

R.Grappin, J. Léorat  
un modèle de vent solaire  
avec couplage température - vitesse d'alfvén

Résumé

1 On dit l'**intérêt d'une description fluide** pour le vent solaire: trois exemples de processus fluides qui peuvent changer beaucoup l'écoulement

2 On rappelle **quelques propriétés du vent** solaire, dont certaines sont "fluides" et d'autres "exotiques"

3 On cite un nouveau **point d'accord** obtenu entre simulations et une de ces propriétés

4 Pour inclure les propriétés "exotiques", on propose de **compléter les équations fluides** par un terme de couplage simple dans l'équation d'énergie

# 1. pourquoi utiliser une description fluide (c'-a-d négligeant les anisotropies de pression etc...)

Parce que c'est la seule qui, (parce qu'économique en degrés de liberté) puisse inclure des fluctuations à la fois **non** unidimensionnelles, **et temporelles**

**Trois exemples** de phénomènes fluctuants :

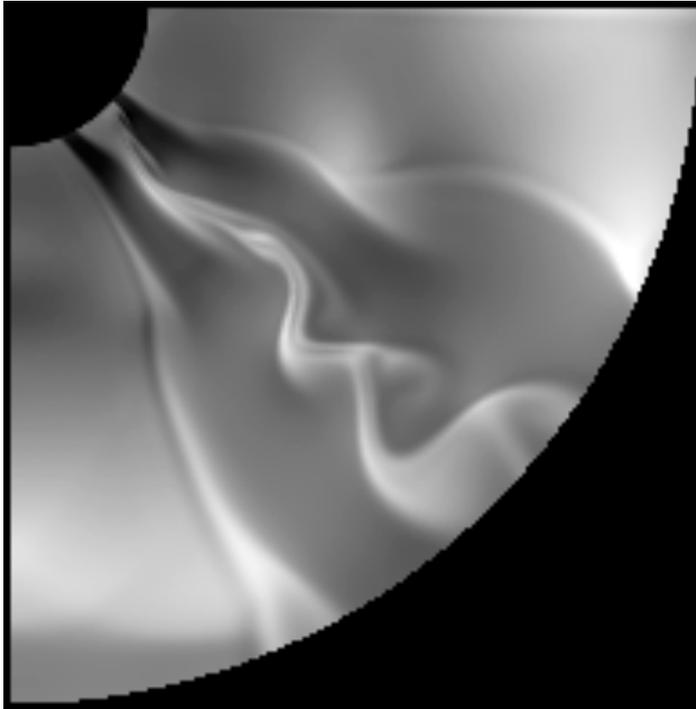
- Instabilité de mélange: mais est-elle permise par l'expansion (Grappin Velli 1993) et/ou le champ magnétique (Siregar et al. 1993)?
- La surexpansion des jets chauds (Grappin Mangeney Schwartz Feldman 1999)
- La "pression d'ondes" (Alazraki et Couturier 1971), le chauffage par ondes

Dans tous ces cas l'écoulement moyen en milieu fluctuant est **DIFFERENT** du régime en milieu non fluctuant - c'est vrai aussi en non-collisionnel!

Le vent moyen n'est **PAS** le même avec et sans fluctuations.

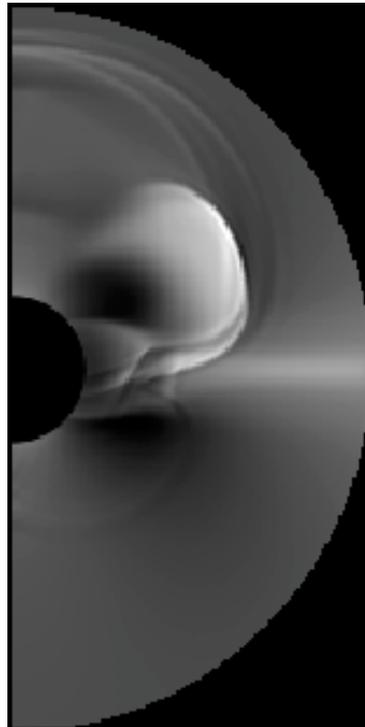
Cf les nombreux exemples astrophysiques où il faut ajouter une viscosité turbulente, une longueur de mélange etc: disques d'accrétion, convection solaire

## Les trois exemples



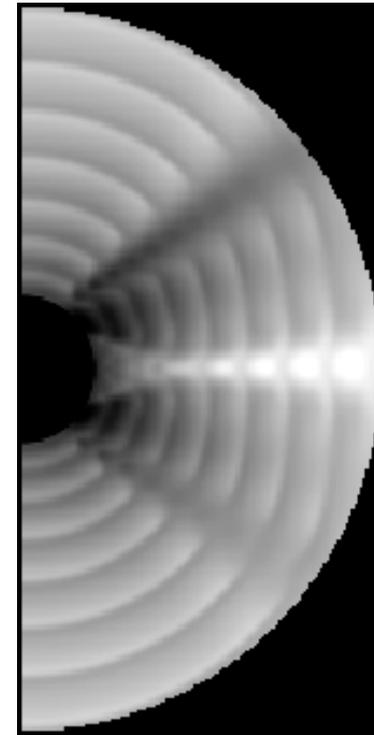
Instabilité de mélange

1



surexpansion  
des jets chauds

2



La "pression d'ondes"  
(ici ondes magnéto-sonores  
lentes)

3

Code MHD axisymétrique avec frontières ouvertes  
Grappin Léorat + Habbal+Buttighoffer 99->05

# Le problème

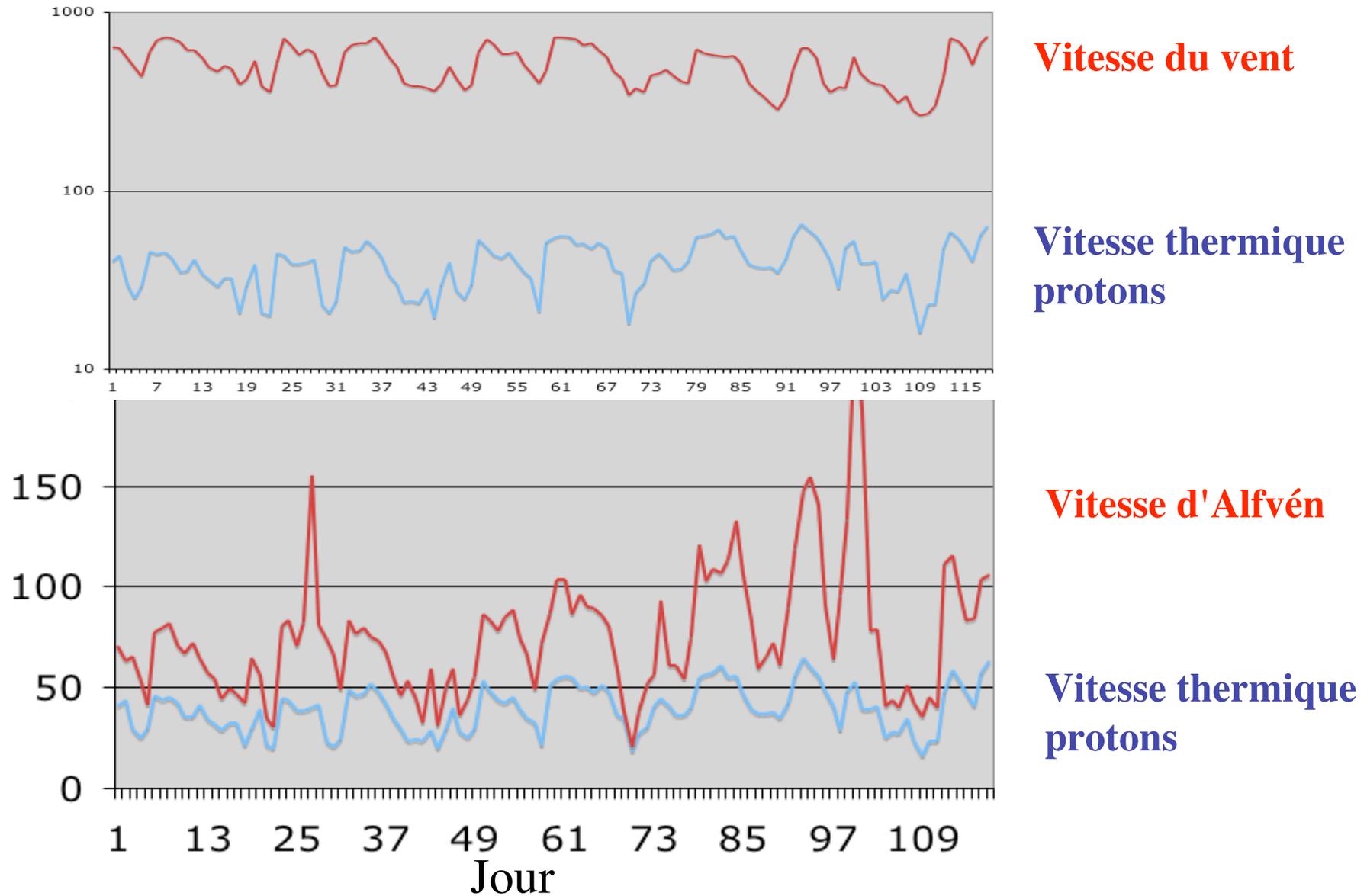
Pour étudier la **dynamique du vent dans l'espace et le temps**, il faut donc:

- a) utiliser un modèle fluide, c'est-à-dire sans TROP de degrés de liberté
- b) ...mais il faut que les propriétés du modèle fluide ne soient pas orthogonales à celles du vent

Or certaines propriétés du vent solaires (si on se restreint à la population principale, les protons) semblent coller au modèle fluide, mais d'autres suggèrent qu'il faut faire quelques modifications...

## 2. Quelques propriétés du vent solaire:

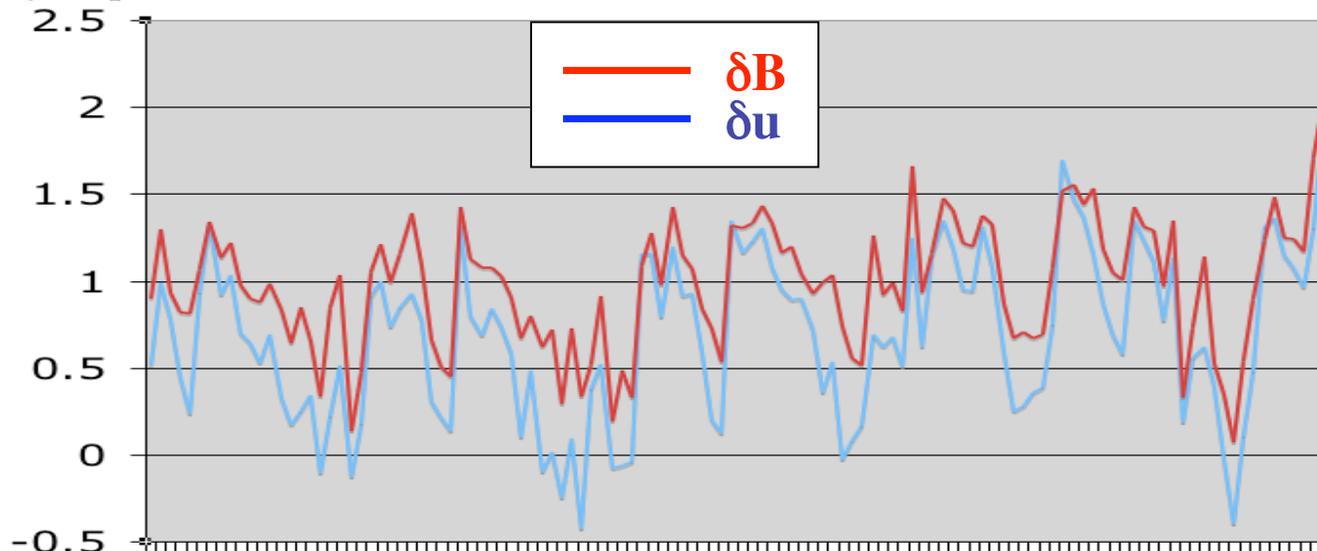
Trois mois près du minimum solaire: **vitesse, température, vitesse d'Alfvén**  
entre 0.3 et 1\_AU: variations journalières (Helios)



# Quelques propriétés du vent solaire (suite): énergie turbulente et température

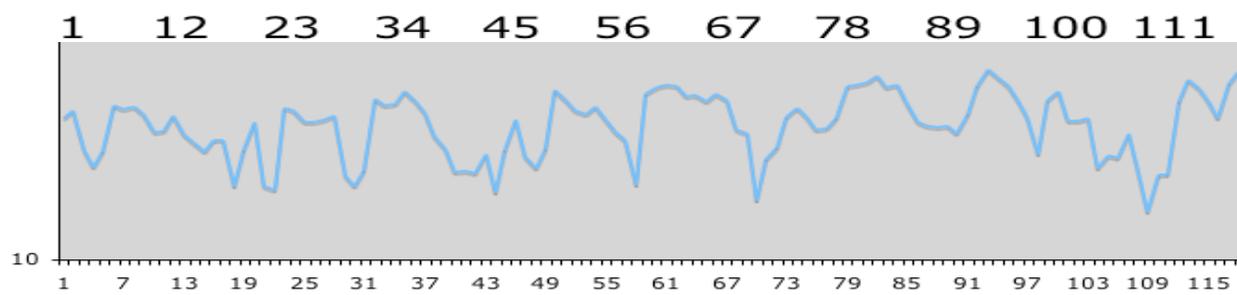
## Énergie turbulente ( $\approx 1$ heure) et température des protons (Mangeney Grappin Velli, 1991; Grappin Velli Mangeney 1991)

Log(amplitude)



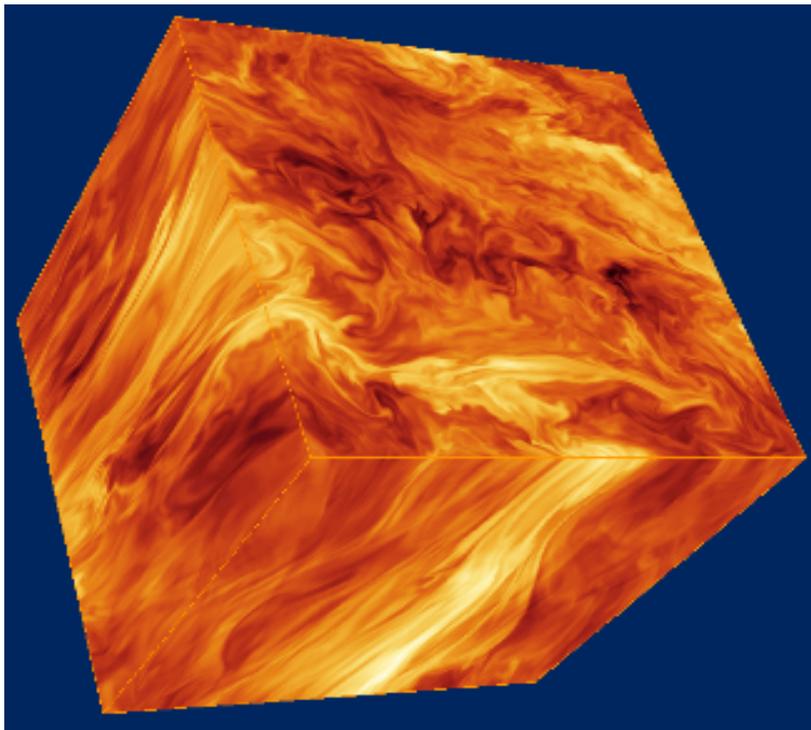
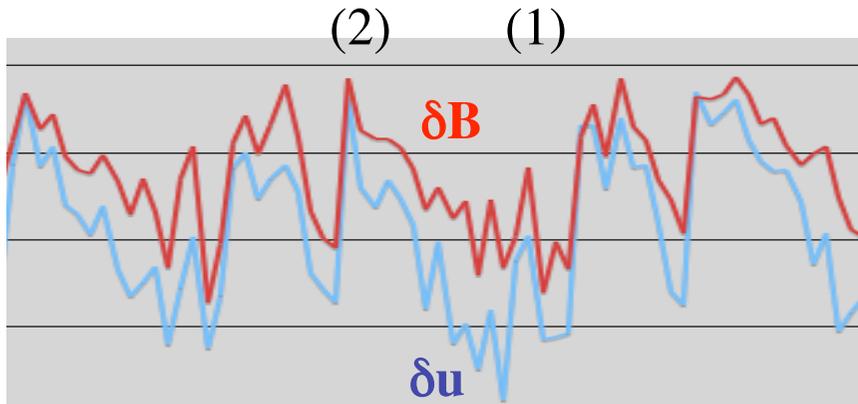
**Fluctuations  
magnétiques**

**Fluctuations de  
vitesse**



**Vitesse thermique  
protons**

### 3. Un point d'accord avec la MHD: La non-équipartition des fluctuations magnétiques



- Dans les **données d'Helios**  
*Régime fonction de la distance à la couche neutre:*  
(1) Kolmogorov + **excès magnétique**  
(2) Alfvénique + excès **faible**.

- Dans les **simulations de turbulence MHD incompressible**  
*Régime dépend de  $B$  moyen:*  
 $B^\circ=0$ : Kolmogorov + **excès magnétique**  
 $B^\circ$  grand: Iroshnikov-Kraichnan+ excès **faible**.  
 $\Rightarrow$  *Relation invariante* entre  $u^2+b^2$  et  $u^2-b^2$

Ceci a nécessité une résolution de  $1024^3$   
(MHD incompressible)  
(Müller Grappin 2005, Müller Biskamp Grappin 2003)

## 4. Comment inclure toutes les propriétés dans une description fluide?

Il existe donc **un** intervalle spectral où le plasma interplanétaire a des propriétés proches de celles de la turbulence MHD

quid des autres propriétés ?

Les propriétés du vent vues par Helios **se partagent en deux**:

a) **propriétés "fluides"**

les corrélations (**T, U**) et ( **$\delta u$ , U**)

(point sonique, pression d'ondes)

b) **propriétés "exotiques"**

les corrélations ( **$v_a$ ,  $\delta u$ , T**)

(Grappin, Velli, Mangeney 1991)

**Hypothèse pour inclure les propriétés "exotiques"**:

a) Les relations ( $v_a$ ,  $\delta u$ , T) proviennent de la résonance ion-cyclotron

b) On peut oublier la nature microscopique des interactions et modifier l'équation d'énergie en conséquence

# Chauffage perpendiculaire et ré-isotropisation

## Deux phénomènes :

(A) **Chauffage perpendiculaire** (*quasi-linéaire*) par les ondes d'Alfvén  
(vitesse de phase  $V_\phi = \epsilon v_a$ ) (Kennel Engelmann 1966, Hollweg 1980...):

$$\begin{aligned} d/dt(v_{\text{perp}}^2) &= (v_{\parallel} - V_\phi)^2/\tau^* & (1) \\ 1/\tau^* &= \Omega (\delta B/B)^2 \end{aligned}$$

où  $\delta B^2$  est l'énergie résonante, et  $\Omega$  la fréquence de gyration des protons.

(B) **Ré-isotropisation** (plus lente!) par instabilités variées (cf. Hellinger, Mangeney Travnicek Grappin 2003a,b)

## Résultat :

La température (moyennée sur les directions perpendiculaires et parallèle) doit **s'accrocher à la vitesse de phase** ( $T \rightarrow V_\phi^2 = (\epsilon v_a)^2$ ).

## Modèle fluide:

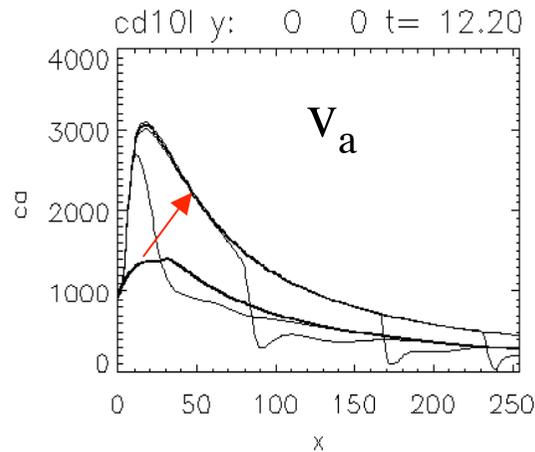
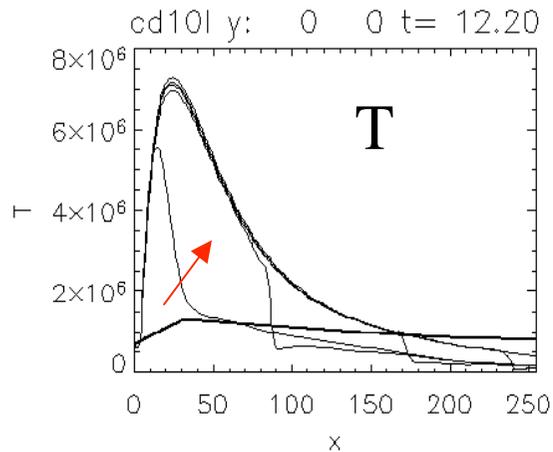
On remplace dans l'expression quasi-linéaire (1) les *vitesse individuelle* des particules par *la vitesse d'agitation thermique*  $\Leftrightarrow$  ajout d'un **terme de relaxation** à l'équation pour la température:

$$DT/Dt = -(\gamma-1)T\text{divu} + \text{termes conductifs} - (T - V_\phi^2)/\tau^*$$

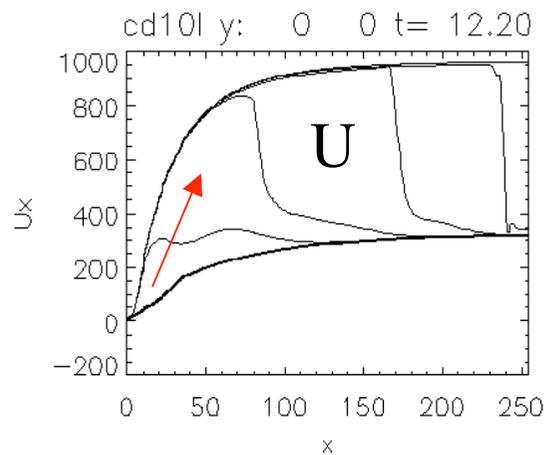
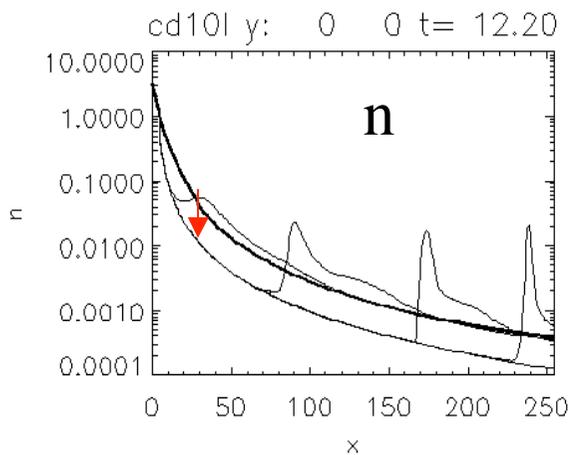
# Résultats préliminaires avec $\tau^*$ constant (Pôle)

Changement dans l'équation d'énergie:

(1) profil de température imposé -> (2) température couplée à vitesse d'Alfvén



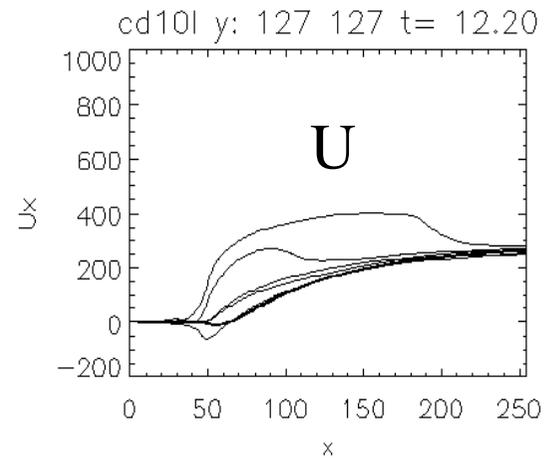
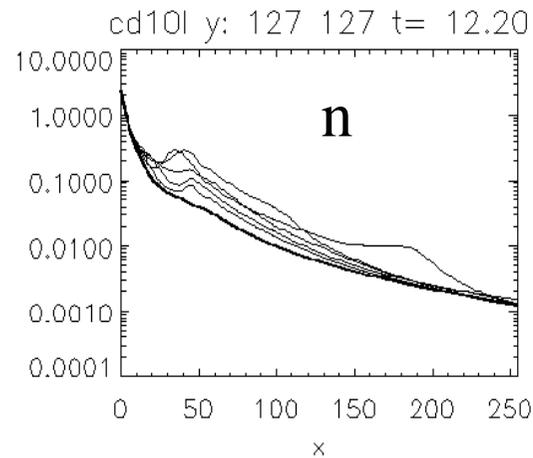
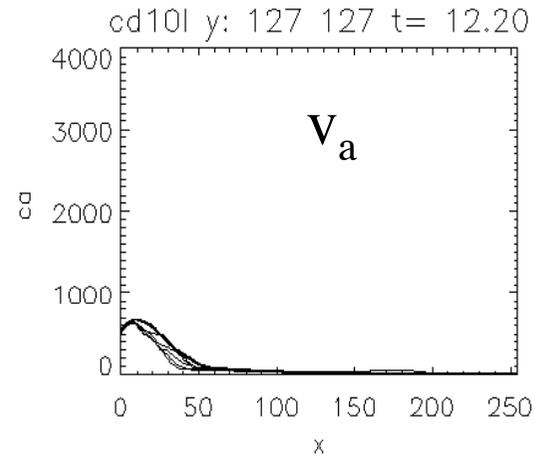
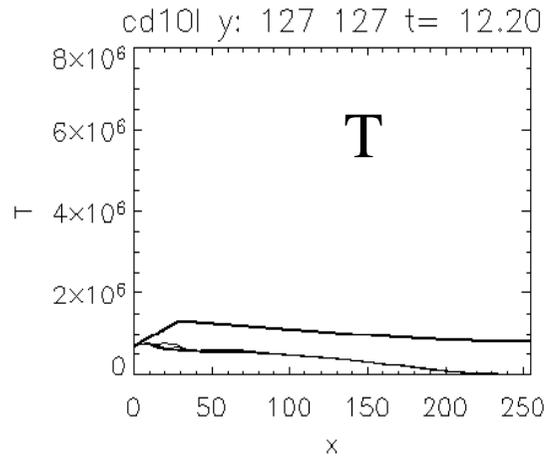
Régime de départ:  
 $DT/Dt =$   
 $-(\gamma-1)T\text{div}u$   
 $+ \text{termes conductifs}$   
 $- (T-T^*)/\tau^* \quad (1)$



Nouveau régime:  
 $DT/Dt =$   
 $-(\gamma-1)T\text{div}u$   
 $+ \text{termes conductifs}$   
 $- (T-V_\phi^2)/\tau^* \quad (2)$

Coupes radiales au pôle de  
 température T, vitesse d'alfvén  $v_a$ , densité n et vitesse du vent U

# Résultats préliminaires avec $\tau^*$ constant (Equateur)



Coupes radiales à l'équateur de  
température  $T$ , vitesse d'alfvén  $v_a$ , densité  $n$  et vitesse du vent  $U$

## Discussion-conclusion

Ce n'est pas la première fois! (Tu et al. 1988, Marsch et Tu 1990, etc... Hollweg)

La résonance a été invoquée pour:

- la **dissipation** des ondes et le chauffage, le vent étant donné
- la **formation de l'anisotropie** de la fonction de distribution des vitesses
- le **chauffage différentiel** des ions lourds et des protons

L'originalité (contestable!) consiste ici à **l'incorporer dans un modèle mono-fluide** multi-dimensionnel et dépendant du temps

La **réalité du chauffage résonant** par ondes d'Alfvén quasi-parallèles n'a **pas** encore été **démontrée** dans les simulations particulières (avec *vent imposé*): le démarrage du chauffage tend à supprimer les conditions de résonance (Liewer, Velli, 2002).

Malgré cela, l'hypothèse proposée ici est la seule qui permette **d'expliquer simplement** les corrélations "exotiques" mentionnées au début.

Nous espérons donc que des **simulations particulières** plus riches (prenant en compte les effets multidimensionnels en particulier) permettront de préciser dans quelles conditions le chauffage résonant fonctionne (et donc préciser l'expression du  $\tau^*$ ).