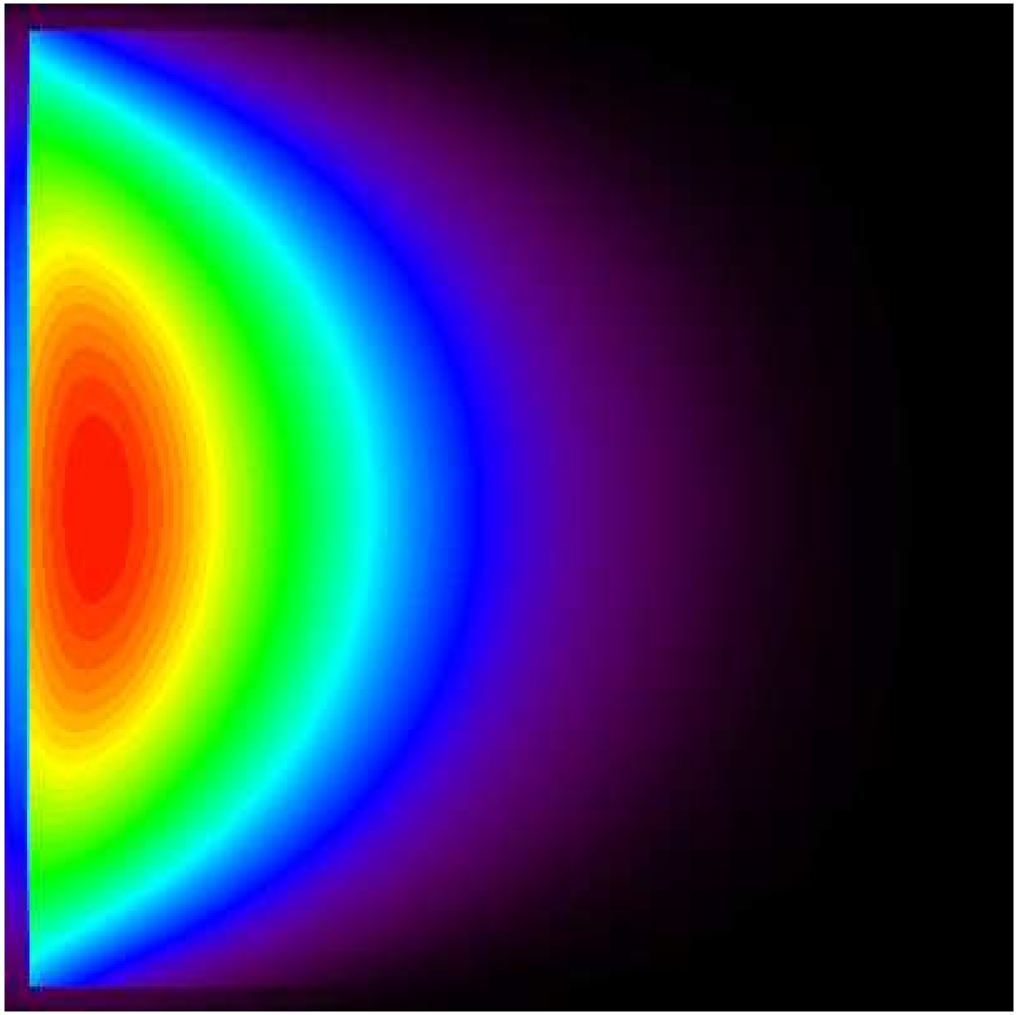




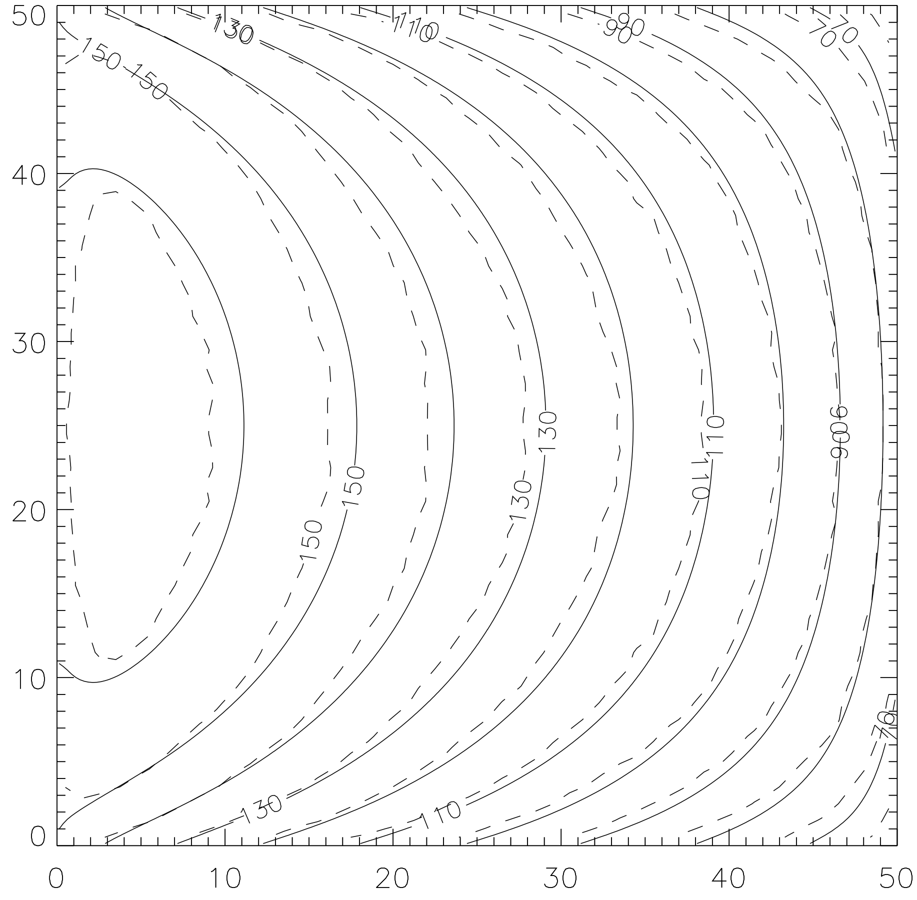

10^{6}
10^{4}
10^{2}
10^{0}
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
λ/R
10^{-8}
10^{-6}
10^{-4}
10^{-2}
10^{0}
10^{2}
R in pc


2100
2000
1900
1800
1700
1600
1500
1400
Temperature
8.16
8.18
8.20
8.22
8.24
8.26
8.28
8.30
R in 10^{-6}pc

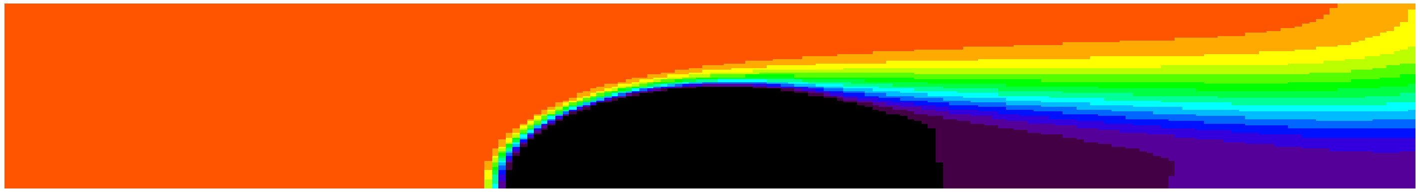
Méthode aux moments vs. Monte-Carlo



Méthode aux moments vs. Monte-Carlo



Ombres et Lumière



Les Personnes

Physiciens	Mathématiciens	Informaticiens
E. Audit	P. Charrier	P. Huynh
J.-P. Chièze	B. Dubroca	
M. Gonzalez		

Domaines d'Application

- ▶ Transfert radiatif en milieu hétérogène et turbulent
- ▶ Astrophysique de laboratoire
- ▶ Disques proto-planétaires