

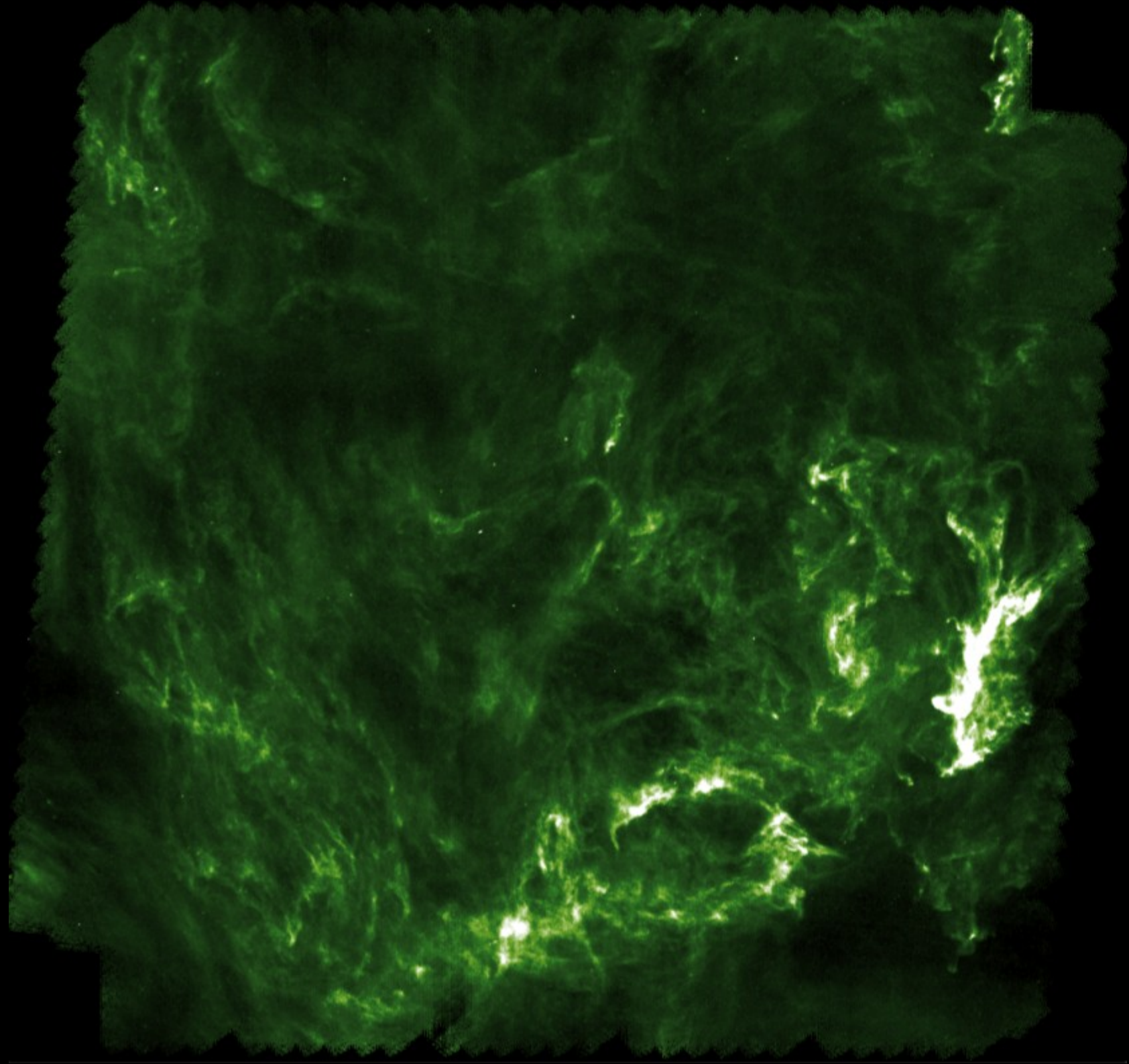
Réunion MIS – jeudi 7 avril 2011

Turbulence biphaseique du milieu interstellaire diffus

Eléonore Saury

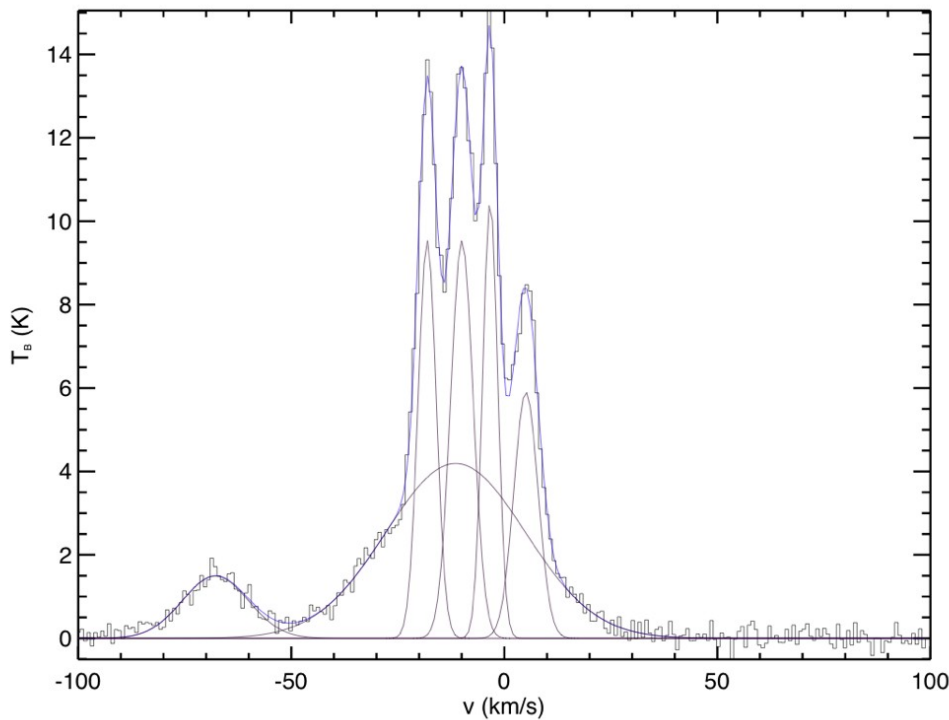
sous la direction de
Marc-Antoine Miville-Deschênes

en collaboration avec Patrick Hennebelle,
Edouard Audit et Sébastien Fromang



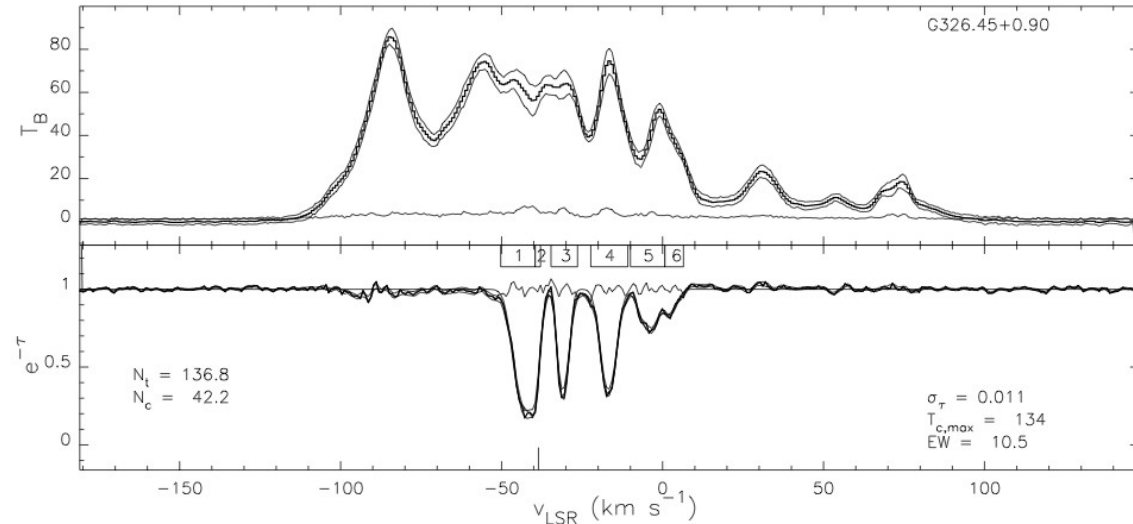
Les observables du HI : profils à 21 cm

Hautes latitudes : Polaris



mamd et al, in prep

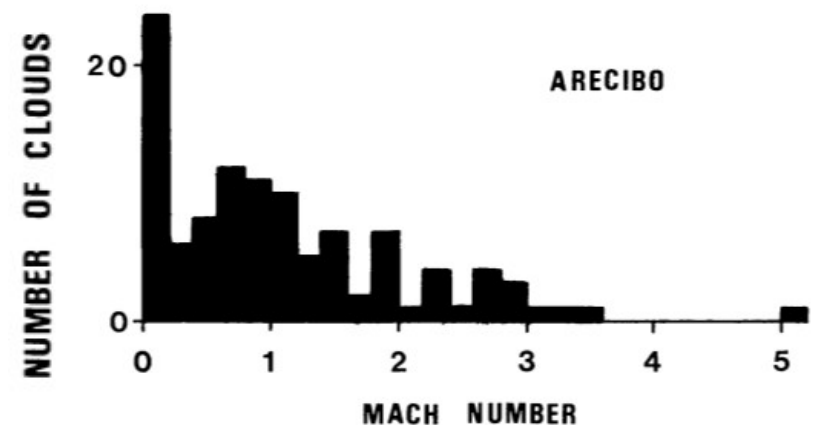
Plan galactique



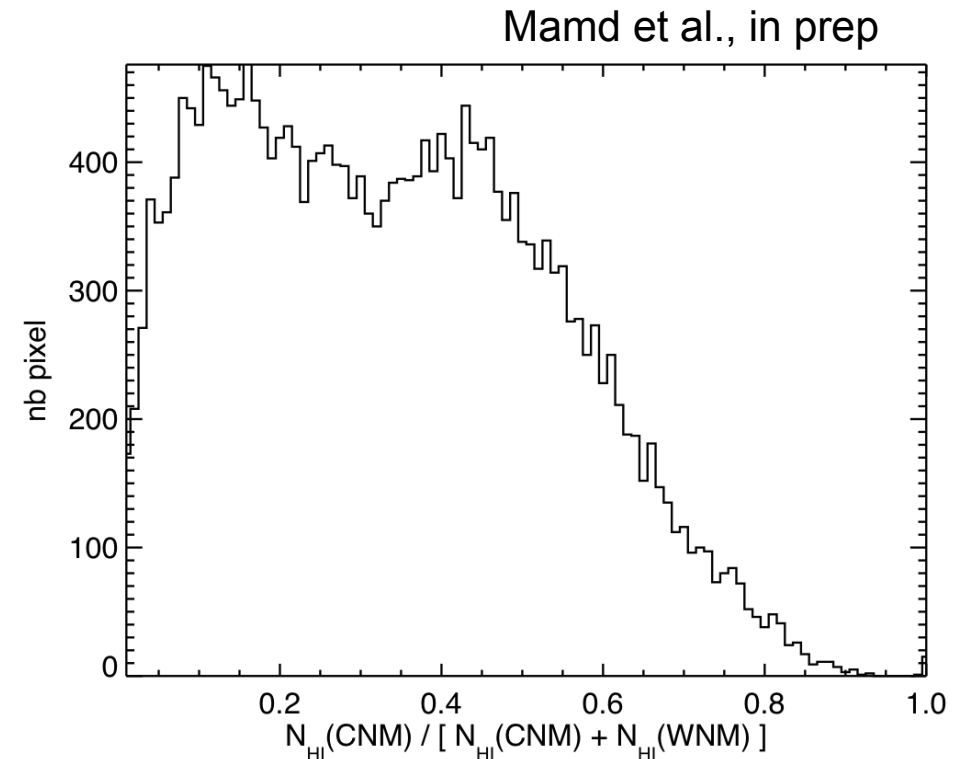
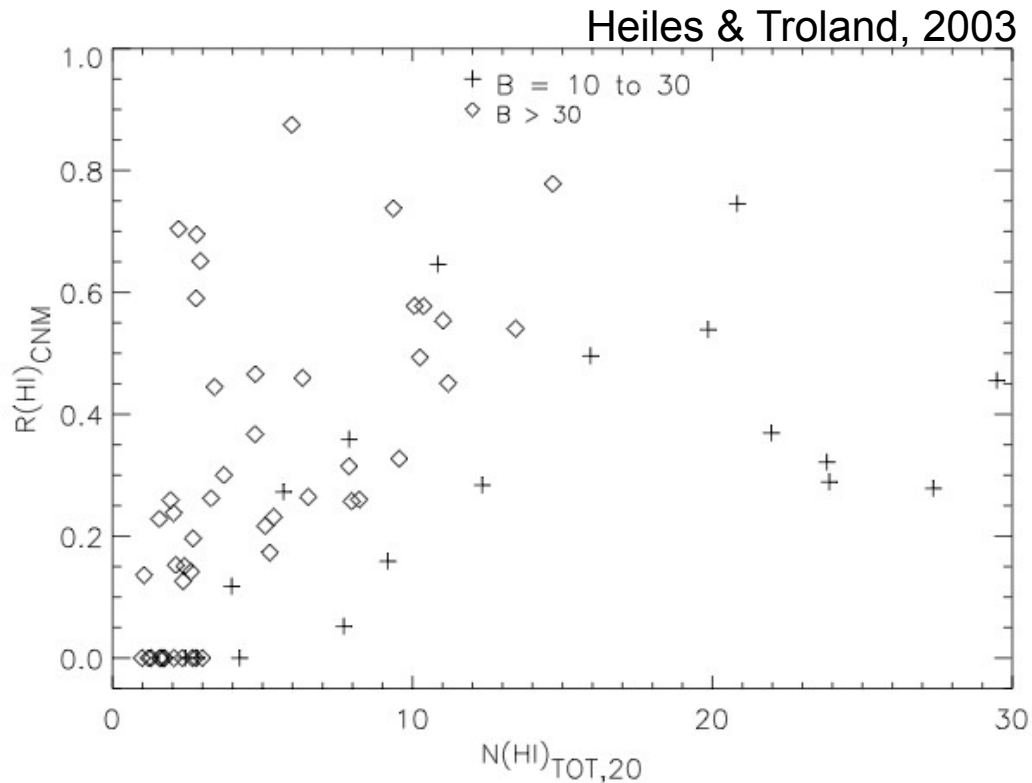
Dickey et al, 2007

Comparaison des observations en émission et en absorption à 21 cm montre clairement la présence de gaz froid ($T \sim 100$ K, optiquement épais) et chaud ($T \sim 8000$ K, optiquement mince).

Elargissement thermique $\sim$ Elargissement turbulent (Mach ~ 1)



Les observables du HI : fraction de froid



- Heiles & Troland (2003) : 66 lignes de visée à $|b| > 10$ observées en émission et en absorption. **40% du HI dans le CNM** en moyenne
- Confirmation par la décomposition en Gaussienne d'un de nos champs (SPIDER)
- **~30% du HI est à des températures thermiquement instables (500-5000 K)**
- **Parce qu'ils sont en équilibre de pression, le WNM occupe 100 fois plus de volume sur la ligne de visée que le CNM.**

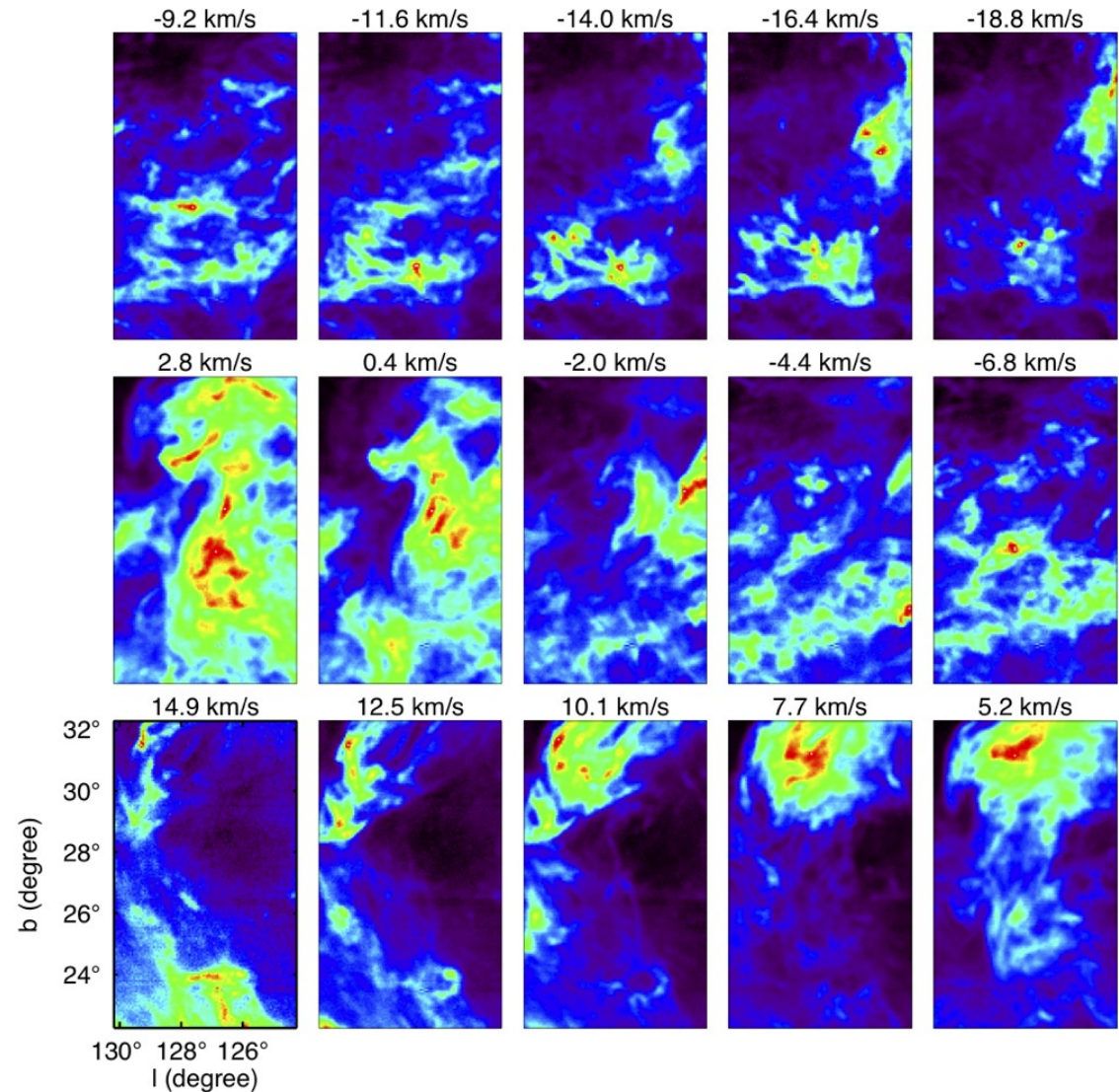
Les observables du HI : les cartes par canaux

Polaris Flare

Observations à 21 cm

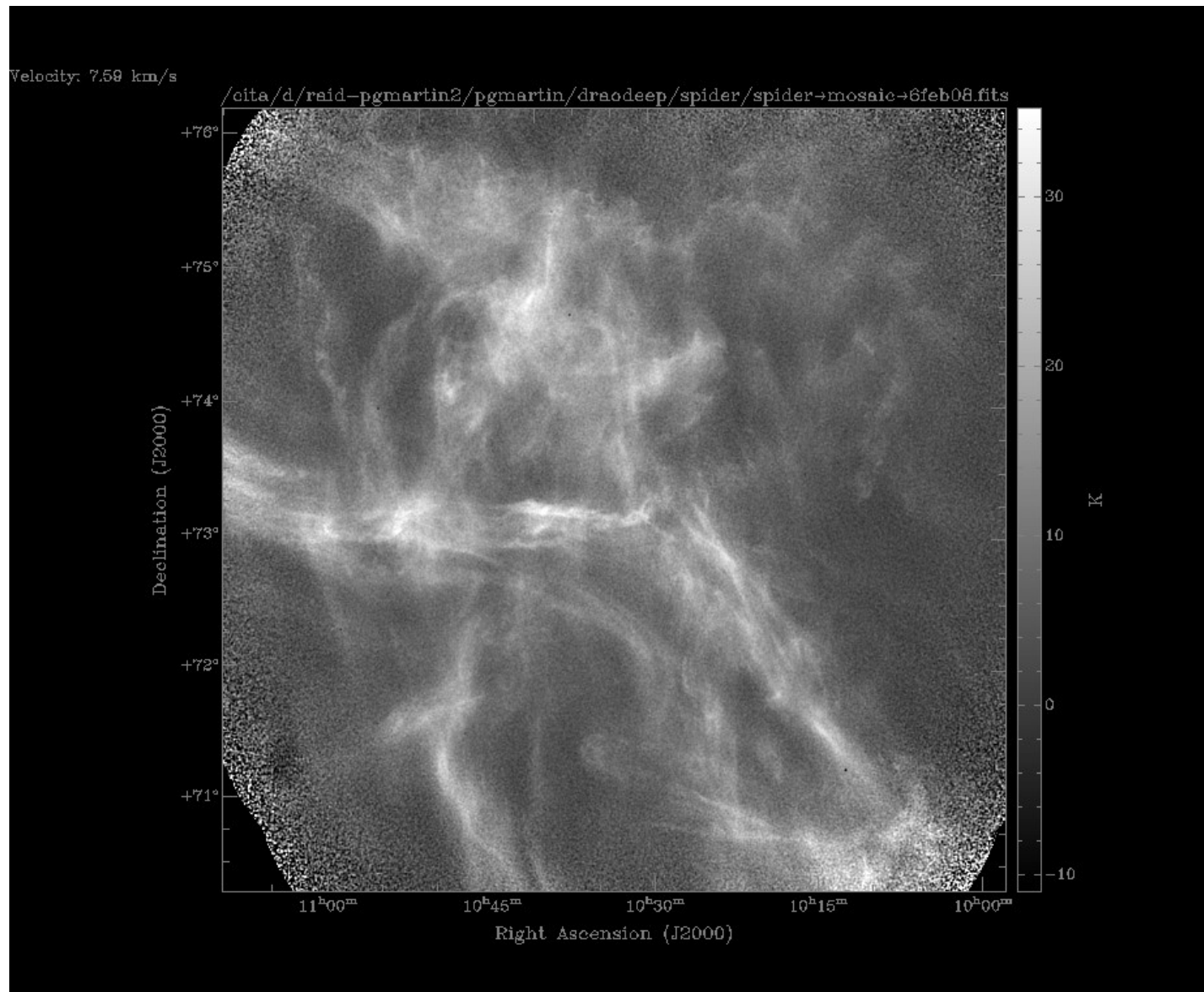
Green Bank Telescope
(GBT)

Resolution 9 arcmin =
0.25pc @ 100pc



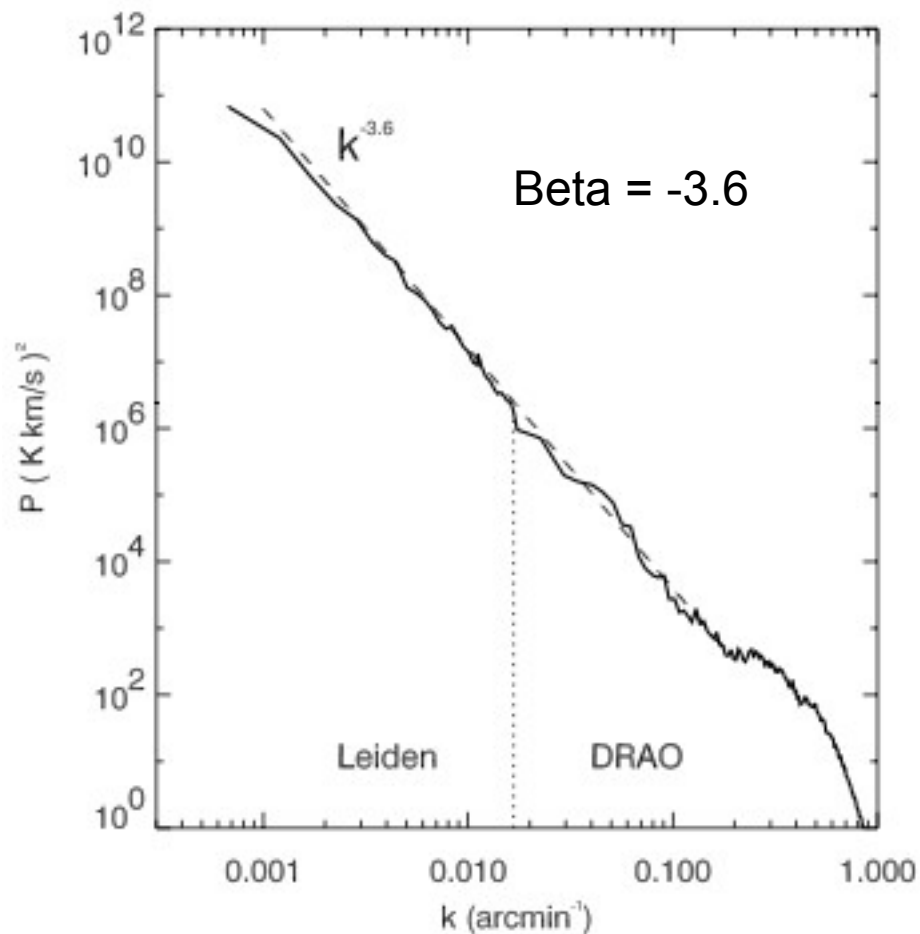
Canal en vitesse du champ spider

Observation DRAO : résolution 1 arcmin = 0.03pc @ 100pc



Les observables du HI : profils à 21 cm

HI diffus à haute latitude

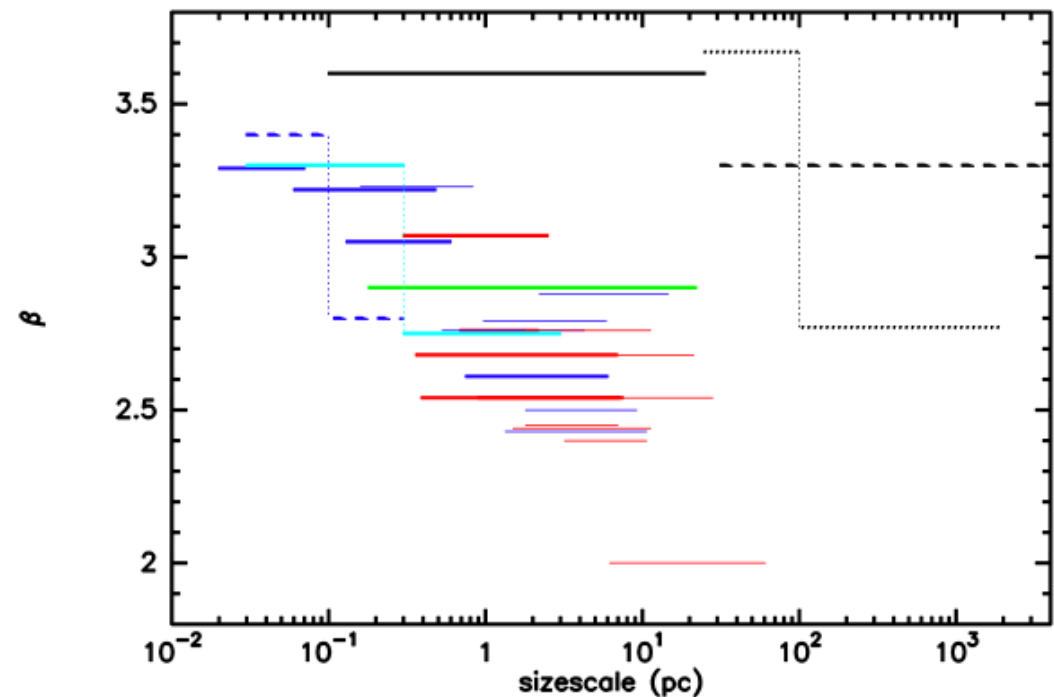


Mamd et al, 2003

Le HI diffus semble avoir la structure prévue par la turbulence (beta = -11/3)

Ce n'est pas vrai des nuages moléculaires (beta ~ -2.9)

La transition WNM-CNM modifie-t-elle la structure ?



Falgarone, 2007

Ce que l'on cherche à reproduire

- **Milieu biphasique**

- Fraction de froid ~ 0.4
- Structures froides doivent occuper une faible fraction du volume

- **Turbulence sonique ou sub-sonique**

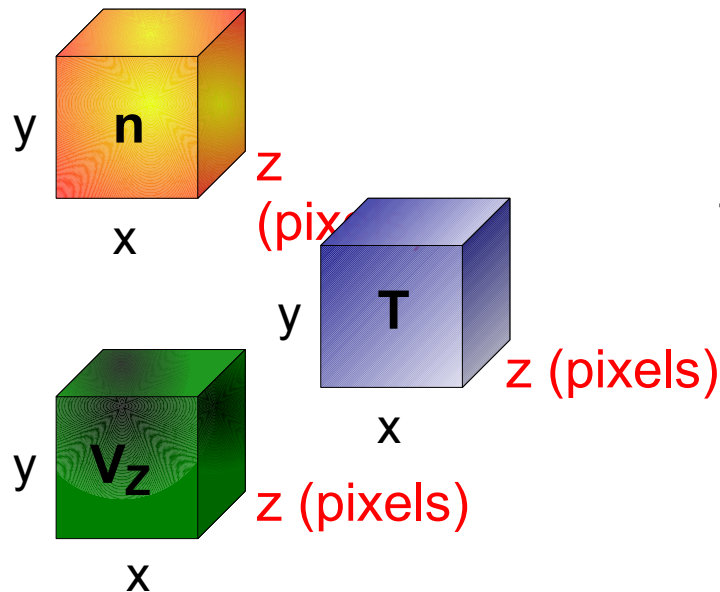
- L'élargissement turbulent est du même ordre que l'élargissement thermique (Mach = 1), vrai pour le CNM et le WNM
- Spectres à 21 cm relativement lisses

- **Autres avenues à explorer**

- Statistique des champs de vitesse et de largeur de raie
- Histogramme de densité de colonne

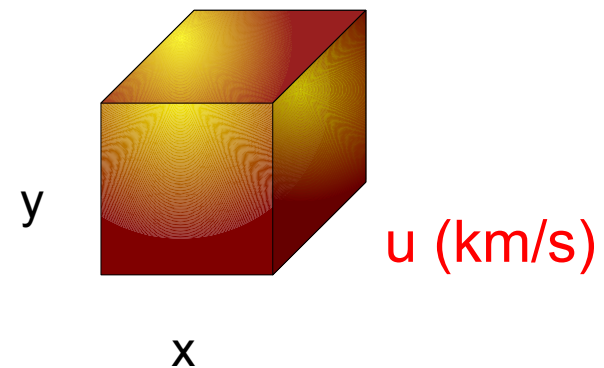
Température de brillance – spectres artificiels

Cubes de données issu
des simulations



3 Variables à 3 dimensions:
 $n(x,y,z)$, $T(x,y,z)$, $v_z(x,y,z)$
=> **9 dimensions**

Cube d'observations artificielles
de la raie à 21 cm



En profondeur en (x,y) : spectre d'émission
sur la ligne de visée (x,y)
=> **3 dimensions** : perte d'information

Création de la
température de
brillance



Température de brillance

$$T_B(x, y, u) = \sum_{i=1}^n T_i(x, y, z) [1 - \exp(-\tau_i(x, y, z, u))] \times \exp\left(-\sum_{j=1}^{i-1} \tau_j(x, y, z, u)\right)$$

Température de brillance

Champ de densité 3D

Champ de vitesse 3D

Canaux en
vitesse

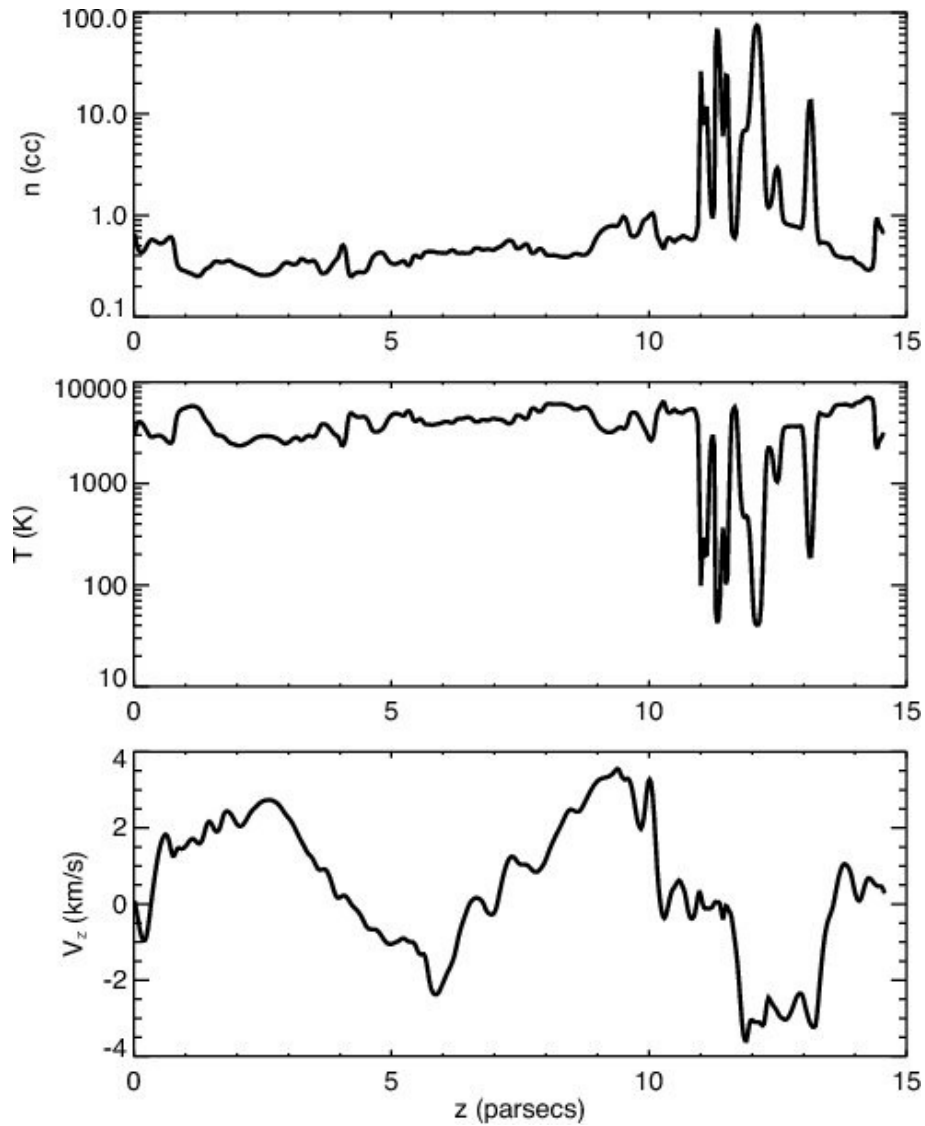
$$\tau(x, y, z, u) = \frac{n(x, y, z) dz}{1.823 \times 10^{18} \sqrt{2\pi} T(x, y, z)} \times \exp\left(-\frac{(v(x, y, z) - u)^2}{2\Delta^2}\right)$$

Opacité

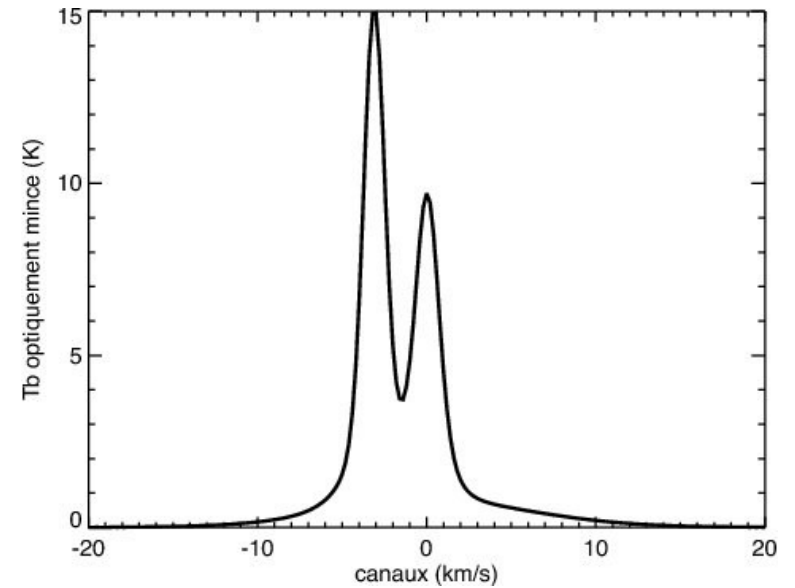
Champ de température 3D

$\Delta^2 = kT(x, y, z)/m_H$: largeur thermique
de la raie à 21 cm

Température de brillance



9D



3D

Code Heracles : simulations du MIS

Taille simulation : 128^3

Conditions initiales du **WNM**

uniformes:

- $T = 8000 \text{ K}$
- $n = 1 \text{ cm}^{-3}$
- $v = 0 \text{ m.s}^{-1}$
- Taille boîte = 14.5 pc

Refroidissement :

- raies du carbone CII et de l'oxygène OI
- raie Lyman alpha de l'hydrogène
- recombinaison sur les grains

Chauffage : effet photoélectrique sur les grains

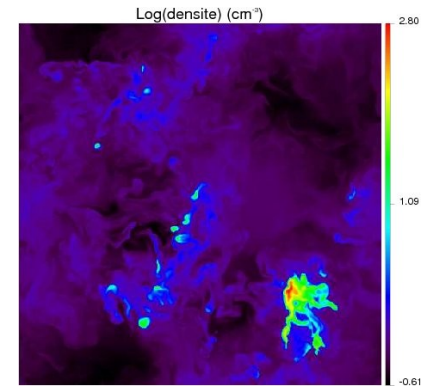
Turbulence entretenue: Injection d'énergie aux grandes échelles

Facteur de projection : 0 = purement compressible, 1 = purement solénoïdal

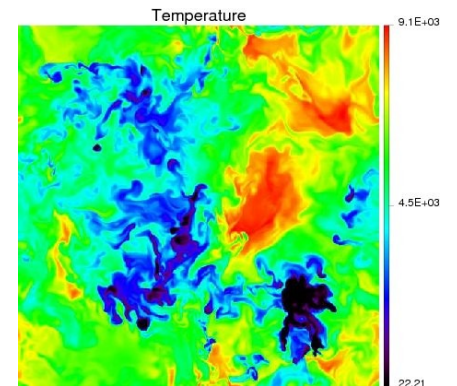
Facteur de projection	0.0	0.1	0.2	0.3
Echelle de vitesse (km/s)	5	7	10	20

➡ 16 simulation tests

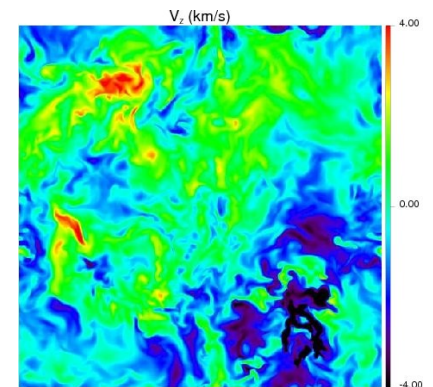
Log(Densité) (cm^{-3})



T (K)



Vitesse en Z (km.s^{-1})



Cartes de densité de colonne

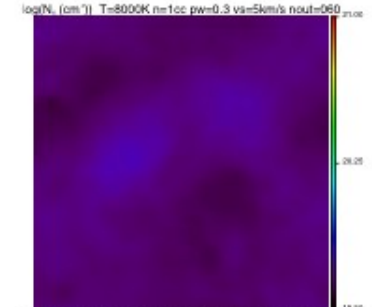
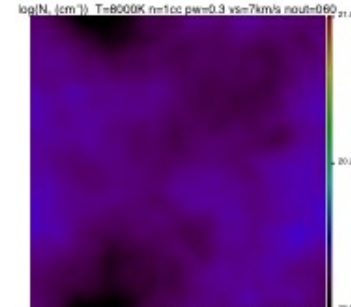
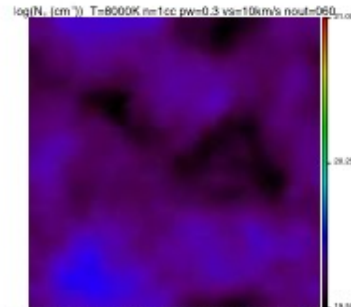
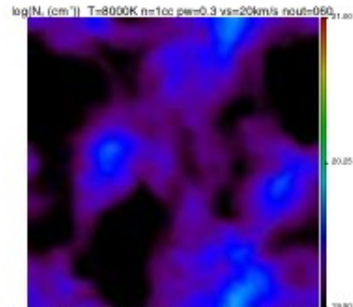
20 km/s

10 km/s

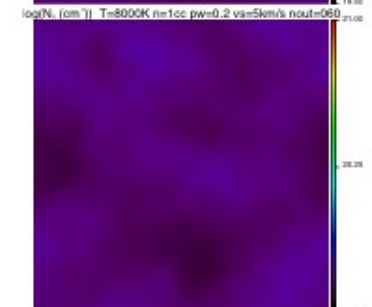
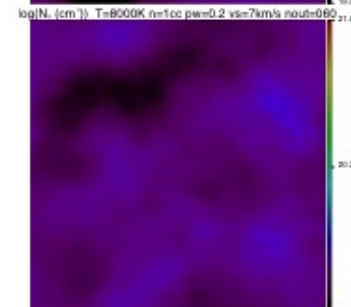
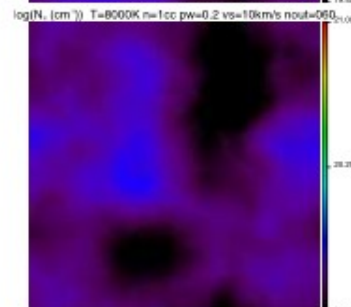
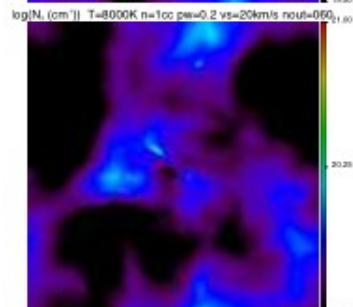
7 km/s

5 km/s

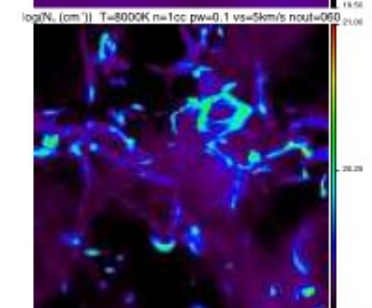
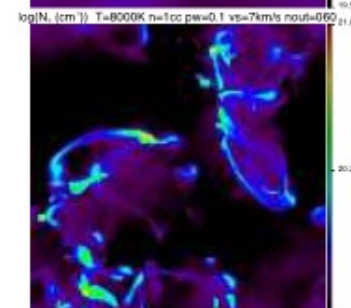
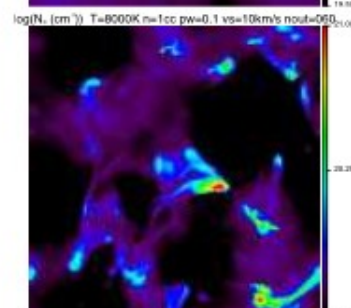
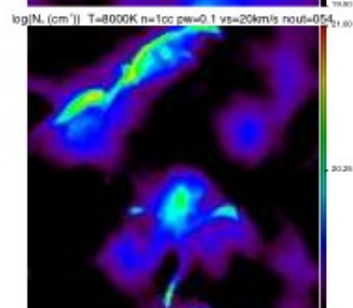
0.3



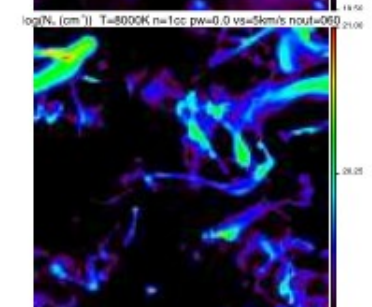
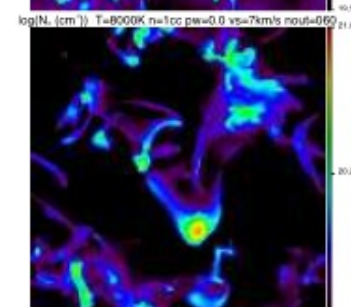
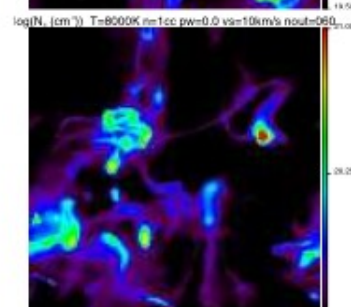
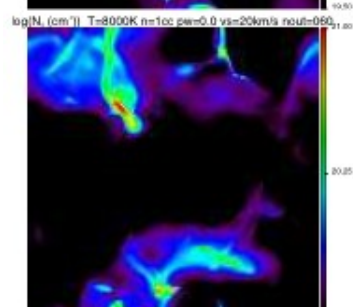
0.2



0.1



0.0



Histogrammes de température

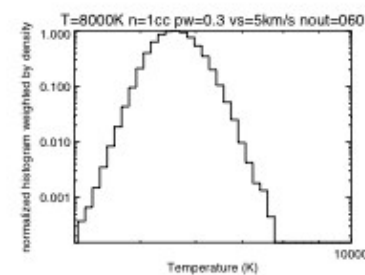
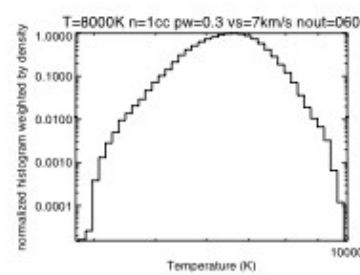
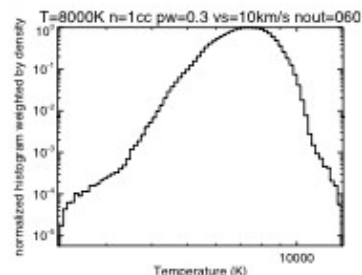
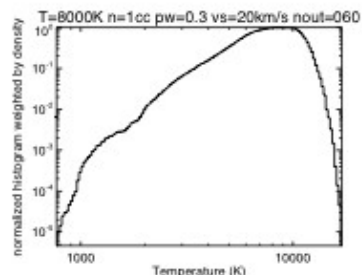
20 km/s

10 km/s

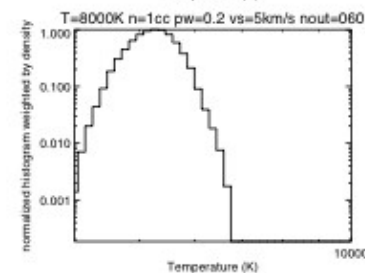
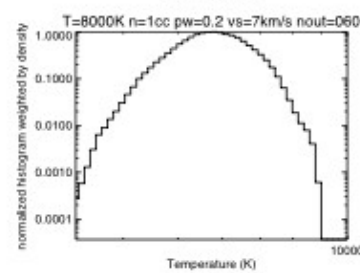
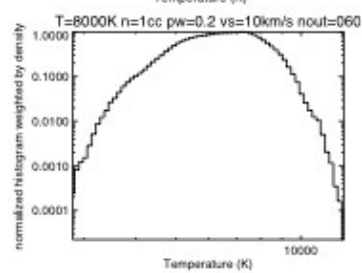
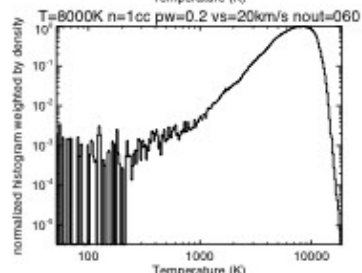
7 km/s

5 km/s

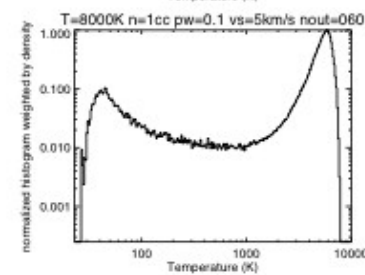
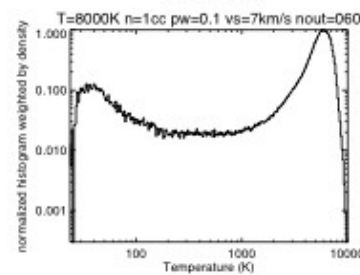
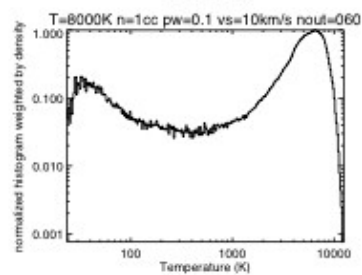
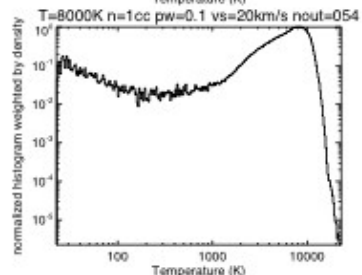
0.3



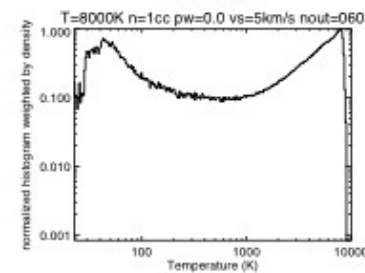
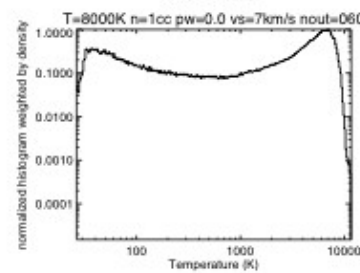
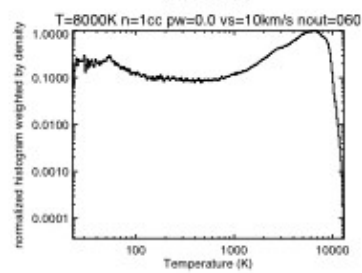
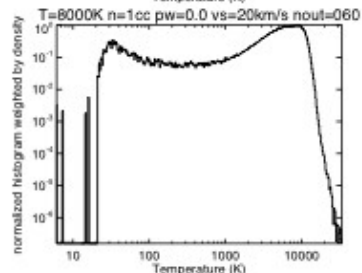
0.2



0.1



0.0



Histogrammes de densité (3D)

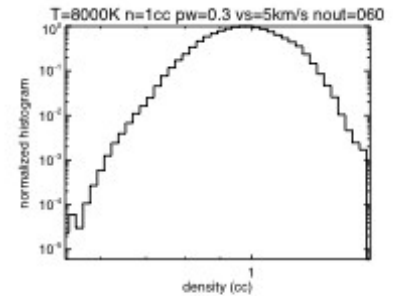
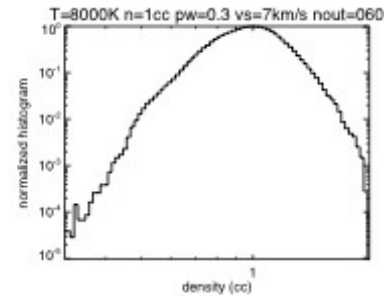
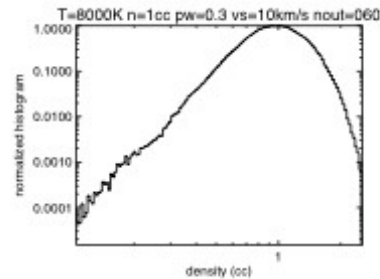
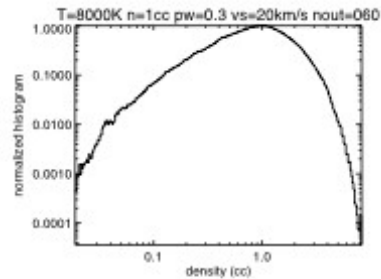
20 km/s

10 km/s

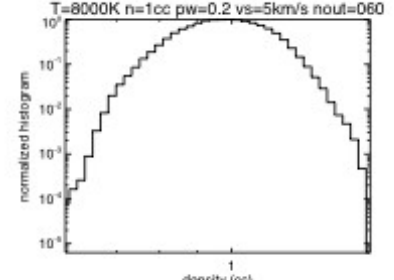
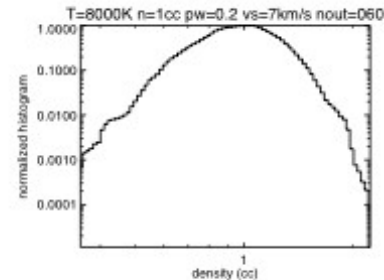
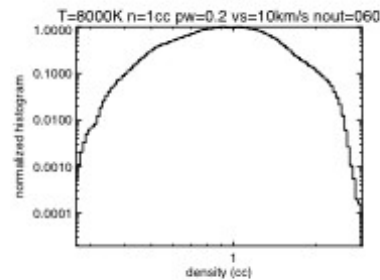
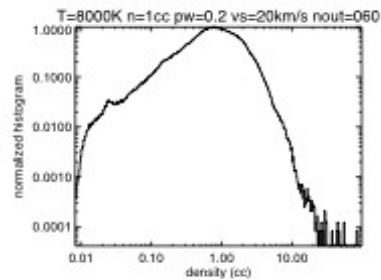
7 km/s

5 km/s

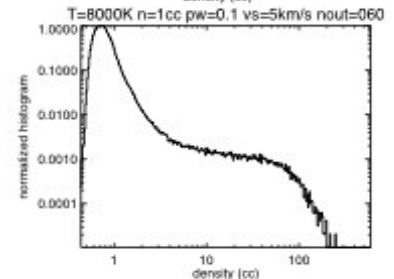
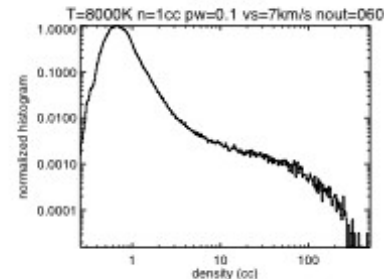
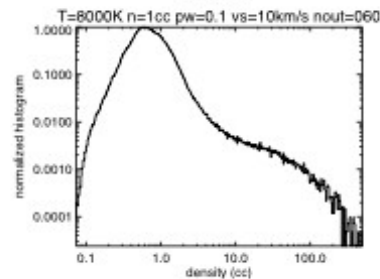
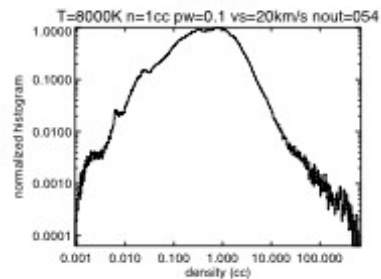
0.3



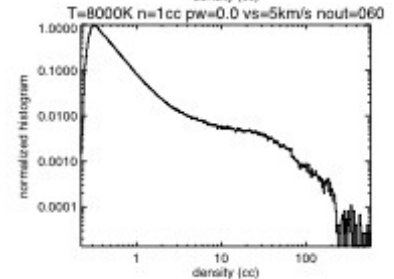
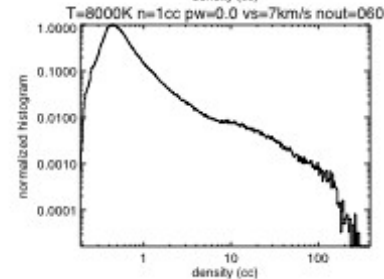
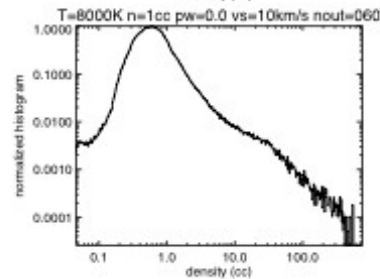
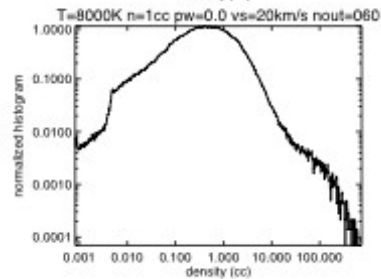
0.2



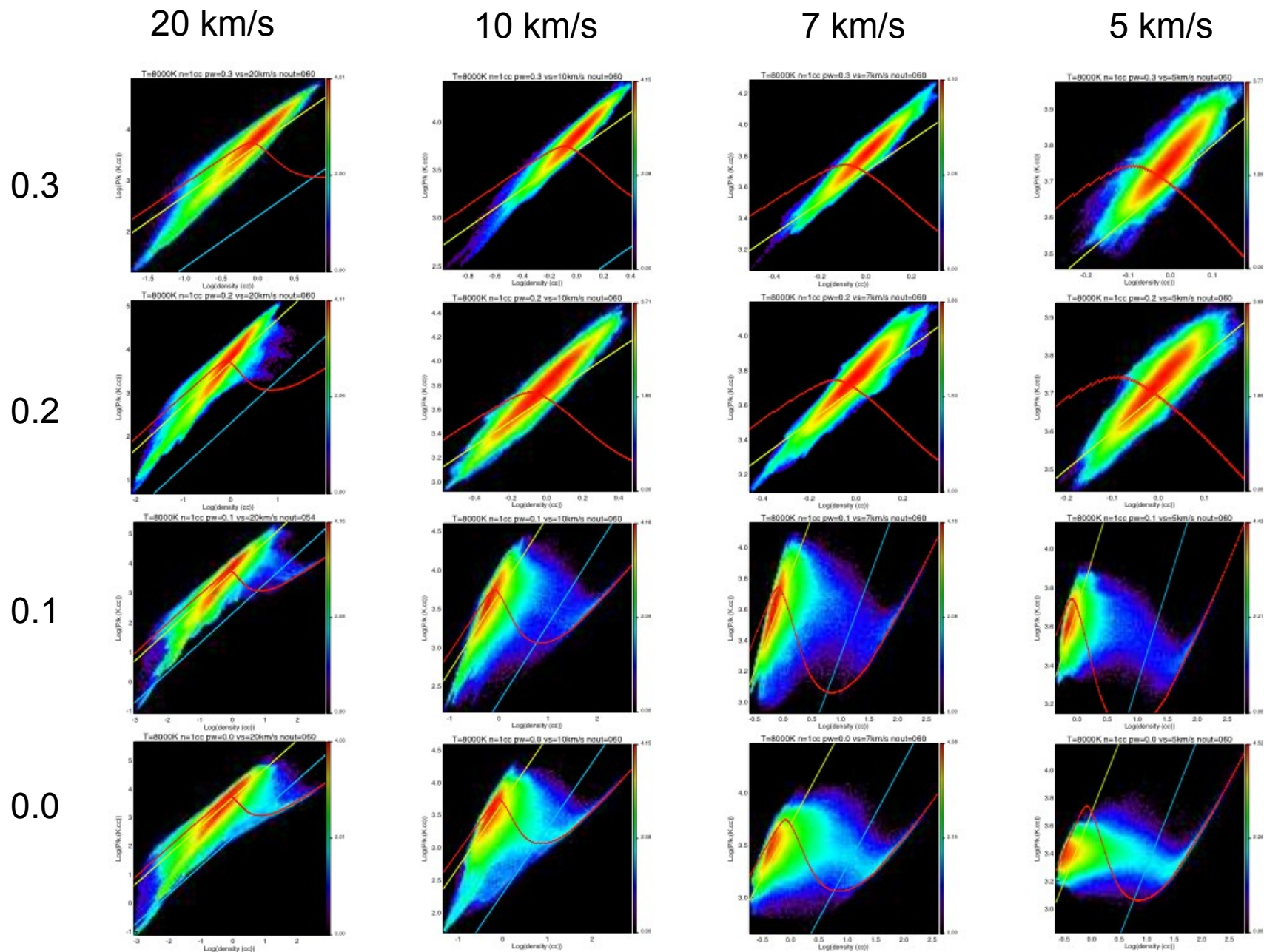
0.1



0.0



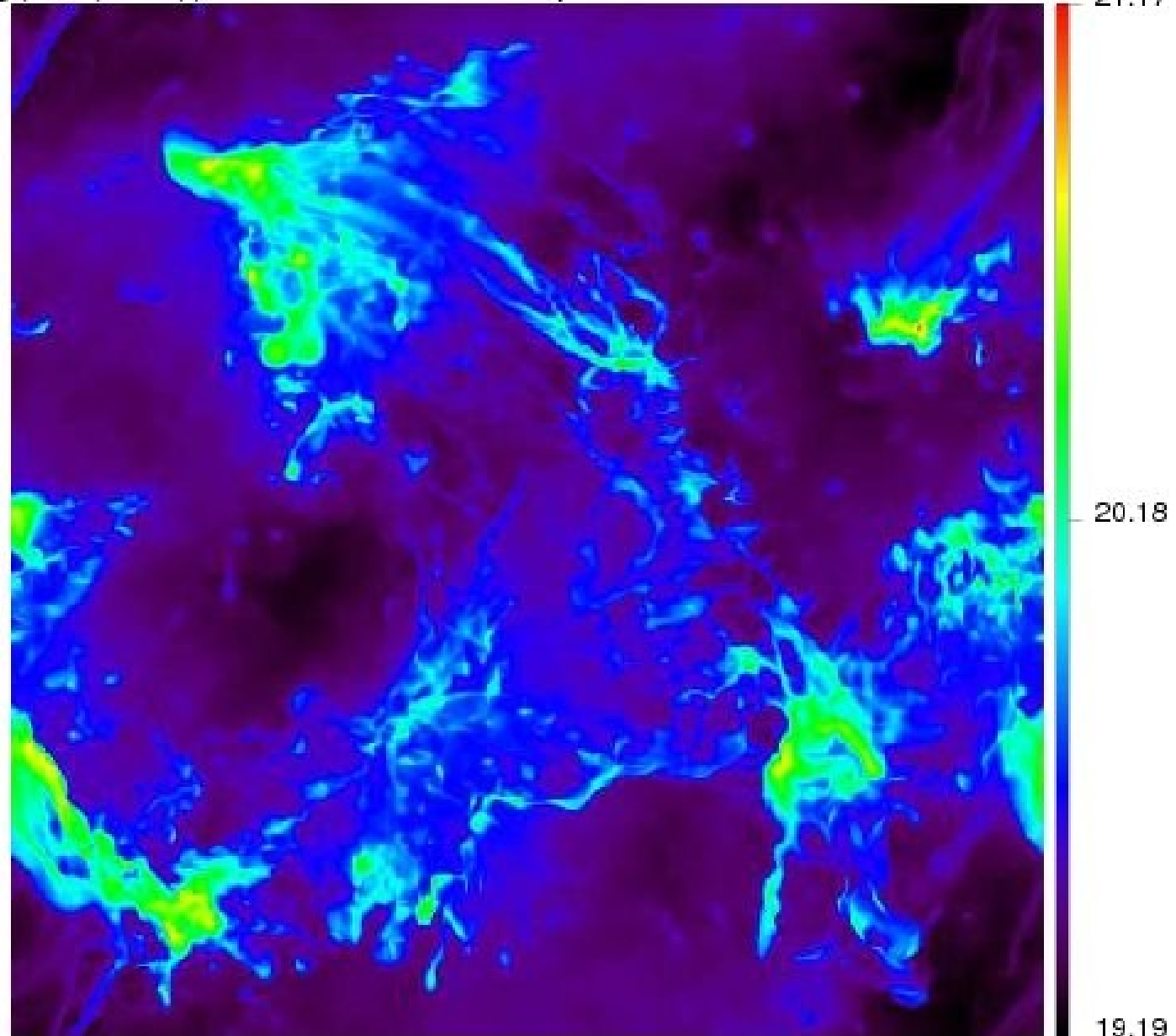
Diagrammes Pression-densité



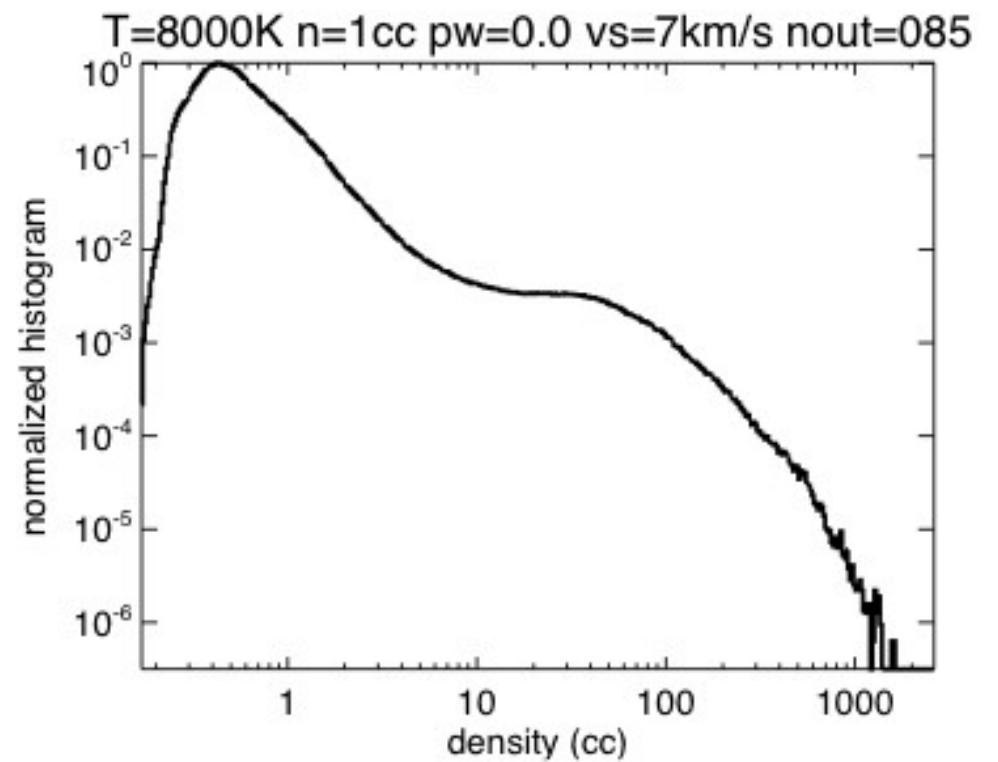
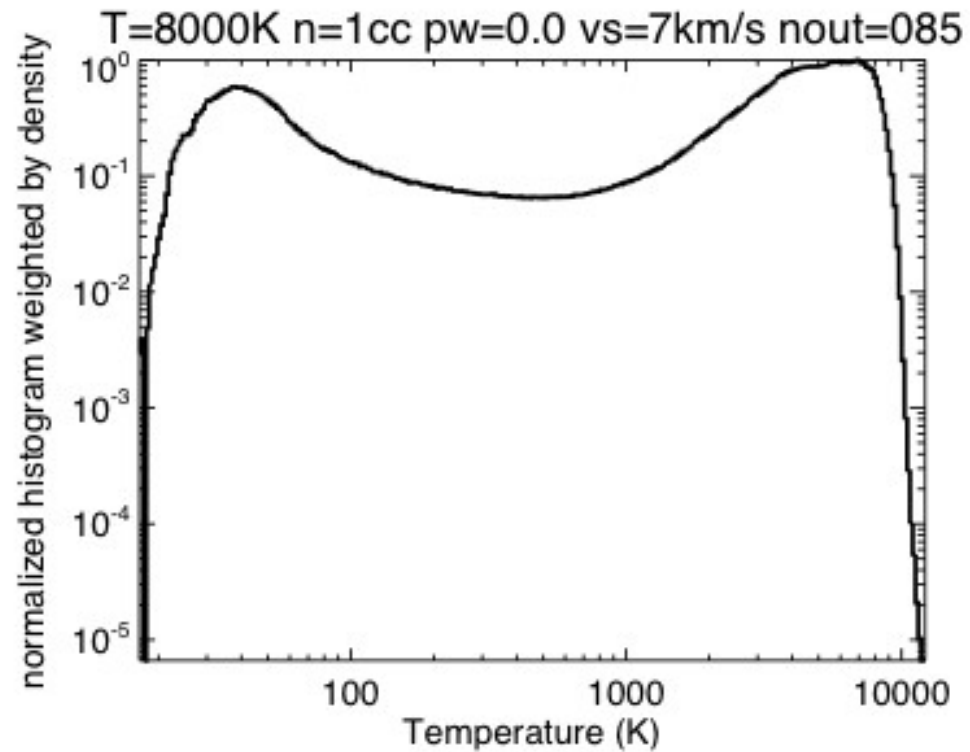
Simulation 512³

$\log(N_H \text{ (cm}^{-2}\text{)})$ $T=8000\text{K}$ $n=1\text{cc}$ $pw=0.0$ $vs=7\text{km/s}$ $nout=085$

Facteur de projection :
purement compressible
Echelle de vitesse :
 $vs = 7\text{km/s}$



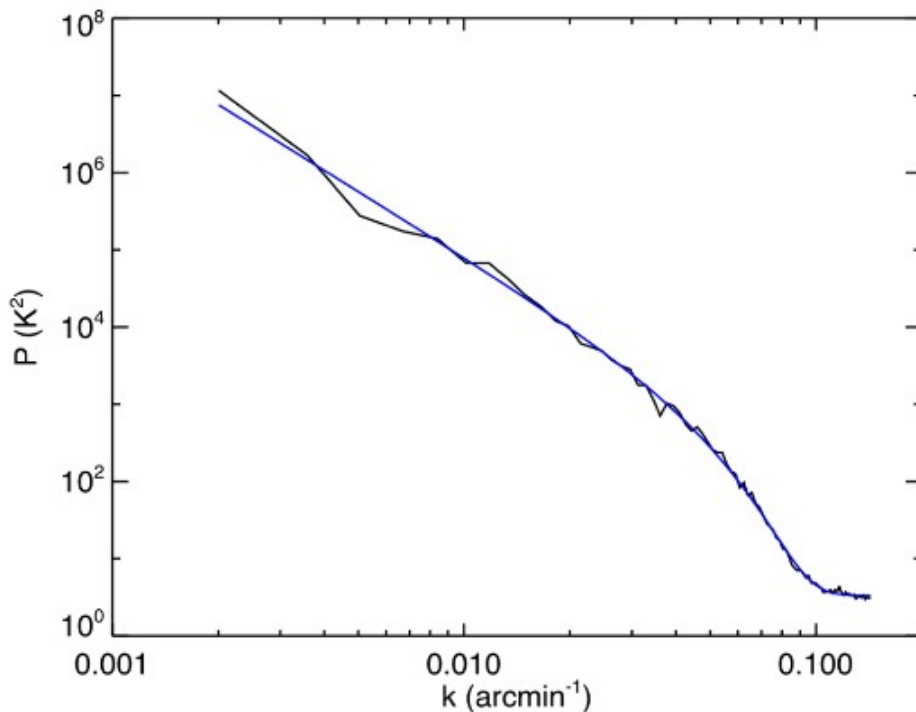
Simulation 512³



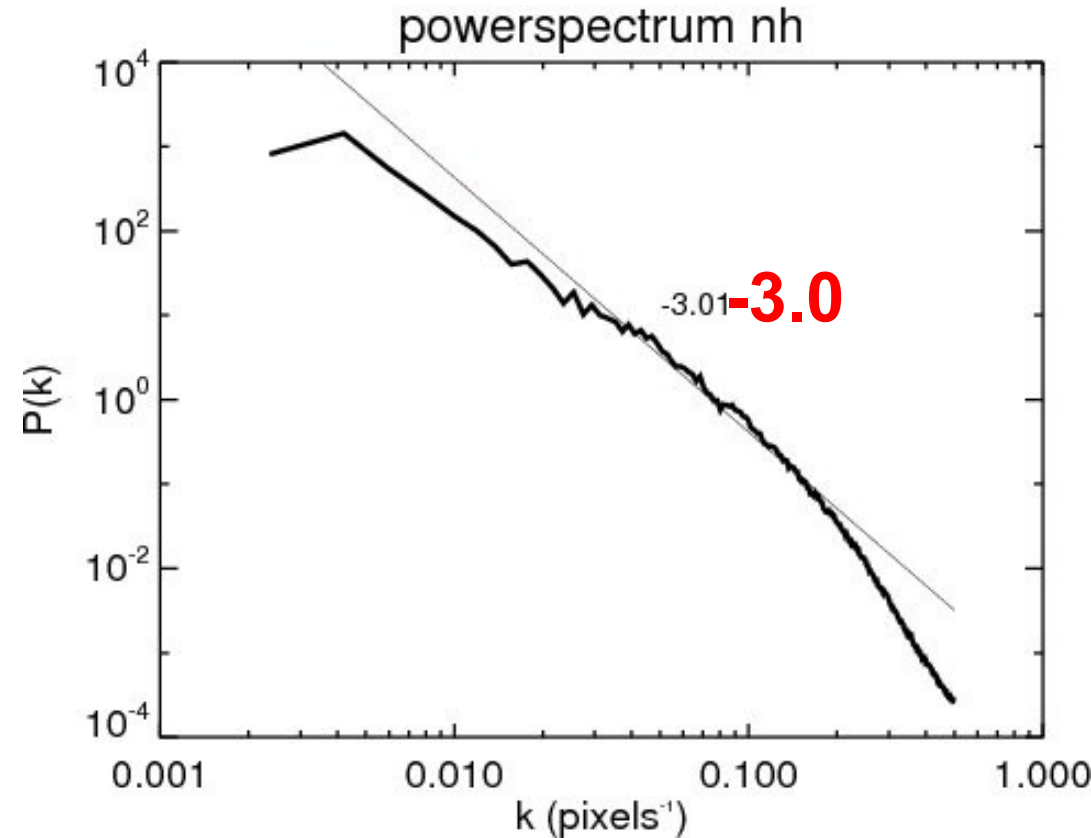
Comparaison – spectres de puissance

Spider

NHI : -2.8 ± 0.3

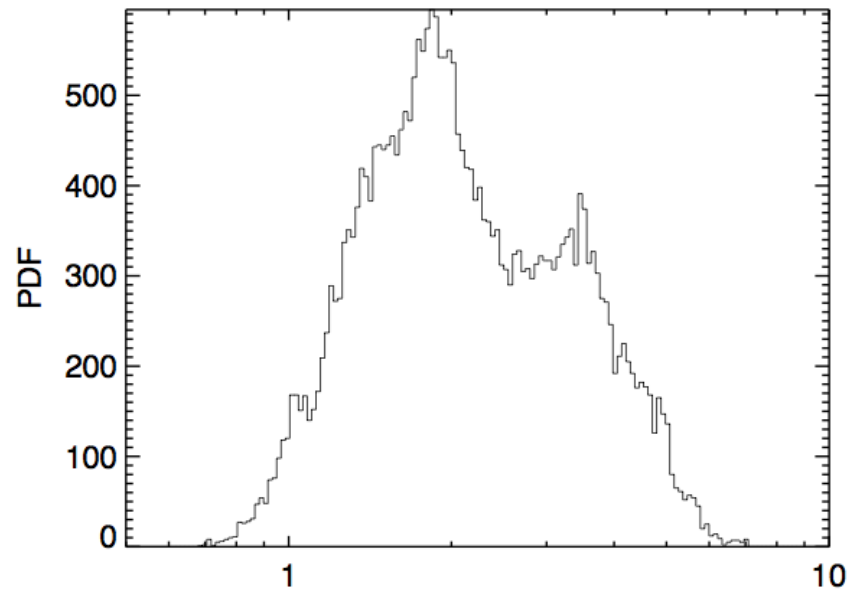


Simulation



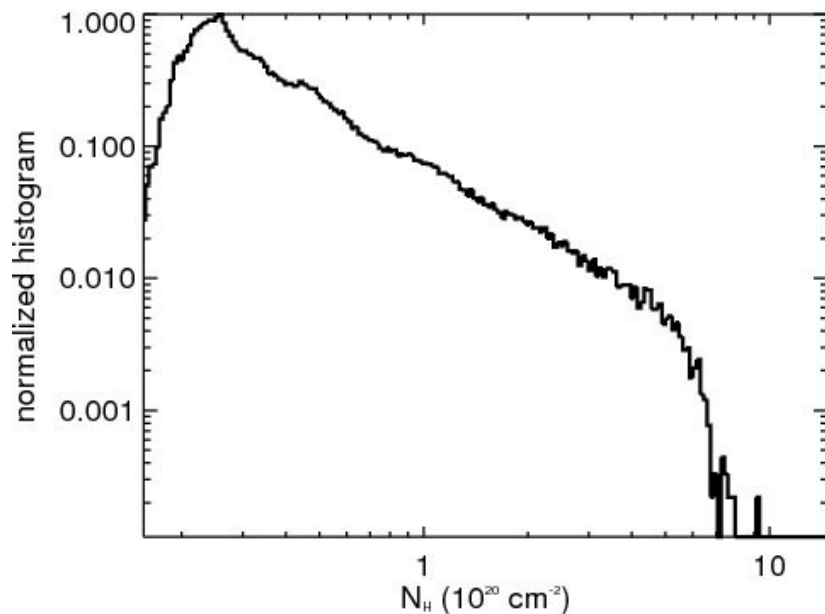
Simulation 512 manque de résolution => zone intertielle tres petite
=> grosse incertitude sur la pente de l'ajustement

Comparaison - Histogrammes de densité de colonne

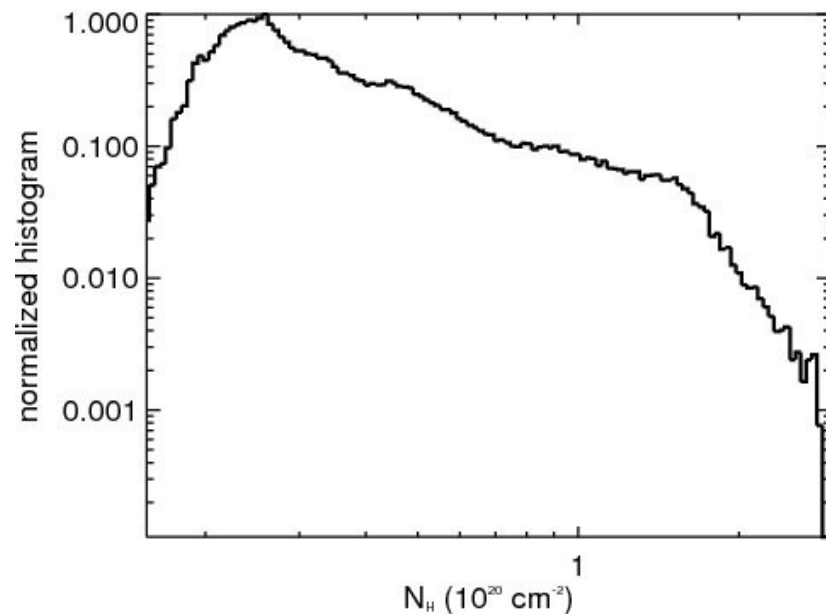


Spider - DRAO

Cas optiquement mince N_H (10^{20} cm^{-2})

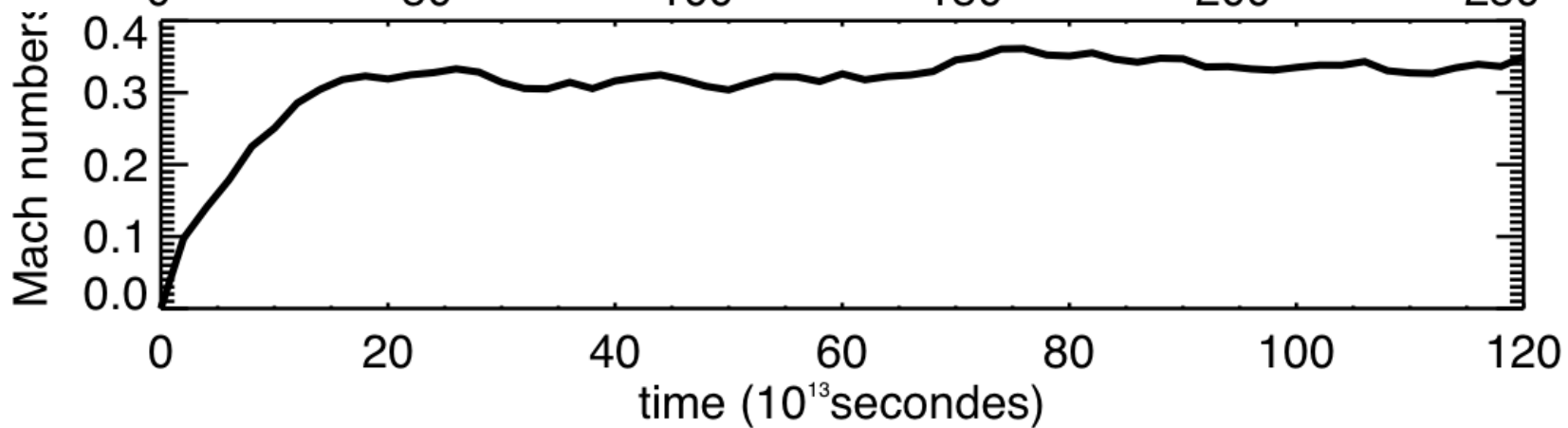
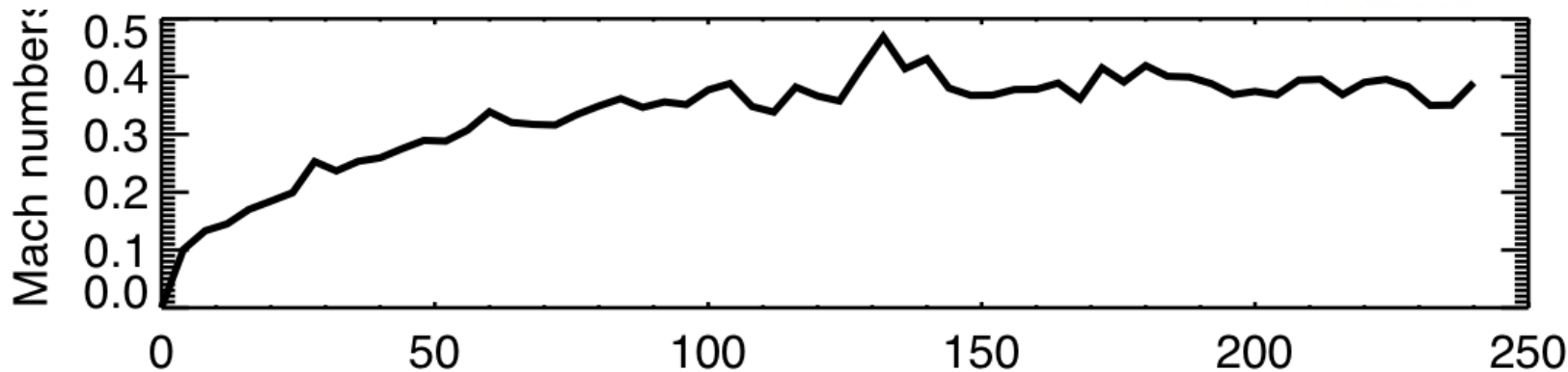
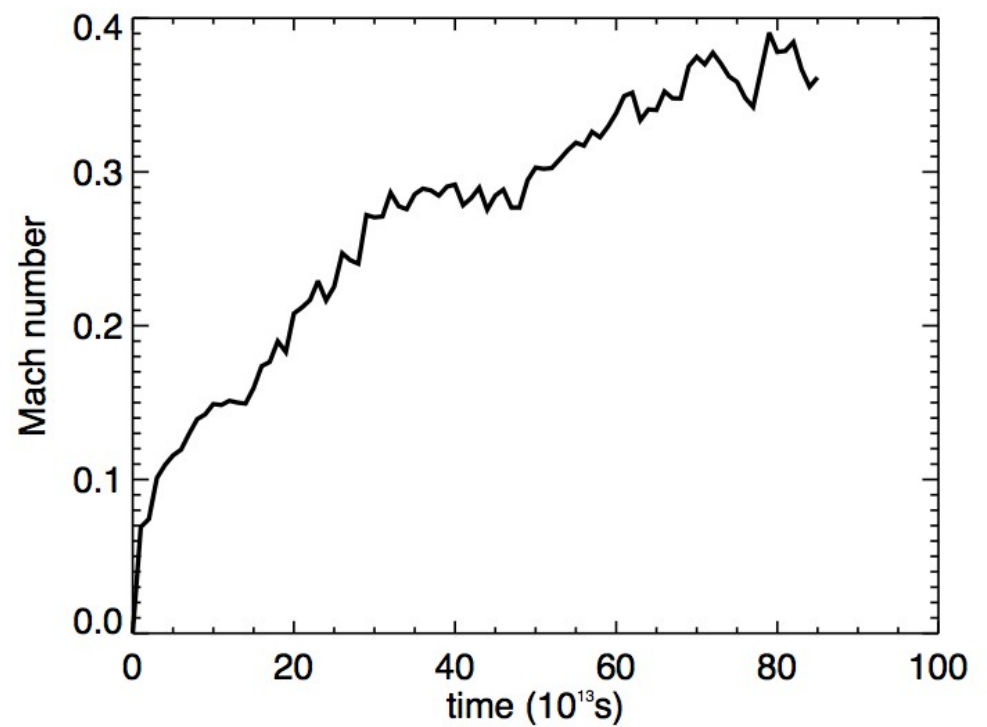


Cas optiquement épais



Difficultés

Convergence très lente de la 512:
probablement dûe au forçage
purement compressible



Difficultés

Transition WNM-CNM :

Taille physique de la boîte de simulation peut-être trop petite => Echelle du forçage inférieure à la longueur caractéristique du refroidissement
=> Augmenter la taille physique

$$\lambda_{cool} = \frac{\tau_{cool}}{C_s}$$

Hennebelle & Perault, 1999
Audit & Hennebelle, 2005

$$\tau_{cool} = k_B T / (\Lambda \rho)$$

Fluctuations de vitesse d'extension spatiale $\sim \lambda_{cool}$ et d'amplitude $\sim c_s$ peuvent conduire à la contraction thermique du WNM en CNM.

Pour le WNM - $T=8000\text{K}$, $n=0.5\text{cm}^{-3}$: $\lambda_{cool} \sim 10\text{-}20 \text{ pc}$
 - $T=8000\text{K}$, $n=3\text{cm}^{-3}$: $\lambda_{cool} \sim 1\text{-}3 \text{ pc}$

Echelle du forçage : $L_{turb} = 7 \text{ pc}$

Conclusions - Perspectives

- 1 - **Convergence trop lente de la simulation** (~30 My) : Probablement causée par le forçage purement compressible de la 512 et qui se fait à une échelle trop petite par rapport à l'échelle de refroidissement du WNM
 - Simulations en cours avec un boîte plus grande (40pc) et plus de modes solénoïdaux
 - Implication sur l'échelle d'injection dans le milieu interstellaire
- 2 - Augmentation de la taille de la simulation (**1024³ ou 2048³**) pour mieux décrire le domaine inertiel du spectre de puissance
- 3 - **Étude plus détaillée des observations artificielles** déduites des cubes de simulation (n,v et T)
 - Propriétés statistiques des champs de vitesse
 - Décomposition en gaussiennes
 - Comparaison aux propriétés obtenues sur les observations GBT
- 4 - **Etude des structures et de la filamentarité**
- 5 - **Introduction du champ magnétique** => simulations MHD