



SF2A  
Grenoble, 2-6 Juillet 2007



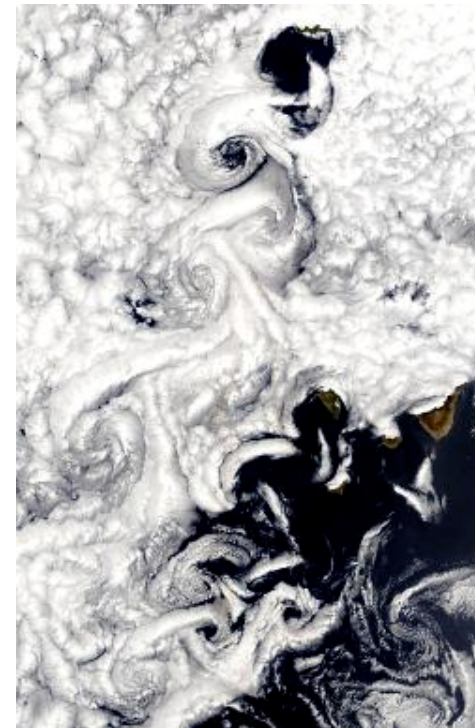
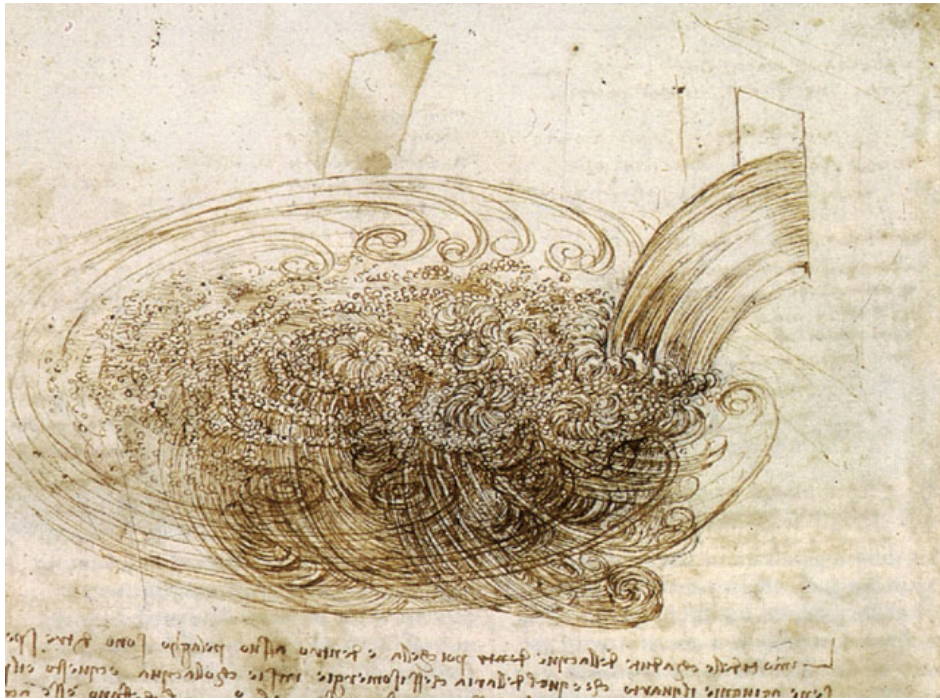
# Turbulence dans les plasmas spatiaux: vent solaire/magnétogaine terrestre



Universita della Calabria

O. Alexandrova, A. Mangeney  
M. Maksimovic, R. Grappin,  
V. Carbone

# Turbulence ?



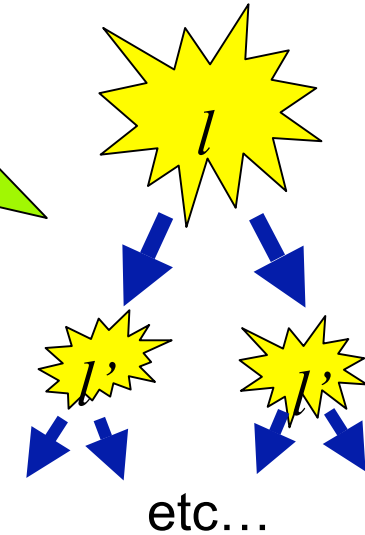
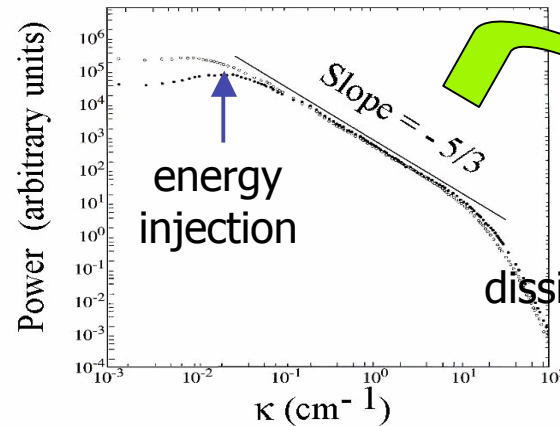
- processus non-linéaire dans les fluides, non reproductible localement, mais qui a des propriétés statistiques universelles

# Propriétés universelles de la turbulence (HD)

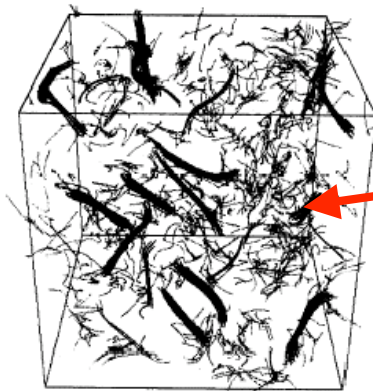
- scale invariance, i.e. same physics at all scales  $\Rightarrow$  power law spectra

$$E(k) \propto k^\alpha, \quad \alpha = -\frac{5}{3}$$

$\alpha$  is independent of the energy injection & dissipation (universal law)

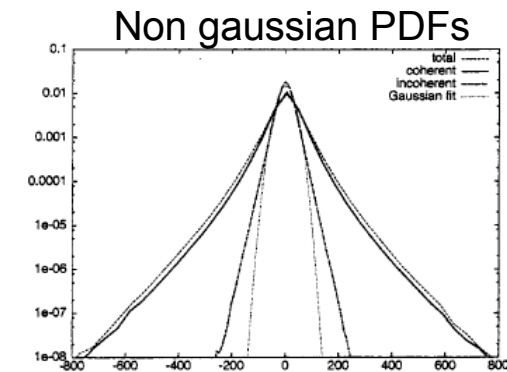


- intermittency (occurrence of coherent structures)



[Frisch, 1995]

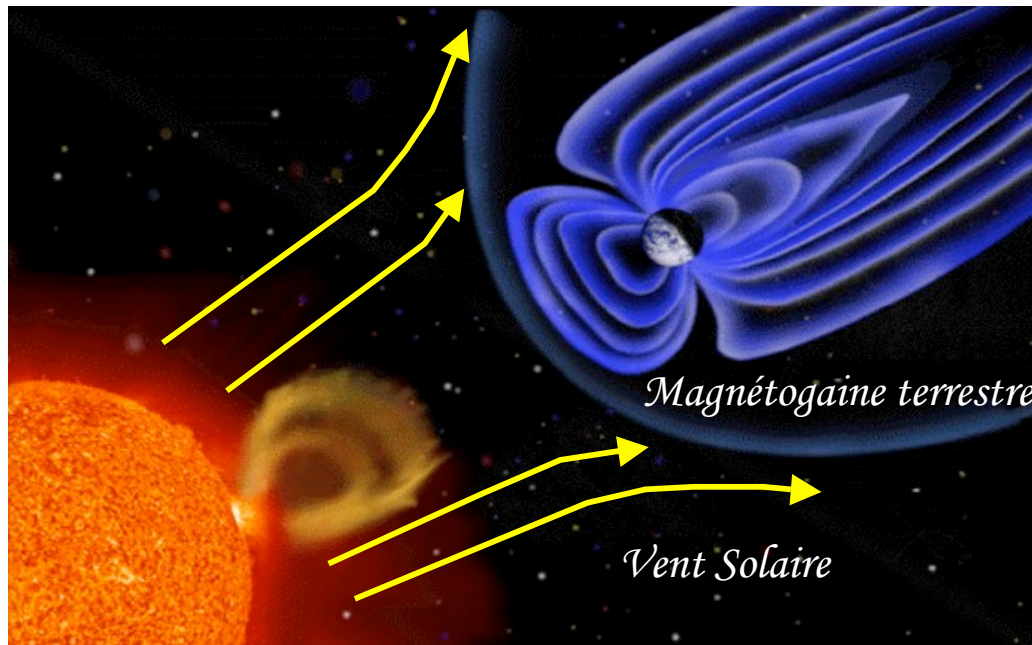
Filaments of vorticity (length  $\sim$  forcing scale, section  $\sim$  dissipation scale)



[Farge et al., 2003]

# Les Plasmas Astrophysiques généralement turbulents

- Milieu interstellaire, restes de supernovae, ... ( $\delta v$ ,  $\delta b$ )
- Les mesures *in situ* sont possibles dans l'héliosphère
  - le vent solaire
  - des régions autour des magnétosphères planétaires (la Terre, par exemple)



La Magnétogaine Terrestre est la région turbulente entre le choc et la magnétopause (la limite de la magnétosphère)

# Turbulence dans un plasma astrophysique

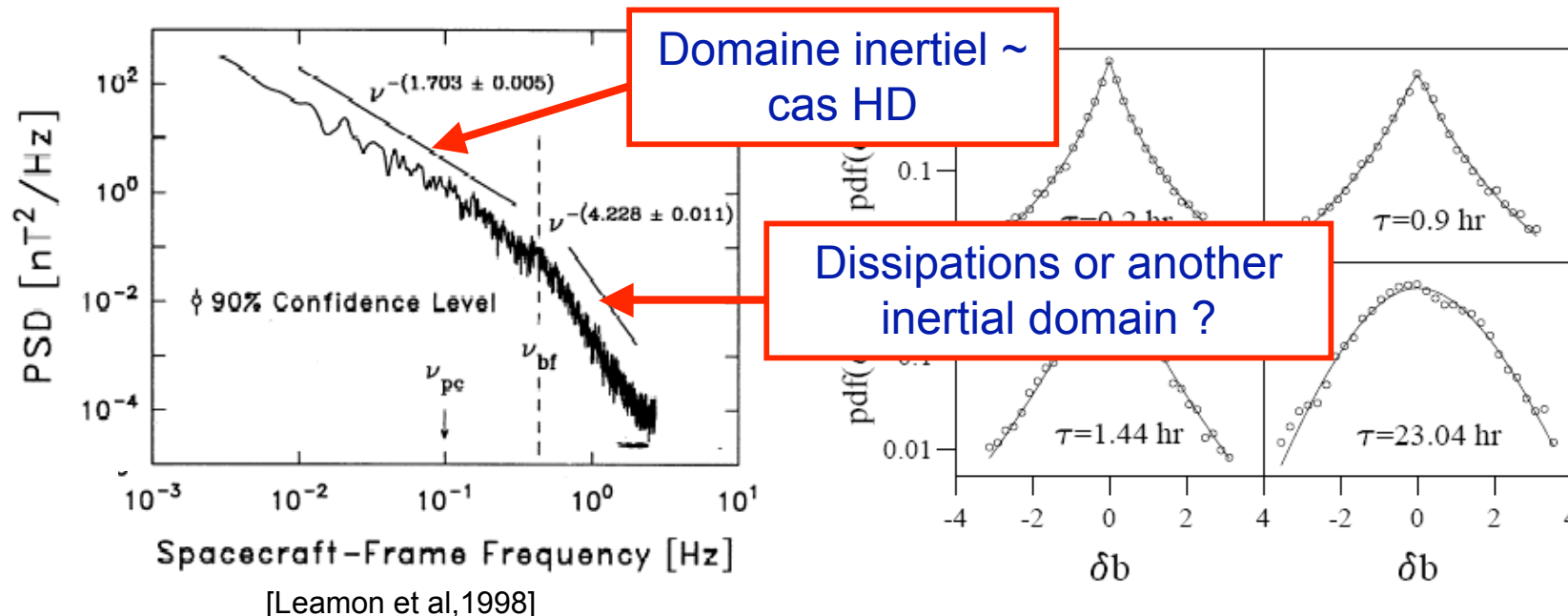
Présence du champ magnétique  $B_0$  implique

- anisotropie de la turbulence
- échelles et fréquences caractéristiques

## Turbulence dans le vent solaire

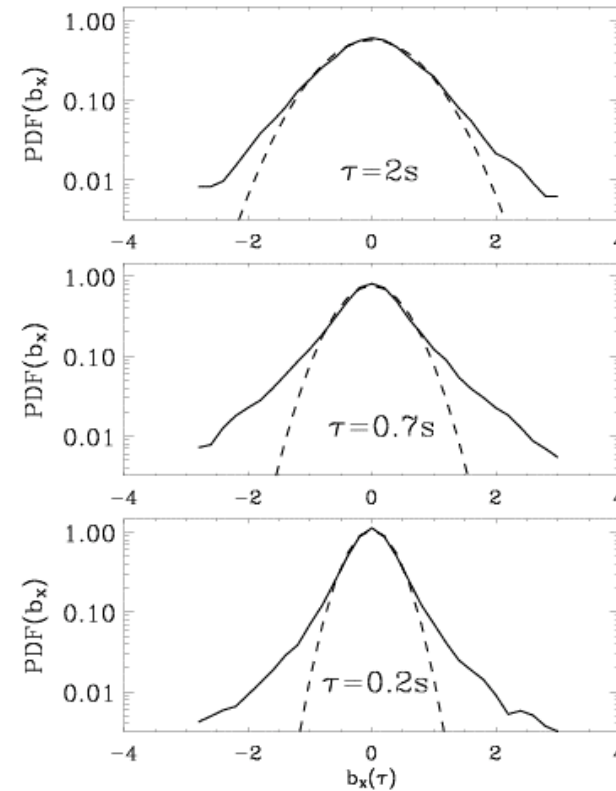
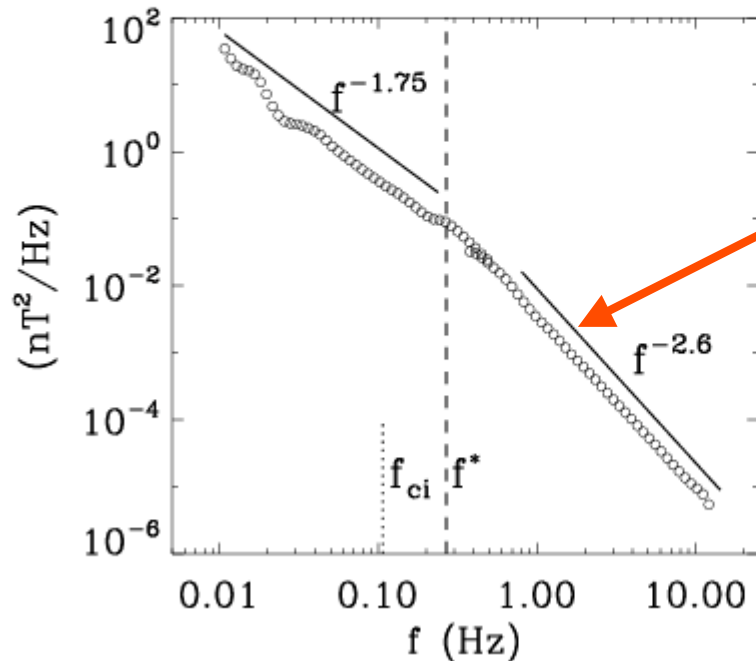
cassure du spectre à la fréquence cyclotronique des ions  
(gyration des ions autour de  $B_0$ )

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB_0}{m_p c}$$



# Dissipation vs autre domaine inertiel

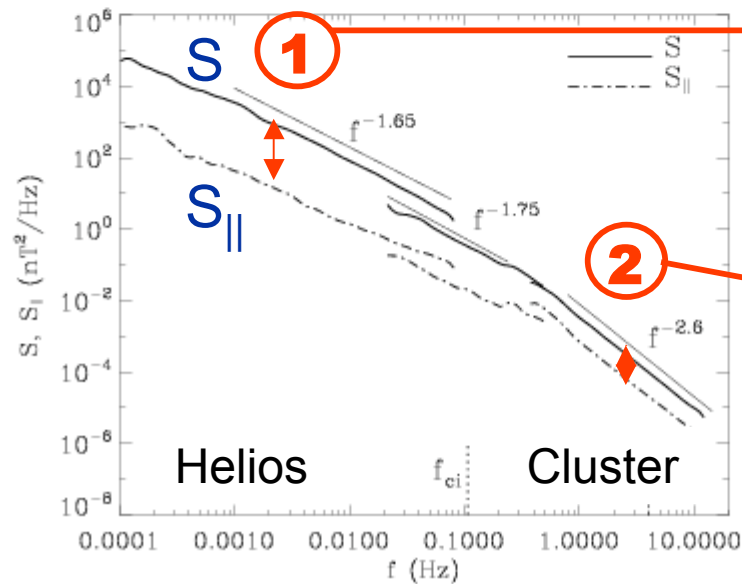
*STAFF-SC/CLUSTER: instrument  
très sensible pour mesurer  $\delta b$*



- Spectre  $\sim$  loi de puissance (autosimilarité)
- Propriétés statistiques des fluctuations sont similaires à celles du domaine inertiel  $\sim$  Kolmogorov
- Cascade **turbulente**, pas de dissipation!

[Alexandrova, Carbone, Veltri, Sorriso-Valvo, PSS]

# Deux cascades : nature des fluctuations

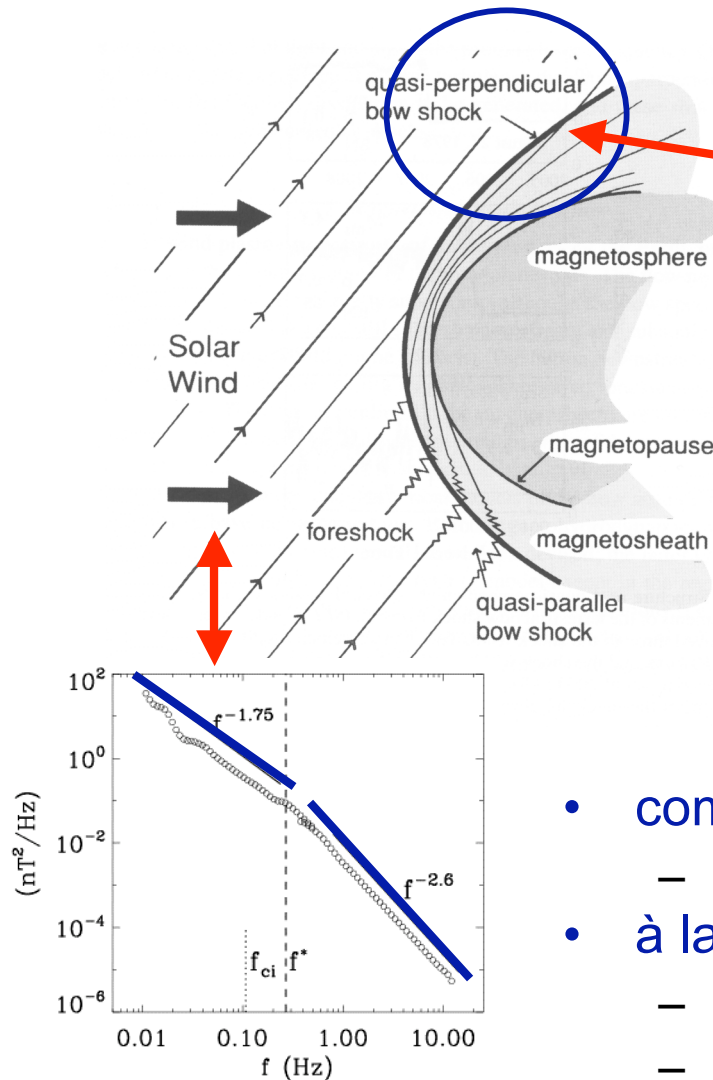


$S_{\parallel}/S = 0.05 \Rightarrow$  cascade des fluctuations alfvéniques

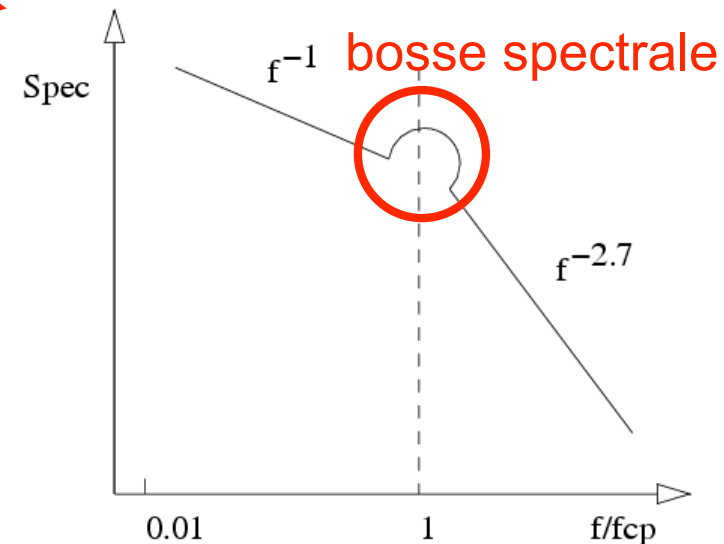
$S_{\parallel}/S = 0.25 \Rightarrow$  cascade des fluctuations magnéto-sonores

- Le passage 'cascade alfvénique  $\Rightarrow$  cascade magnéto-sonores' ?
- Modèle phénoménologique pour les fluctuations compressibles ?
- Turbulence forte / faible pour la cascade magnéto-sonore ?

# La magnétogaine terrestre comme laboratoire de plasma turbulent



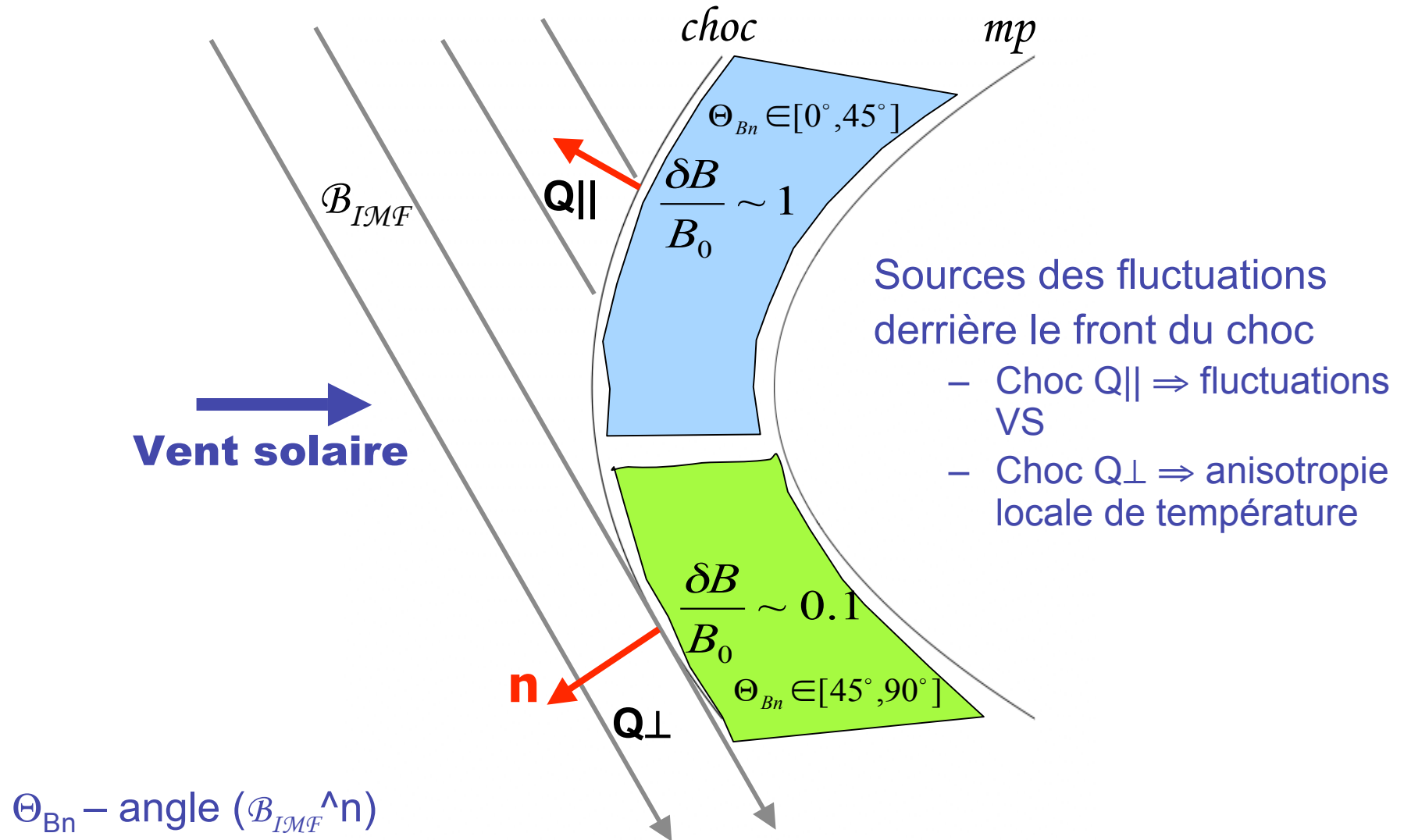
Spectre turbulent en aval des chocs quasi-perpendiculaires :



- comme dans le vent solaire
  - Il y a une cassure spectrale
- à la différence avec le vent solaire
  - Basses fréquences : spectre  $\sim f^{-1}$
  - **Présence de la bosse spectrale sur la cassure !**



# Rôle de la géométrie du choc sur les fluctuations dans la magnétogaine



## En aval d'un choc $Q_{\perp}$ : vision linéaire

$$\frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} - 1 > \eta$$

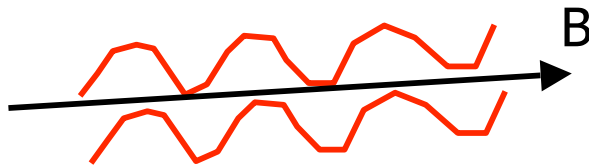
Anisotropie

Source d'énergie libre

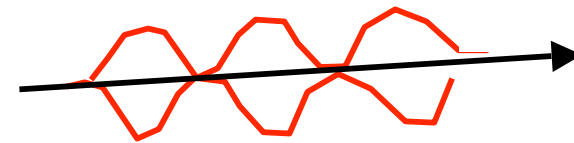
$$f < f_{cp} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m_p c}$$

croissance d'ondes AIC

croissance d'ondes miroir



(Alfvén Ion Cyclotron) mode  
transversal,  $k \parallel B$

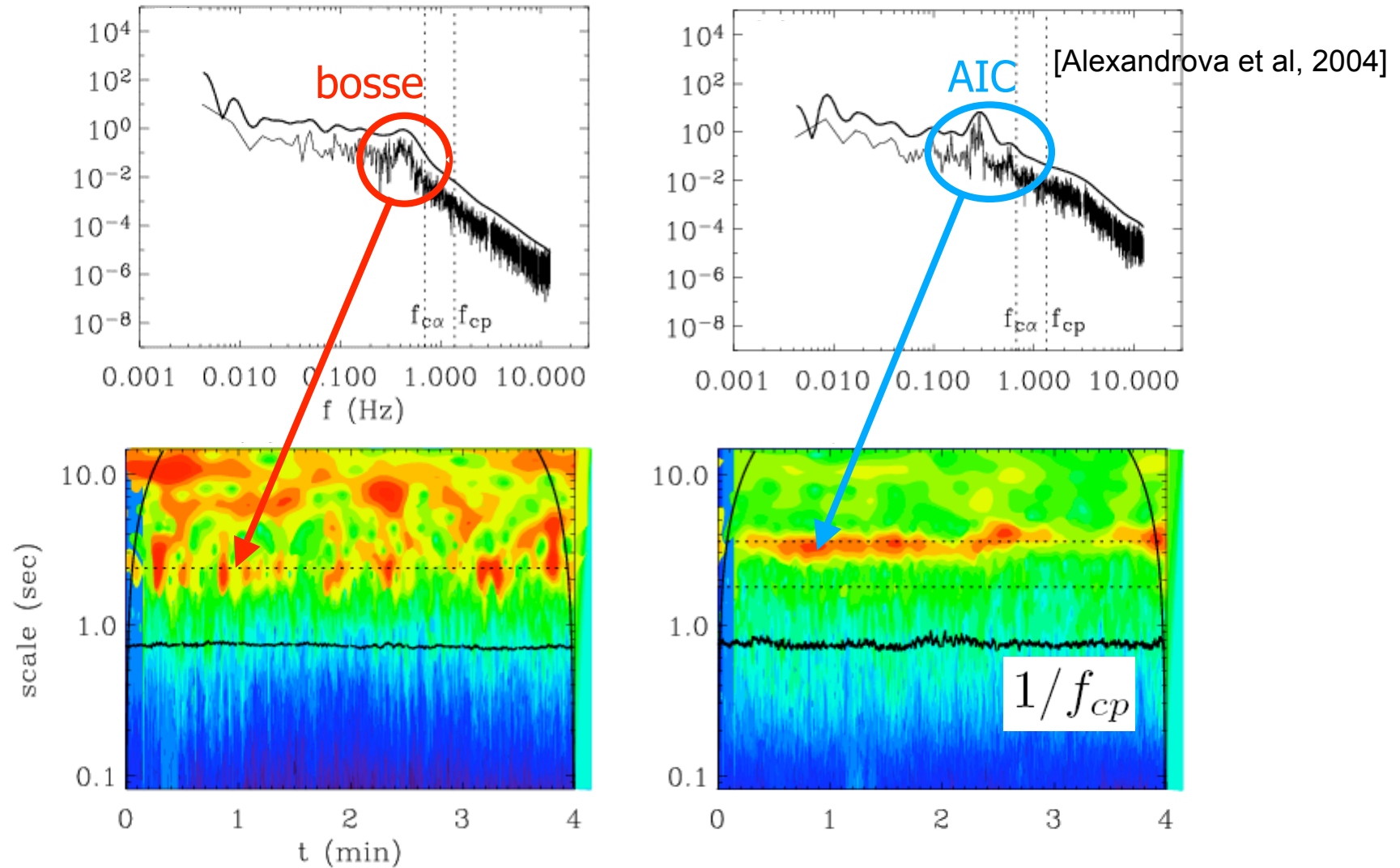


mode compressible  $k \perp B$

**Turbulence = mélange des ondes planes  
(turbulence faible) ?**

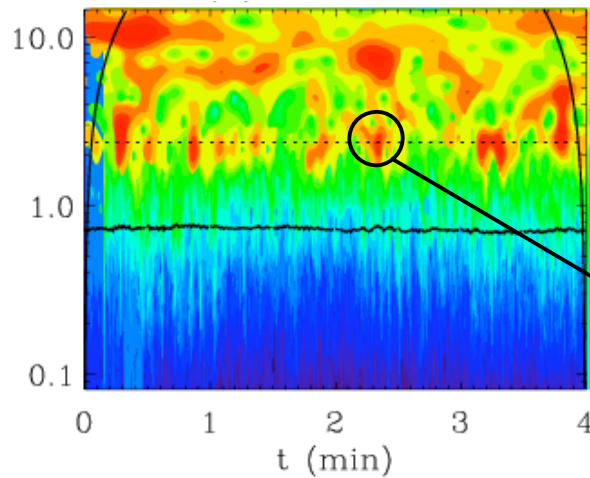
# Analyse de la bosse spectrale, comparaison avec AIC

Onde AIC monochromatique observée très rarement

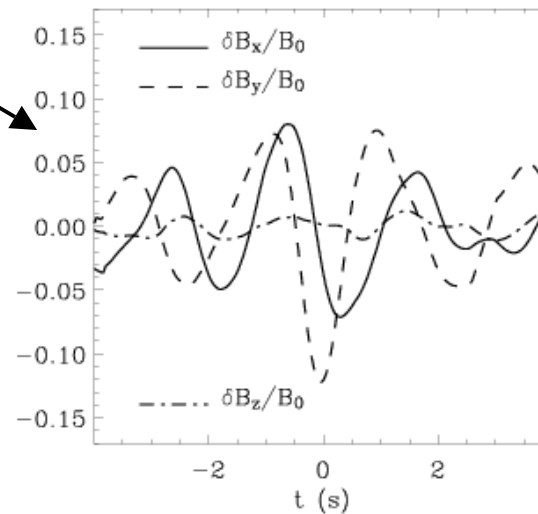


Transformée en ondelettes de Morlet

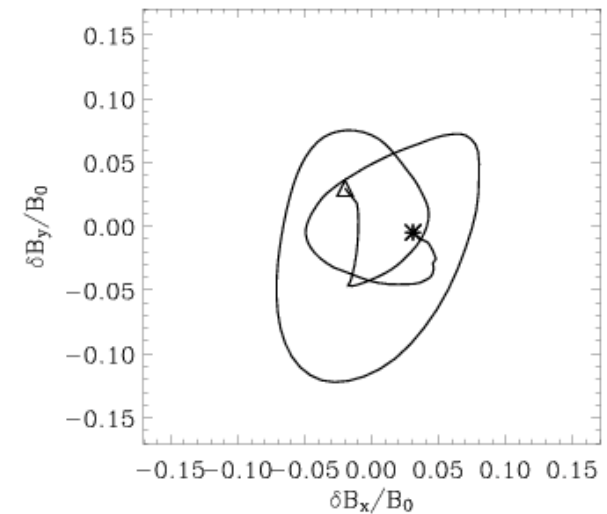
# La bosse spectrale correspond à des fluctuations cohérentes localisées dans le temps



Formes d'ondes  $\delta B$



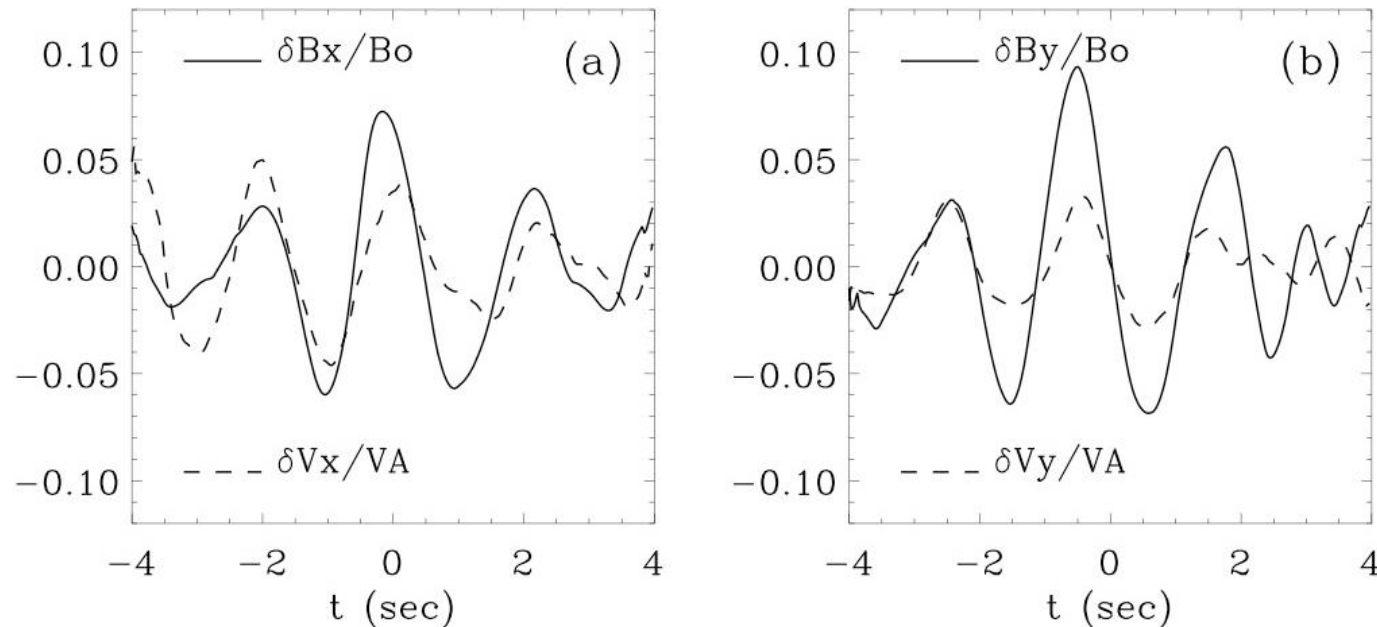
polarisation



1. Direction de variance minimum  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{B}_0, \mathbf{z}$
2. Polarisation quasi-circulaire dans le plan  $\perp \mathbf{B}_0$

# "Alfvenicité" des fluctuations cohérentes

NB : CLUSTER mesure les vitesses avec une résolution de 4 s (pas suffisant !)

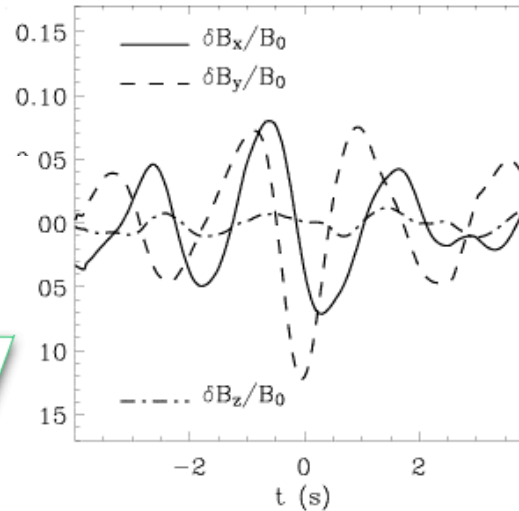
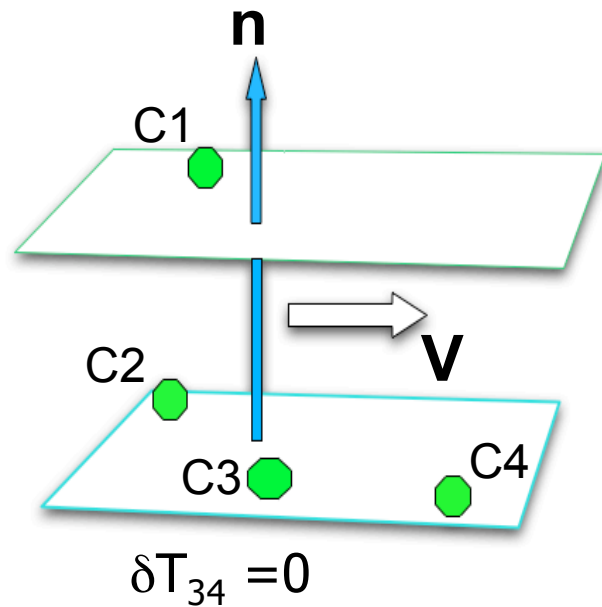


$$\delta V_{\perp}/V_A = \xi \delta B_{\perp}/B_0$$

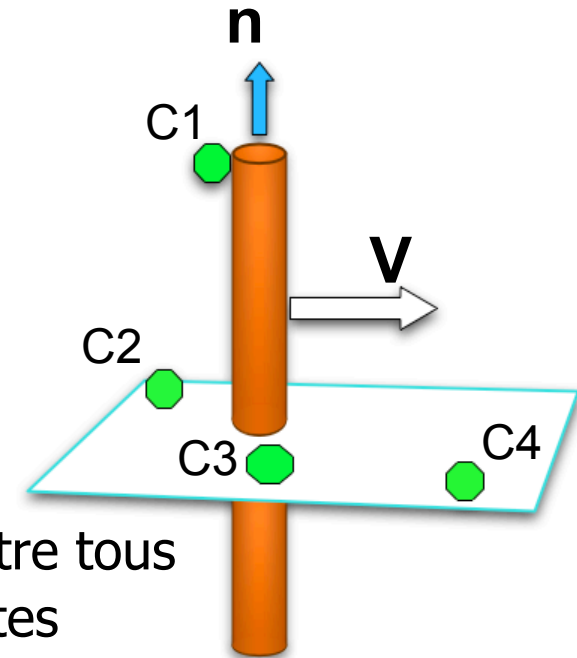
- pour différents événements,  $\xi$  est différent (mais proche de 1)
- $\delta V$  est déterminé à partir de la loi d'Ohm de la MHD idéale,  $E = -V \times B$

# Dimension des fluctuations cohérentes

■ 1D : paquet d'onde alfvénique



■ 2D : courant || B<sub>0</sub>



Identification des mêmes événements sur différents satellites

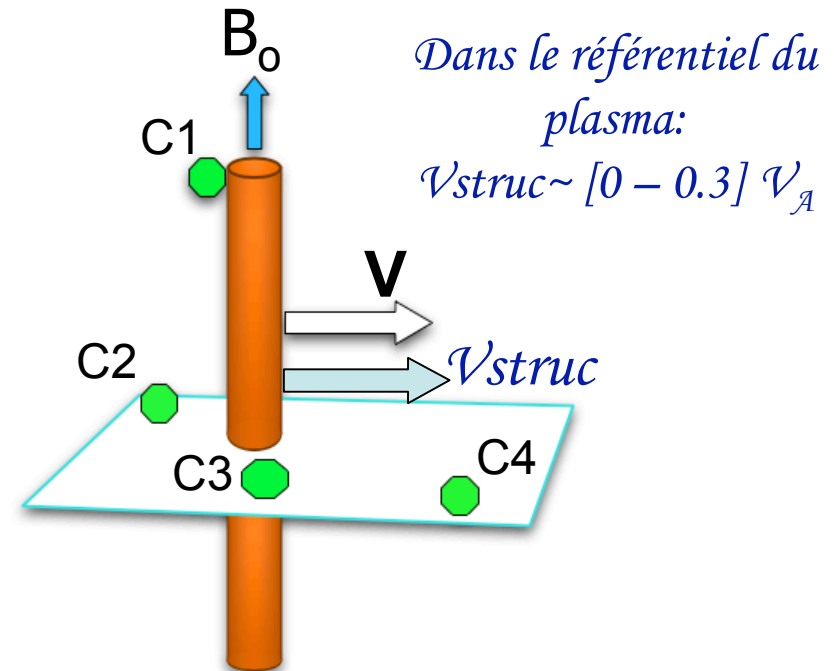
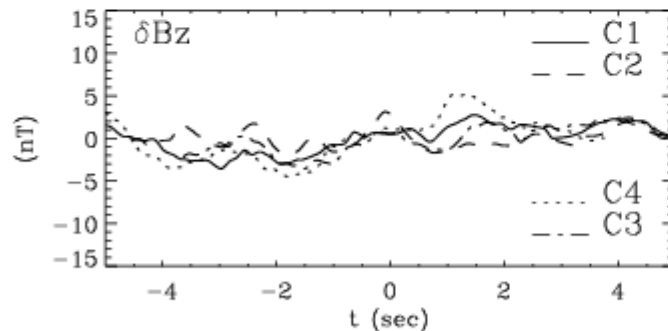
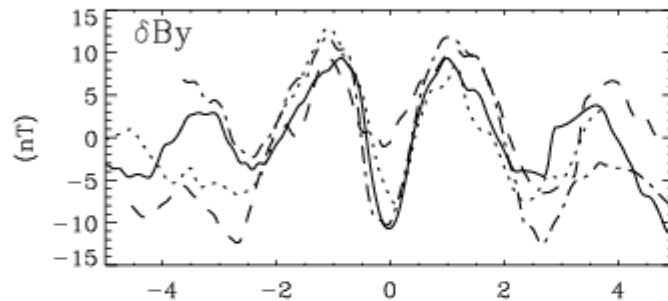
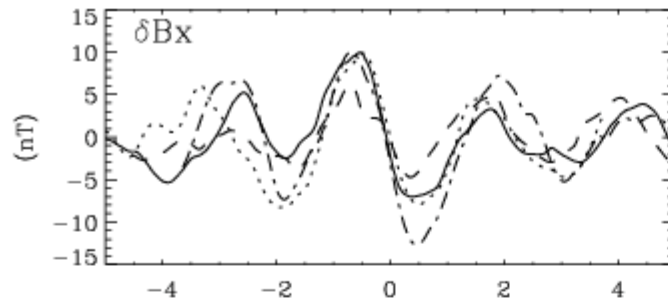
Test sur les décalages:

$$\delta t_{ij} = \delta t_{ik} + \delta t_{kj}$$

Au moins 3 satellites nécessaires

**Les séparations temporelles et spatiales entre les satellites of Cluster indiquent que les fluctuations alfvéniques sont**

- localisées dans le plan  $\perp$  à  $B_0$
- se propagent lentement dans ce plan

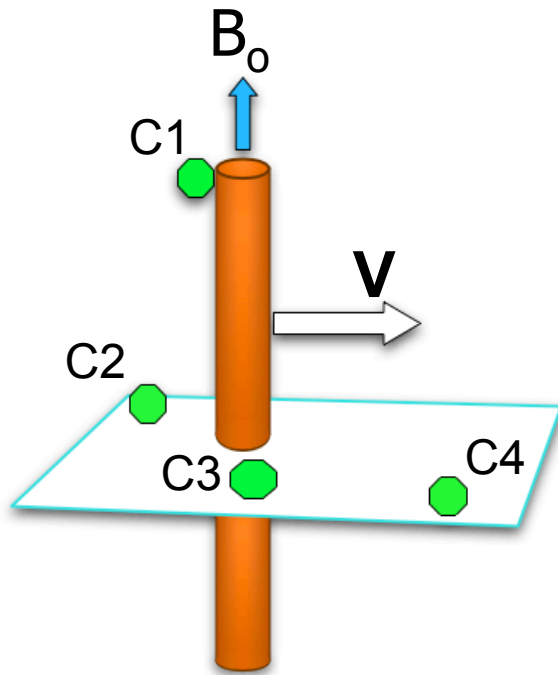


section de la structure:

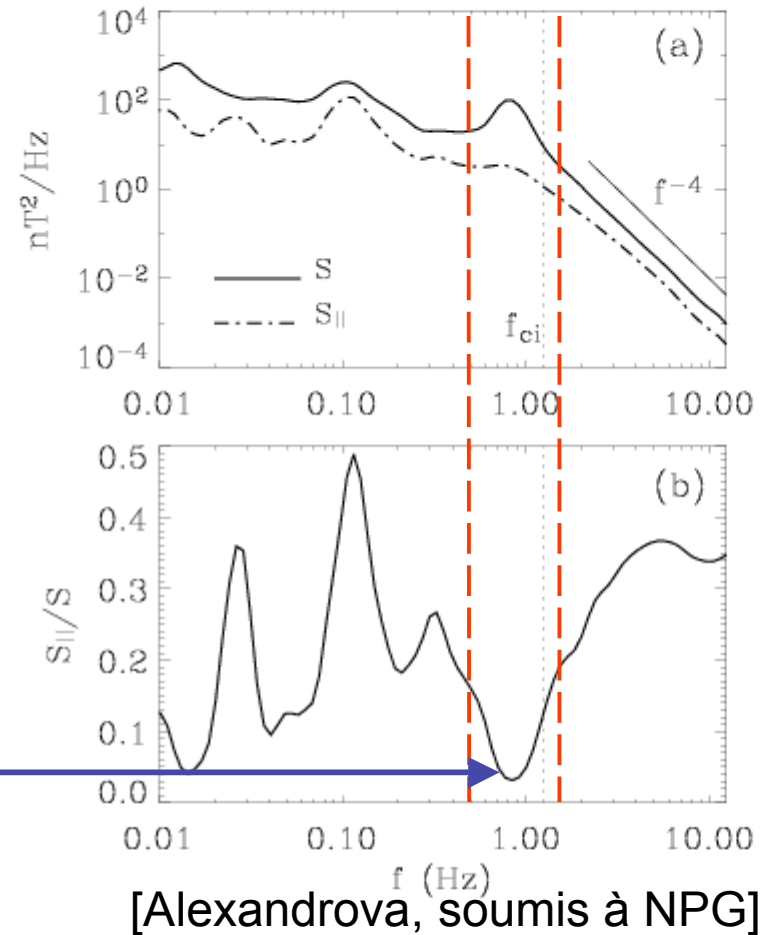
$$d_{\perp} \approx 500 \text{ km} \geq 10c / \omega_{pi}, 20\rho_{Li}$$

# Incompressibilité des structures alfvéniques cylindriques

- $S_{\parallel}$  est le spectre des fluctuations magnétiques longitudinales,  $\delta B_{\parallel}$
- $S$  est la densité de puissance spectrale totale de  $\delta \mathbf{B}$



Compressibilité  $S_{\parallel}/S$  dans le domaine spectral de la bosse chute jusqu'à to 3%





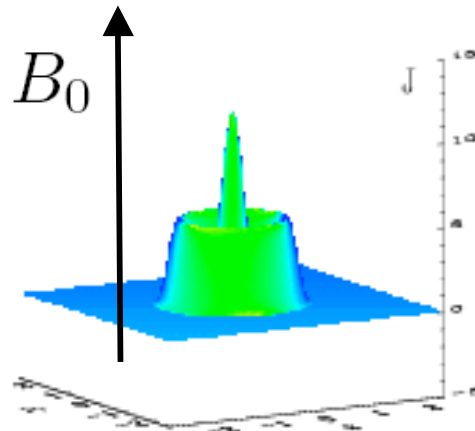
# Vortex d'Alfvén

Propriétés des fluctuations cohérentes observées :

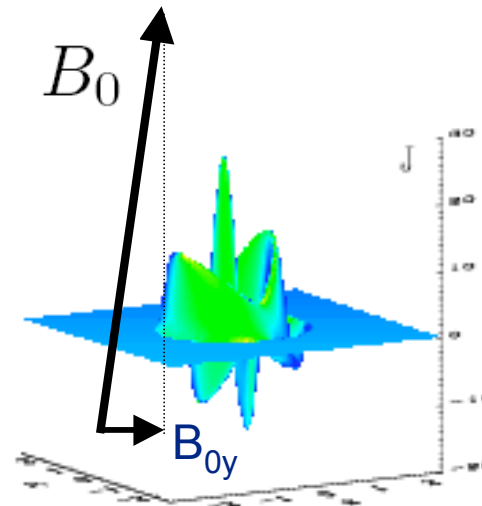
- 2D ( $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$ )
- alfvéniques ( $\delta V_{\perp} \parallel \delta B_{\perp}$ )
- incompressibles ( $\delta B_{\parallel} < \delta B_{\perp}$ )

MHD incompressible admet des solutions sous la forme de vortex magnétiques (vortex d'Alfvén)

$$\delta V_{\perp}/V_A = \xi \delta B_{\perp}/B_0$$



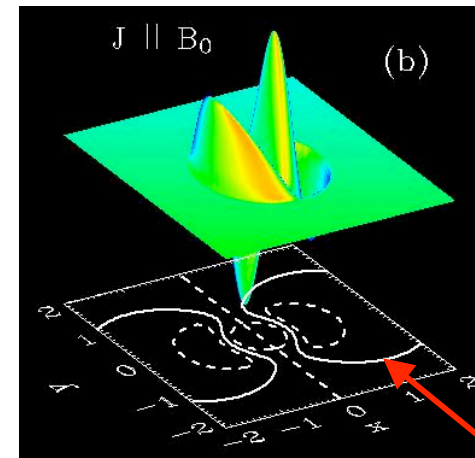
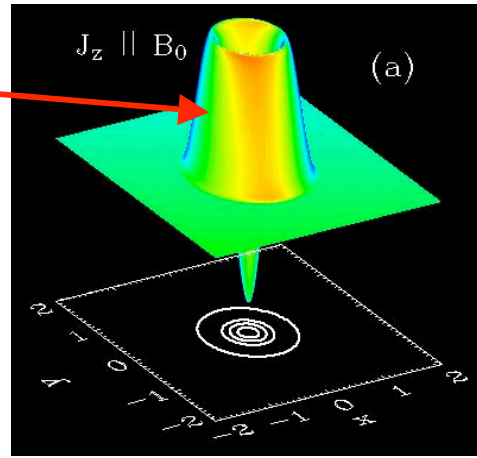
vortex aligné au champ : monopôle



vortex incliné : dipôle

# Vortex d'Alfvén ~ 2D HD-vortex

Courant,  
vorticité



Lignes de champ,  
Lignes de courant

équation Navier-Stokes 2D :

$$\partial_t \omega + (\delta \mathbf{V}_\perp \cdot \nabla) \omega = 0$$

$$\delta \mathbf{V}_\perp = -\nabla \times \psi; \quad \omega = -\Delta \psi$$

où  $\omega$  est la vorticité &  $\psi$  est le potentiel

# Solution localisée en HD

**Cas particulier** : la vorticité est localisée dans un cercle de rayon  $a$ .  
Dans le cercle, le potentiel  $\Psi$  est une solution de l' equation d'Helmholtz.  
  l'extérieur,  $\Psi$  décroît comme  $1/r$  :

$$\begin{cases} \Delta\Psi + k^2\Psi + c = 0, & r < a \\ \Delta\Psi = 0, & r \geq a \end{cases}$$

**monop le**

$$\begin{cases} \Psi = \Psi_0(J_0(kr) - J_0(ka)) + ux \left(1 - \frac{2}{kr} \frac{J_1(kr)}{J_0(ka)}\right), & r < a \\ \Psi = a^2 u \frac{x}{r^2}, & r \geq a. \end{cases}$$

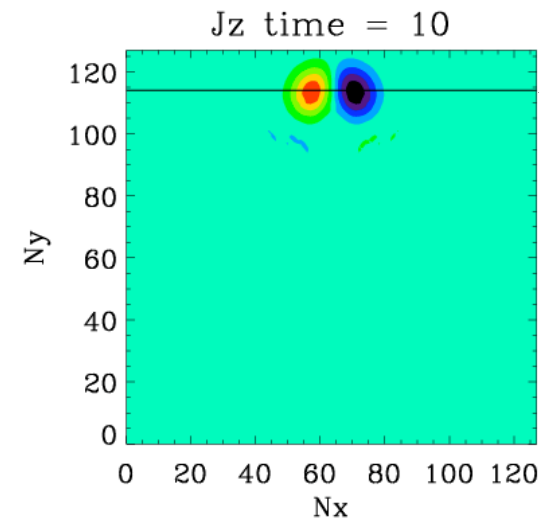
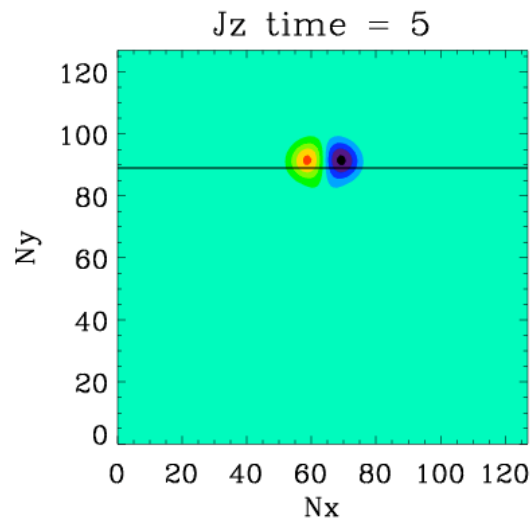
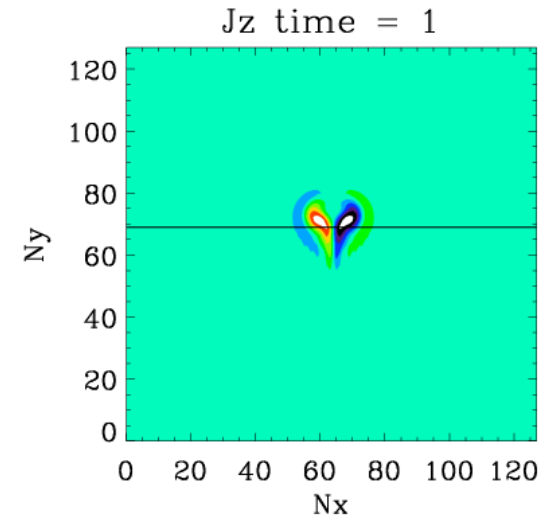
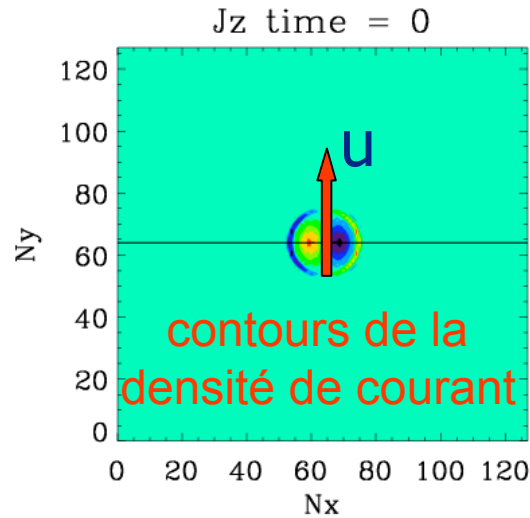
**dip le**

## En MHD

$$\Psi = \xi A; \quad \xi = \frac{u}{B_{0y}}$$

[Petviashvili & Pokhotelov, 1992]

# Stabilité des vortex d'Alfvén (simulations MHD 2D compressibles)



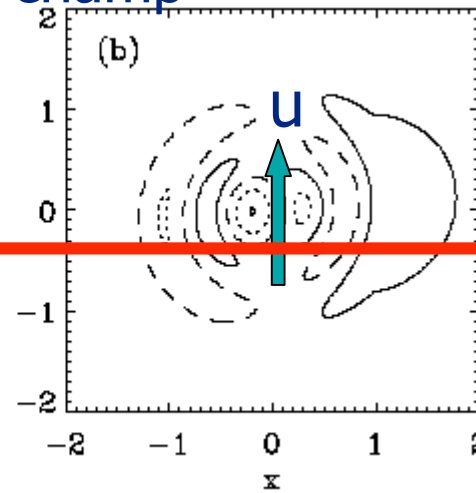
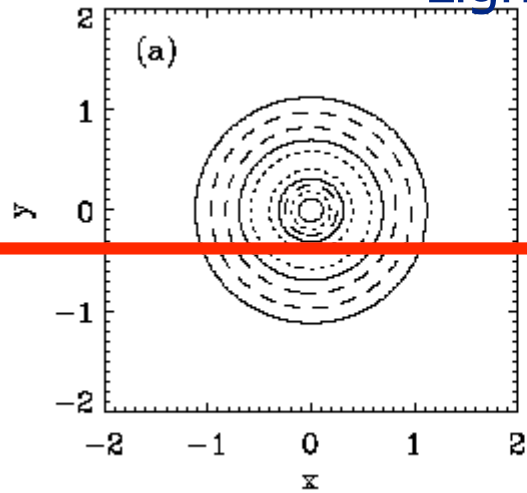
[Alexandrova, Grappin, Mangeney, en preparation]

vortex-monopole  
( $u=0, B_{0y}=0$ )

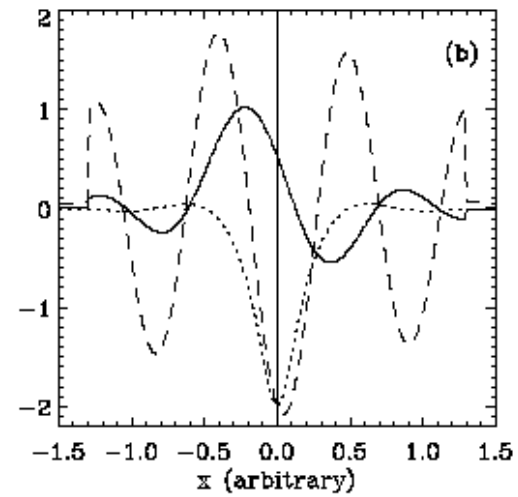
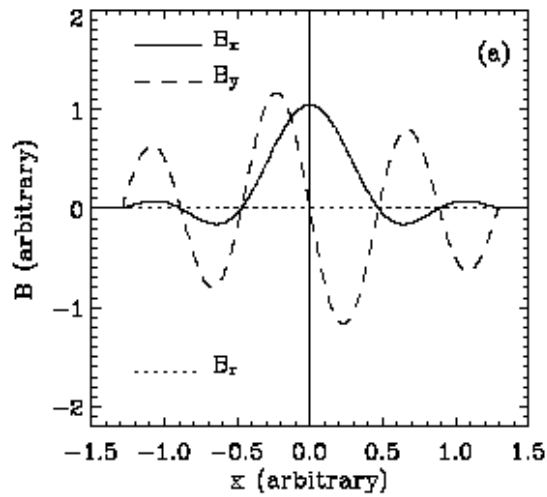
vortex-dipole

Lignes de champ

Satellite



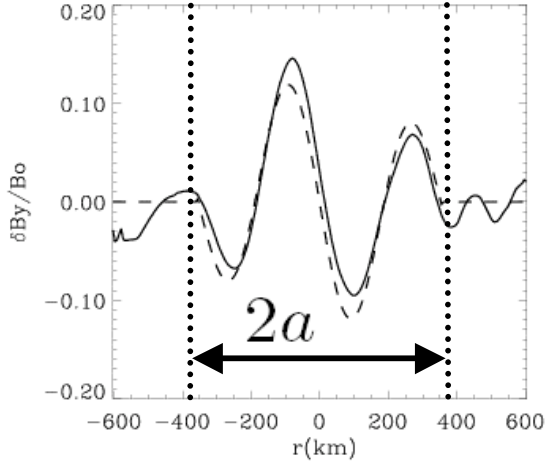
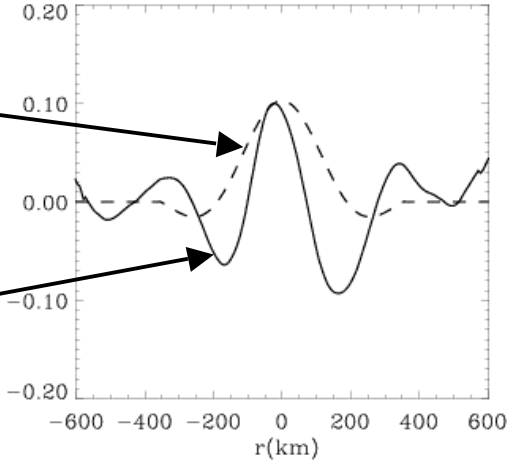
Formes d'ondes mesurées



In the m/sheath we observe both vortex types !

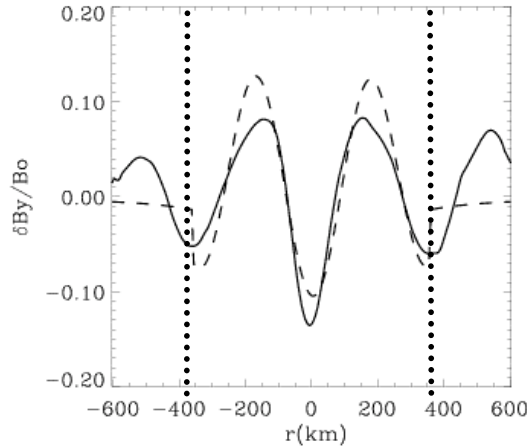
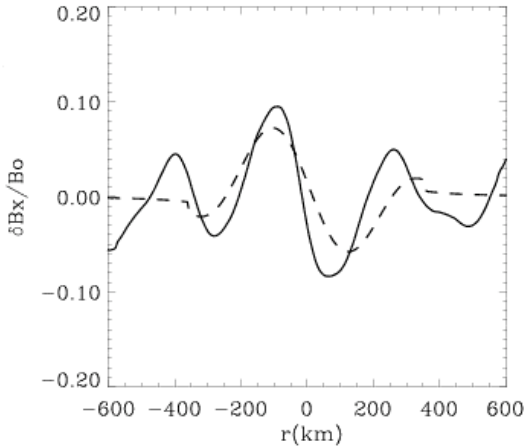
vortex-monopole

model  
observations



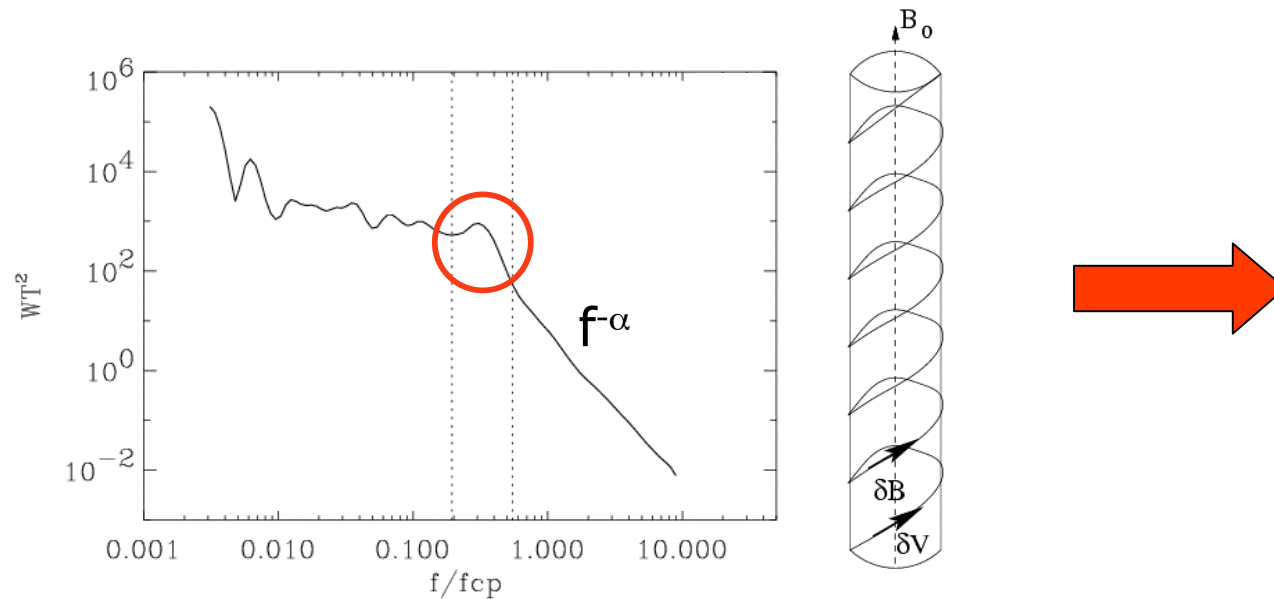
$$a \sim 10 \frac{c}{\omega_{pi}}$$

vortex-dipole



[Alexandrova et al., JGR, 2006]

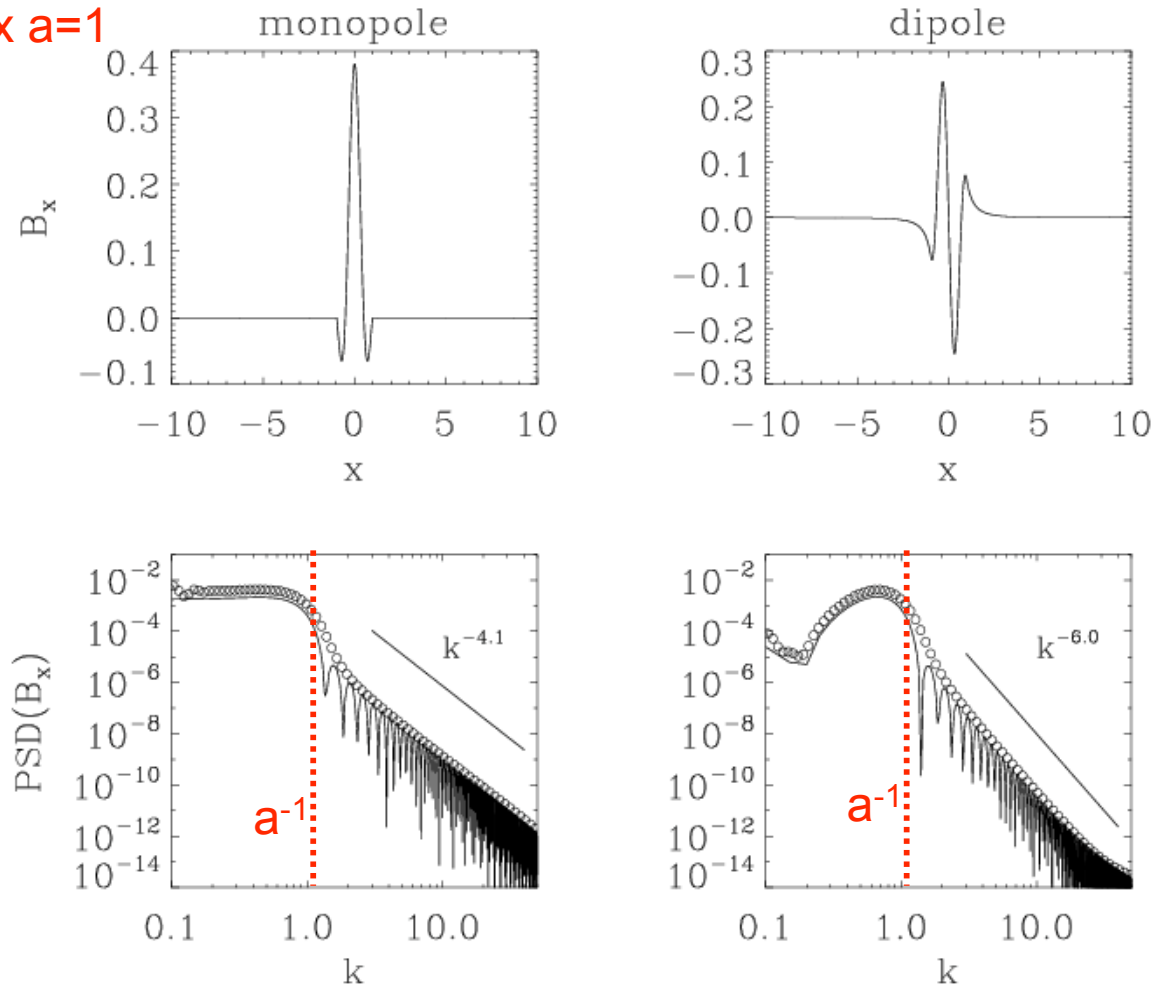
# Presence des vortex d'Alfven dans la turbulence de la magnetogaine



- Why we don't observe the vortices in the solar wind ?
- Applicability of weak turbulence approximation is questionable
- A signature of a strong turbulence ? (anisotropic turbulence in a strong magnetic field  $\Rightarrow$  structures with  $k_{\parallel}=0$ )
- Why they appear in the vicinity of the spectrum junction ?

# Propriétés spectrales des vortex d'Alfvén

rayon du vortex  $a=1$

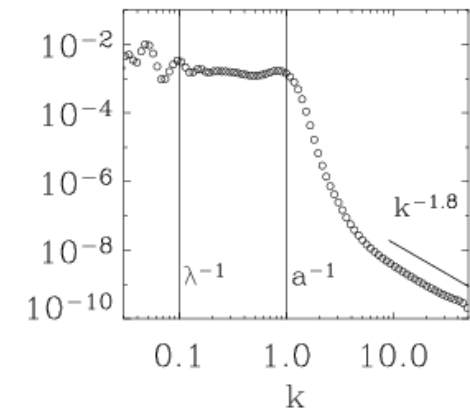
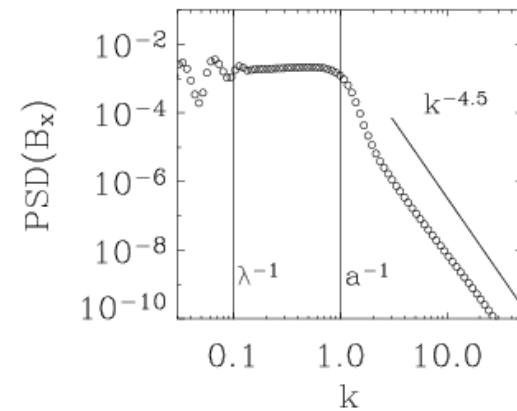
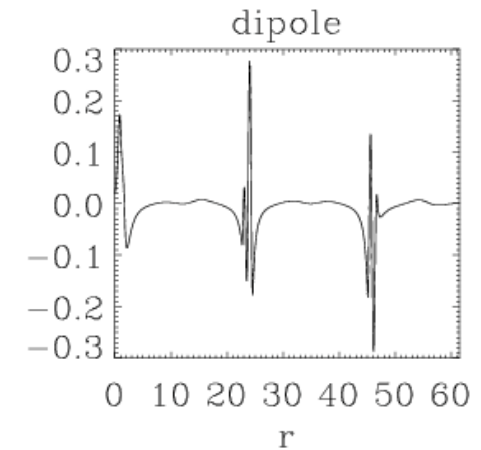
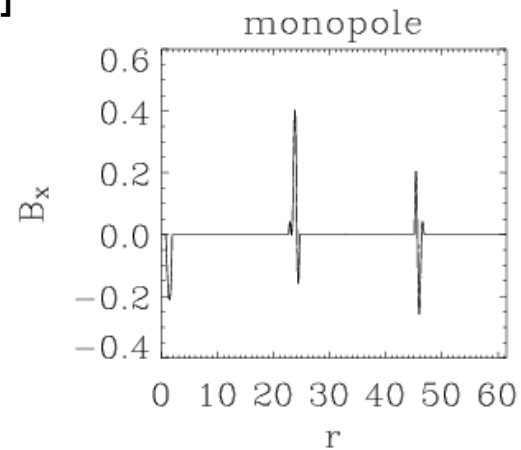
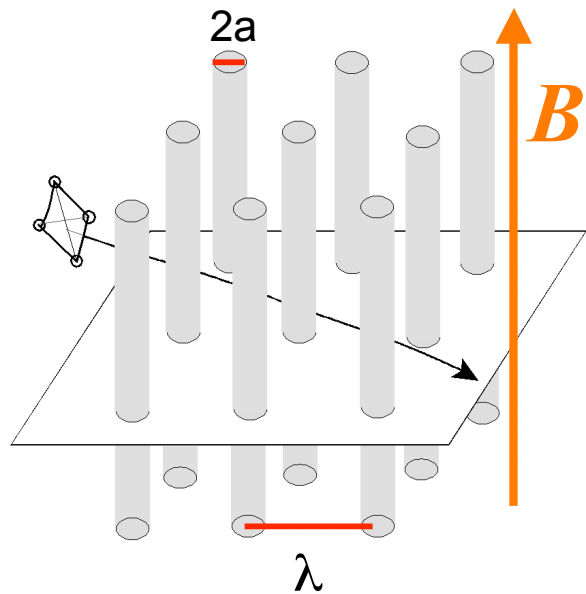


- Bosse spectrale à  $k=a^{-1}$  & law de puissance
- **Monopole**  $\Rightarrow \delta B^2 \sim k^{-4}$  (à cause de courant  $J^2 \sim k^{-2}$ )
- **Dipole**  $\Rightarrow \delta B^2 \sim k^{-6}$  ( $J'^2 \sim k^{-2}$ )



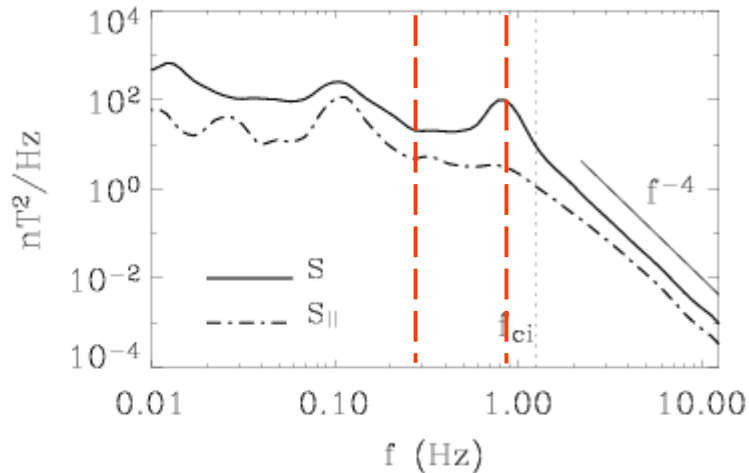
# Propriétés spectrales de réseaux périodique des vortex

[Alexandrova, soumis à NPG]



⇒ plateau entre  $\lambda^{-1}$  et  $a^{-1}$

# Signatures spectrales du réseaux des vortex dans la magnétogaine



- la bosse spectrale autour de  $a^{-1}$   
 $\Rightarrow a \sim 300$  km, i.e.  $a \sim 10 c/\omega_{pi}$
- plateau  
 $\Rightarrow \lambda \sim 1000$  km, i.e.  $\lambda \sim 30 c/\omega_{pi}$
- $f > f_{\text{cassure}}$  :  $\text{spec} \sim f^{-4}$



Vortex d'Alfvén affect le spectre turbulent

Turbulence dans le magnetogaine =  
superposition d'ondes lineairs, fluctuations  
compressibles et vortex d'Alfven incompressibles