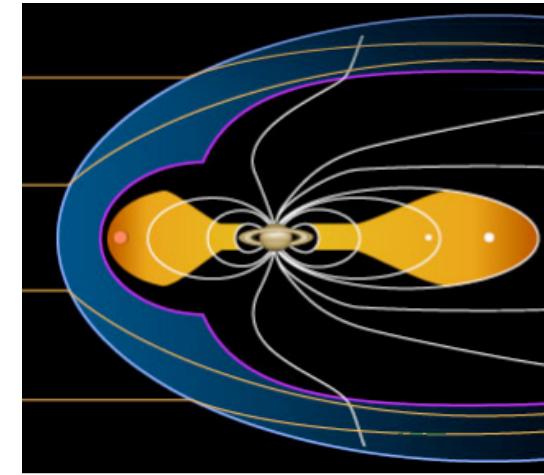
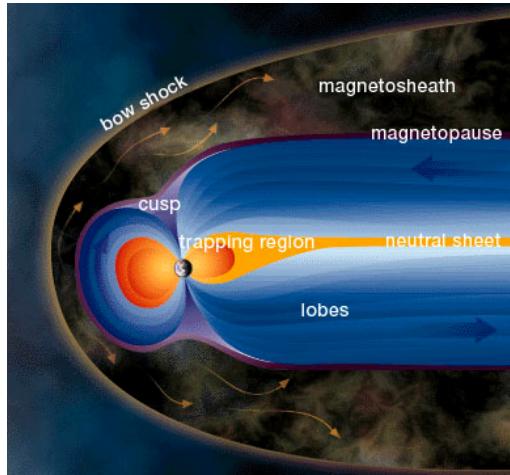


Olga Alexandrova

- 2007-2009 Post-doc à l'Université de Cologne, Allemagne
(fin de financement 09/2009)
- 2005-2007 Post-doc CNES, LESIA, Observatoire de Paris
- novembre 2005: Thèse de doctorat, Université Paris 6, France,
sous la direction d'[André Mangeney](#) et [Milan Maksimovic](#)
- janvier 2003 : Master «Physique de la Terre et des planètes»,
Université d'État de St-Pétersbourg, Russie
- juin 2002 : DEA «Physique des plasmas», Ecole Polytechnique,
France

Thème de recherche

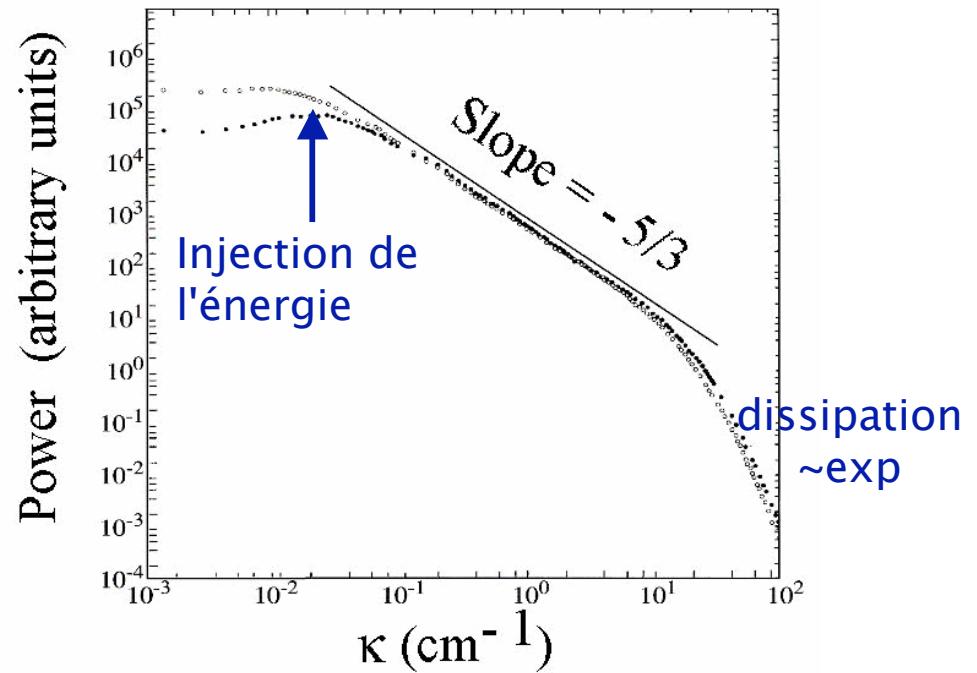
- Plasmas naturels
- Vent solaire, magnétosphères des planètes



Processus physiques:

- Reconnexion magnétique [Semenov, Alexandrova et al., 2002]
- Onde de choc, phénomènes en aval
[Alexandrova et al., 2004 ; Samsonov, Alexandrova et al. 2007]
- Structures magnétiques : vortex d'Alfvén
[Alexandrova et al., 2006; Alexandrova 2008; Alexandrova & Saur, 2008]
- Turbulence aux échelles cinétiques [Alexandrova et al., 2007; 2008a; 2008b]

La turbulence : problème non-résolu de la mécanique classique

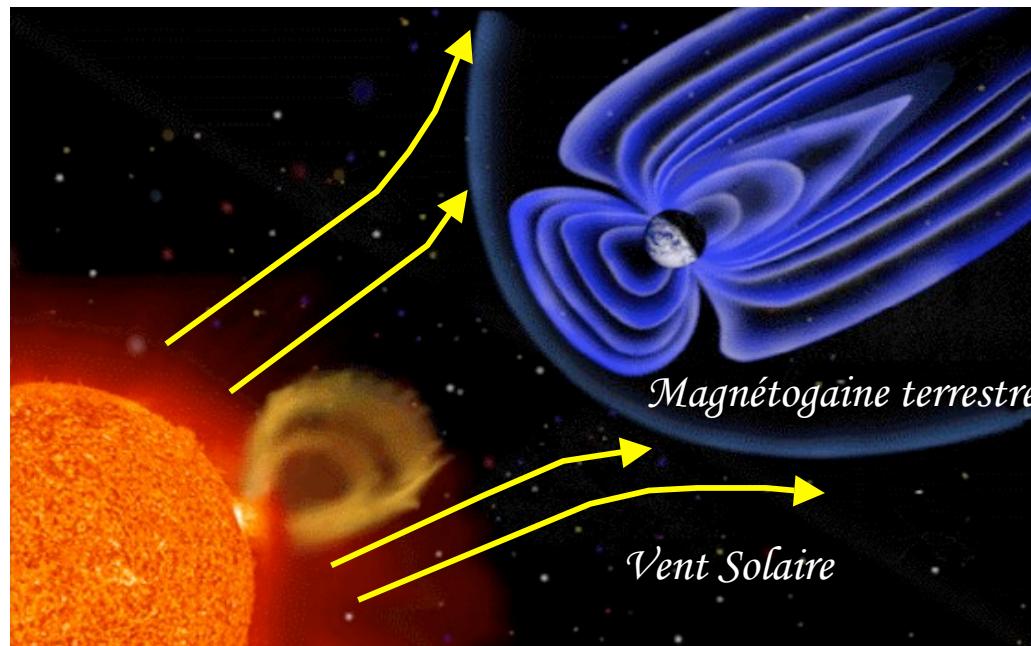


Phénoménologie de Kolmogorov
puissance $dv^2 \sim k^{-5/3}$

- Tourbillons ~ incohérents
- Même physique à toutes les échelles (autosimilarité)

Les Plasmas Astrophysiques généralement turbulents

- Milieu interstellaire, restes de supernovae, ... (δv , δb)
- Les mesures *in situ* sont possibles dans l'héliosphère
 - le vent solaire
 - des régions autour des magnétosphères planétaires



Études du plasma naturel dans l'héliosphère \Rightarrow
compréhension des autres phénomènes en astrophysique

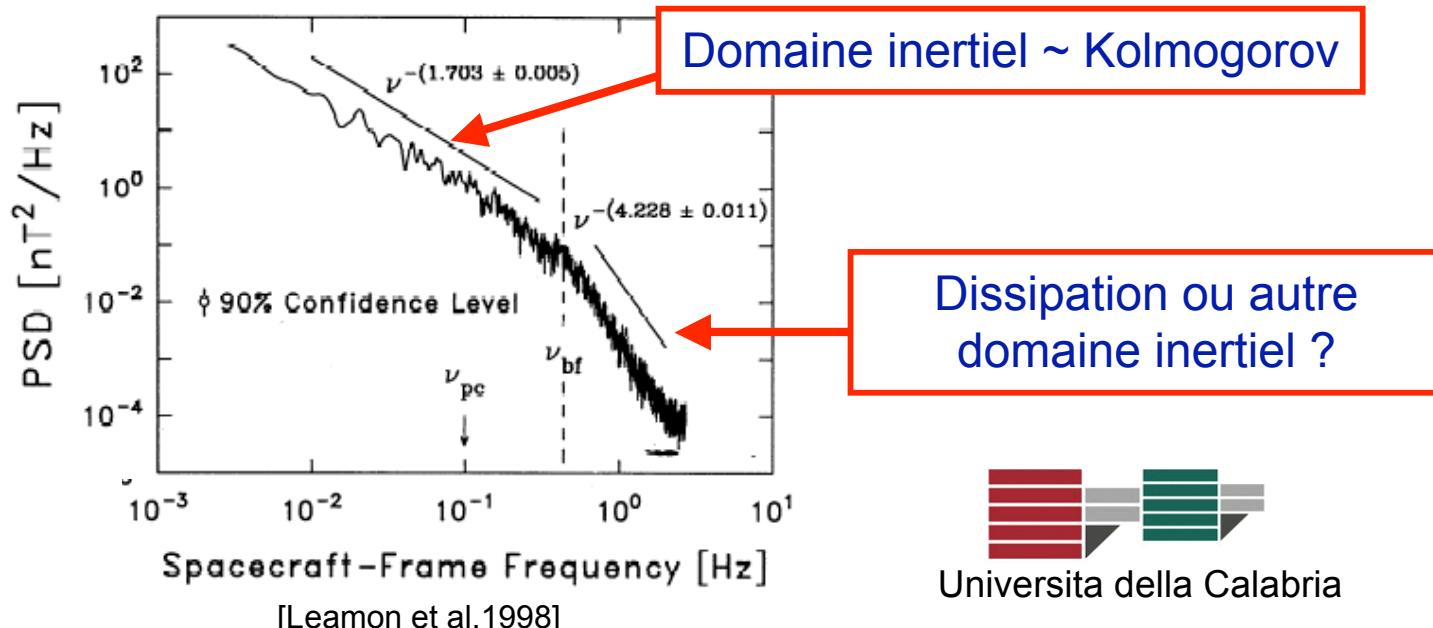
Turbulence dans un plasma astrophysique

- champ magnétique $B_0 \Rightarrow$ anisotropie de la turbulence
- échelles et fréquences caractéristiques
- pas de collisions \Rightarrow dissipation ?

Turbulence dans le vent solaire

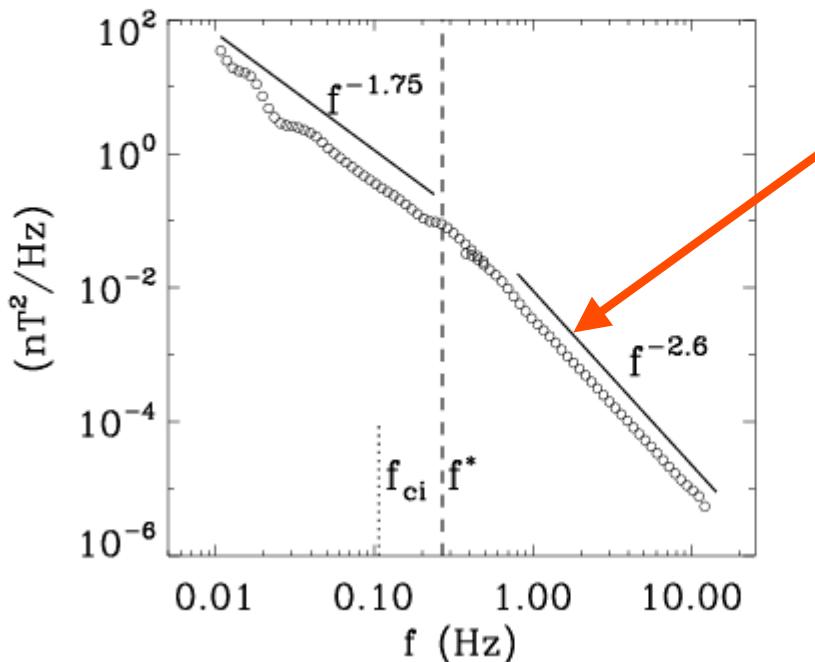
\exists cassure du spectre à la fréquence cyclotronique des ions (gyration des ions autour de B_0)

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



Dissipation vs domaine inertiel : étude des fluctuations magnétiques aux petites échelles

STAFF-SC/CLUSTER: l'instrument le plus sensible pour mesurer δb



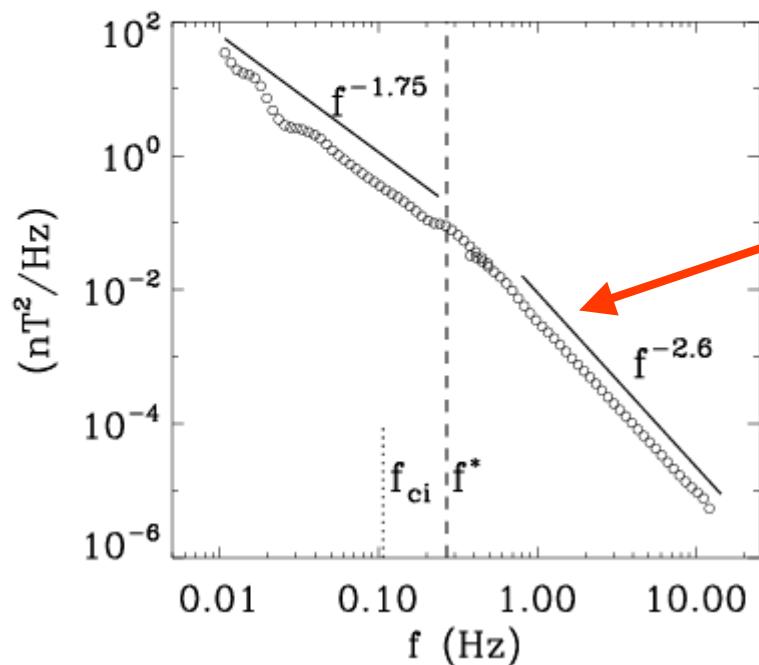
- Spectre \sim loi de puissance (autosimilarité)
- Propriétés des fluctuations similaires à celles du domaine inertiel \sim Kolmogorov

Cascade turbulente aux petites échelles!

[Alexandrova, Carbone, Veltri, Sorriso-Valvo, PSS, 2007]

Cascade aux petites échelles

[Alexandrova, Carbone, Veltri, Sorriso, 2008, ApJ]



$$E \sim k^{-7/3+2\alpha}, -1 < \alpha < 1$$

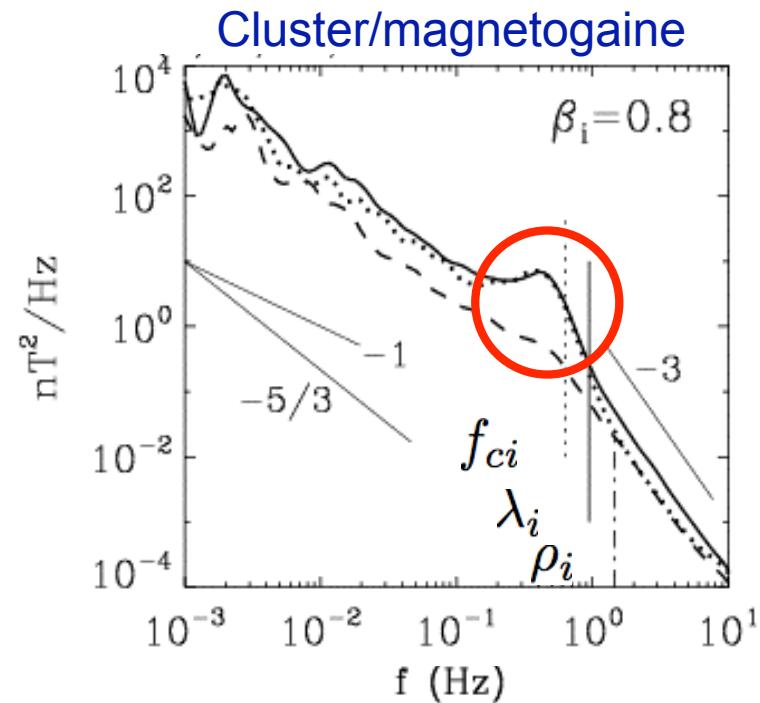
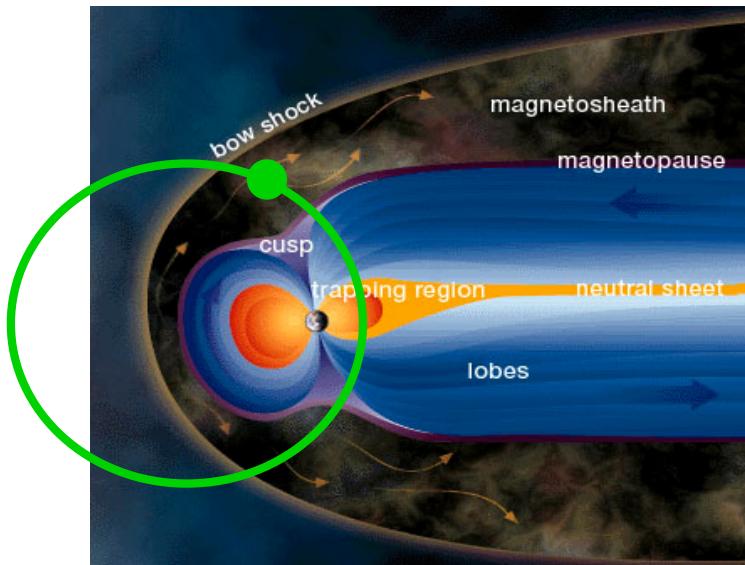
$$\rho_\ell \sim \ell^{-3\alpha}$$

[von Weizsäcker, 1951]

Turbulence interstellaire

- Une nouvelle phénoménologie Hall-MHD compressible
- Explication des variations de la pente spectrale entre -4 et -2 dans le vent solaire suivant les différents niveaux de compressibilité

La magnétogaine terrestre – région turbulente

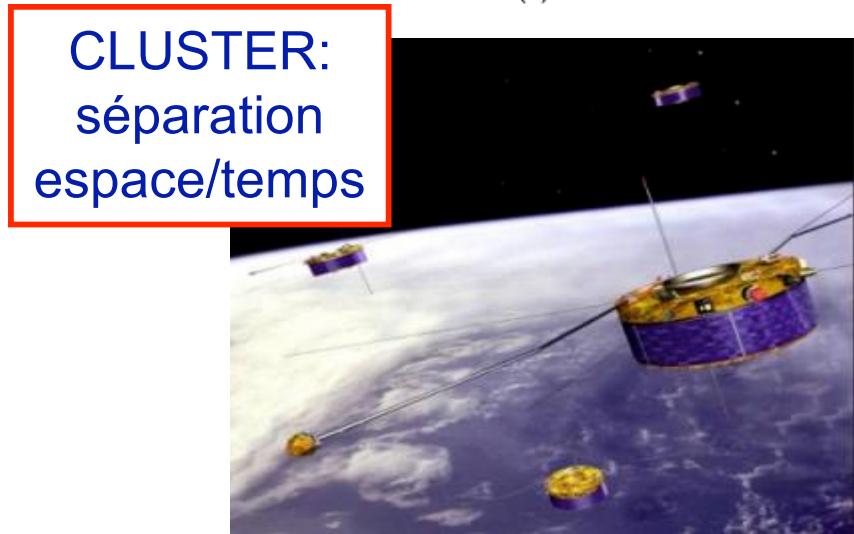
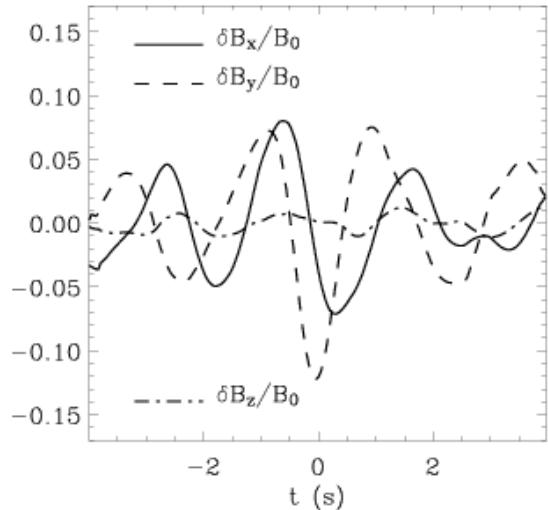


Passage d'une cascade turbulente à l'autre est accompagné par une bosse sur la cassure



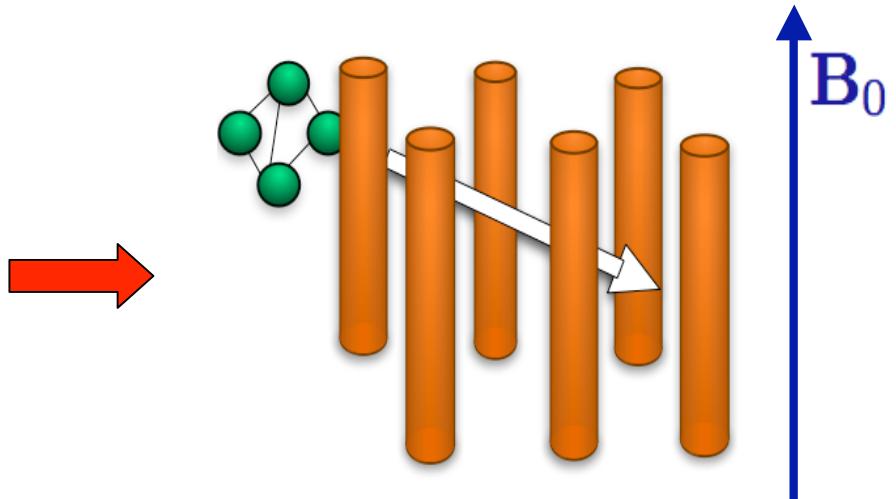
Qu'est-ce que cette bosse ?

Nature de la bosse spectrale



- Avant CLUSTER, interprétation en termes d'ondes planes
- J'ai montré grâce à la résolution spatiale de CLUSTER que **la bosse = structures cylindriques**

[Alexandrova et al., JGR, 2006]

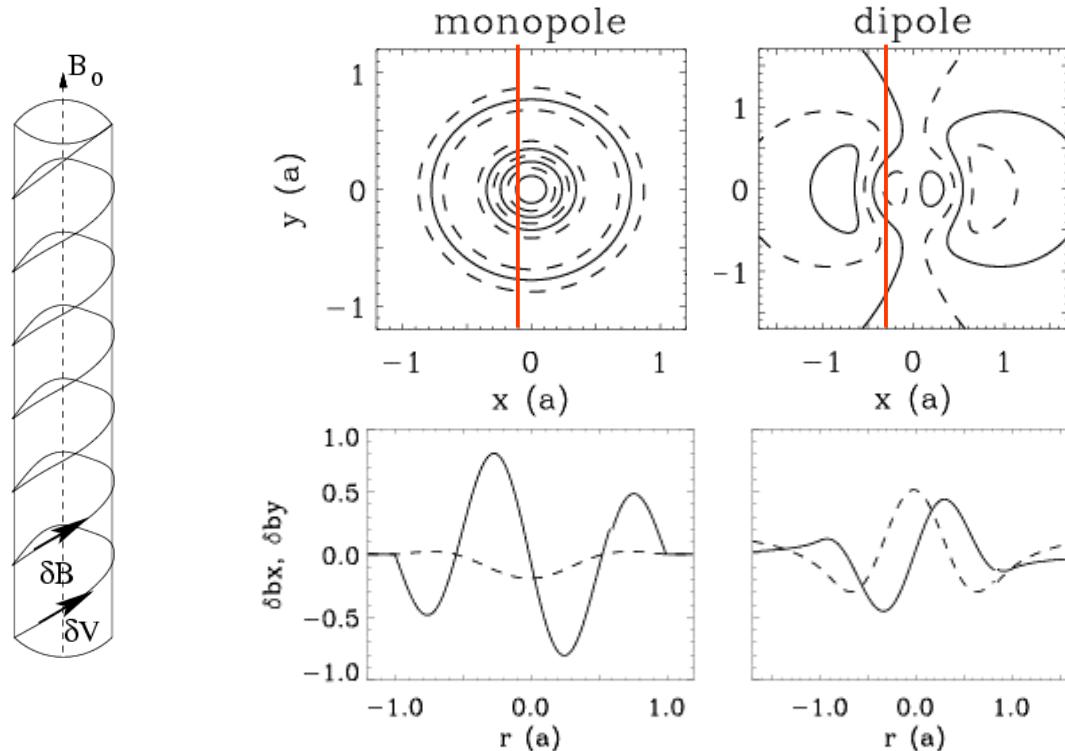


J'ai pu montrer que ces structures cylindriques sont des vortex d'Alfvén

Vortex magnétique d'Alfvén

Solutions **non-linéaires** MHD incompressible

- onde d'Alfvén cylindrique ($k_{\perp} \gg k_{||}$), $\delta v \parallel \delta b$
- analogues aux vortex HD incompressible



C'est la 1ère fois que les vortex d'Alfvén sont identifiés dans un plasma astrophysique !



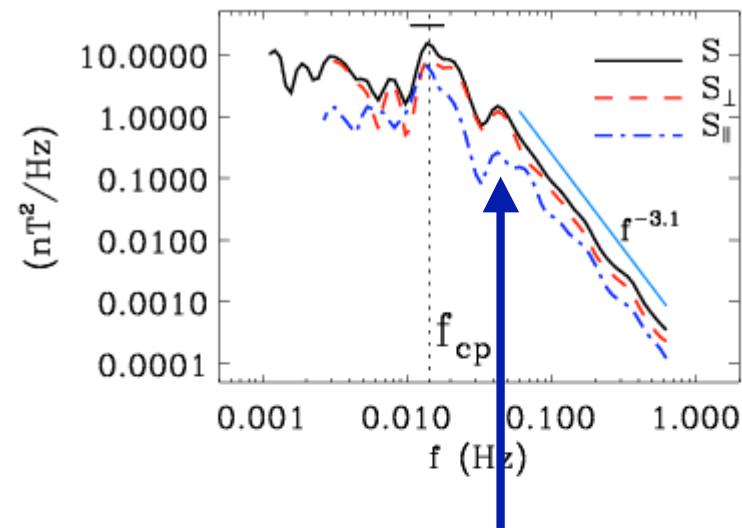
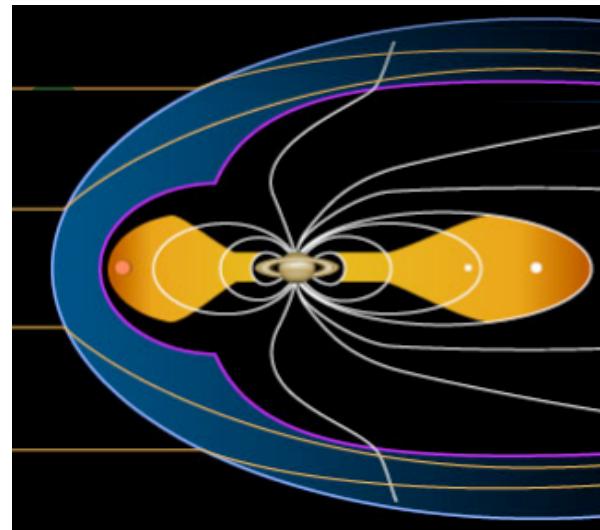
Universität zu Köln

Vortex d'Alfvén ailleurs qu'en aval du choc terrestre ?

[Alexandrova & Saur, 2008, GRL]



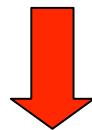
En aval du choc de Saturne (mission Cassini)



Signature des vortex d'Alfvén sur les échelles proches de celles
des vortex terrestres ($10c/\omega_{pi}$)

NB: malgré d'importantes différences de propriétés du plasma !

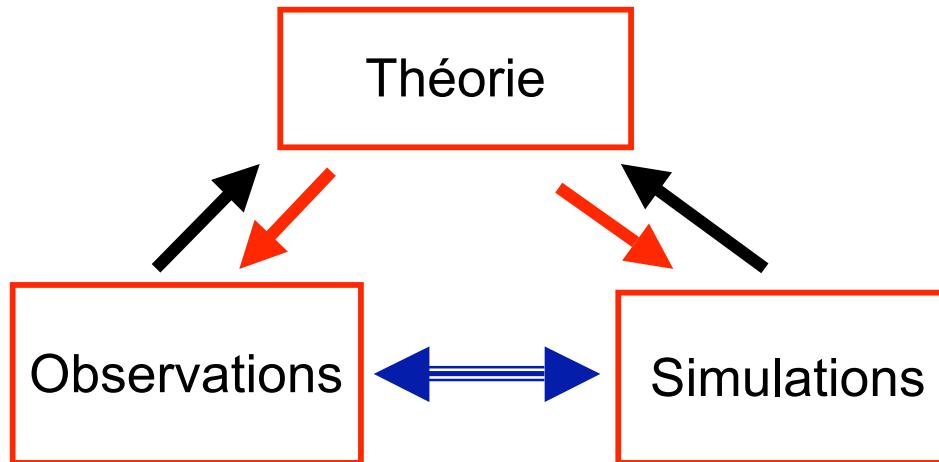
Observation des vortex en aval des chocs de la Terre et de Saturne



- Mécanisme de génération des vortex ?
- Stabilité des vortex ?
- Universalité en astrophysique ?
- Influence sur les particules ?

Projet de recherche :

Étude de la turbulence dans les plasmas astrophysiques



Mono-satellite : Wind, Ulysses (Solar Orbiter)

Sondes multiples: Cluster, THEMIS, STEREO
(MMS, Cross-Scale)

Autres planètes:
Cassini, MGS, Venus express (BepiColombo)

- MHD

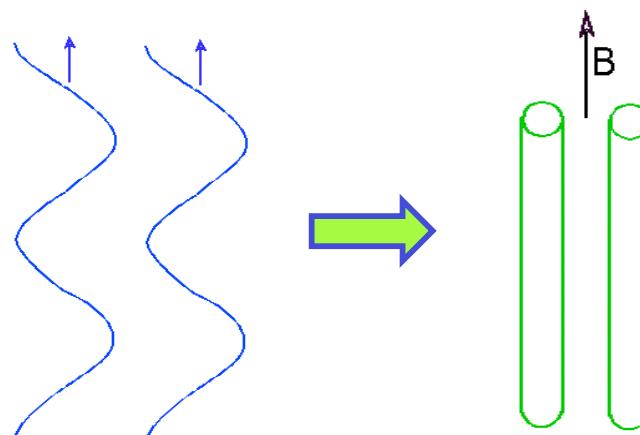
mais $k_c/\omega_{pi} \sim 1$

- MHD-HALL, Hybride

Projet de recherche à court terme

Mécanisme de génération des vortex

1. Instabilité de filamentation de l'onde d'Alfvén
[Laveder et al., 2002]



cas observé : [Alexandrova et al., 2004, JGR]

Simulations numériques (programme EGIDE-Barrande)

- code Hybride [avec P. Hellinger et P. Travnicek, Prague]
- code Hall MHD [avec T. Passot et P. L. Sulem, OCA]

Mécanisme de génération des vortex

2. Rôle du choc dans génération des vortex ?

- Étude statistique des traversées de la magnétogaine de la Terre (avec V. Genot, E. Budnik et C. Jacquay, AMDA/CDPP*)

Courbure du choc ⇒
injection de vorticité et
du courant en aval ?

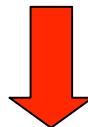


- Simulations numériques (avec P. Hellinger, Prague)

*CDPP (Centre des Données de Physique de Plasma);
AMDA (Automated Multi Dataset Analysis)

à plus long terme

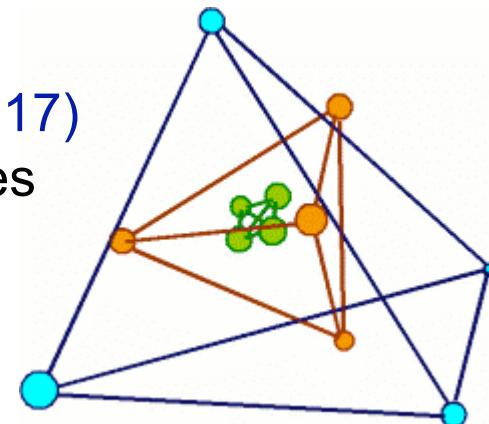
Vortex magnétique : propriété universelle de la turbulence en astrophysique ?



- Les vortex sont-ils présents dans le vent solaire ?
(Cluster, THEMIS, Wind, Ulysses, Solar Orbiter)
- Étude de la turbulence près des autres planètes :
Mercure (BepiColombo), Venus (Venus Express), Mars
(MGS), Jupiter, Saturne (Cassini)
- Éjections de masse coronale (STEREO)

Influence de la turbulence sur les particules : processus dissipatifs

- Dynamique des ions ⇒ simulations numériques de type Hybride [collaboration avec P. Hellinger]
- Dynamique des électrons ⇒ futures observations avec MMS (**Magnetospheric MultiScale mission**, 2014)
mesures des fonctions de distributions avec la résolution temporelle = résolution des formes d'ondes !
- **Mission Cross-Scale** (*assessment study*, ESA, 2017)
 - mesures simultanées de micro à macro échelles
 - objectifs : turbulence, reconnexion, chocs



Impact important en astrophysique

Tâches de services

- SO2: Etalonnage de SORBET/BEPI-COLOMBO
- SO5: Développement des services d'analyse multi-points au CDPP

Préparation de l'expérience SORBET de BepiColombo (SO2)

- BepiColombo : mission vers Mercure (ESA/JAXA)
- Lancement en 2014, arrivée en 2020
- Le LESIA est le PI de SORBET (mesures des émissions radio 2.5kHz-10.2MHz)
- Construction de l'instrument en 2009



Ma tâche : étalonnage de SORBET

Passage des valeurs de télématétrie aux valeurs physiques (détermination de la fonction de transfert des récepteurs).

À plus long terme : Préparation de l'expérience RPW de Solar Orbiter (SO2) (2017)

Développement d'outils d'analyse multi-satellites au CDPP* (SO5)

- Cluster et THEMIS ⇒ une des clefs du succès actuel du CDPP
- MMS (2014, 4 s/c) et Cross-Scale (2017, 10 s/c) : missions multi-satellaires à haute résolution
- Le CDPP a besoin de développer des outils spécialisés pour l'analyse des données multi-points.

Ma tâche à court terme : expertise dans le développement d'outils

À plus long terme : responsabilité de développement des outils pour MMS et éventuellement pour Cross-Scale

*Centre des Données de Physique de Plasma

Enseignement académique

- 2004-2005 ⇒ Cours et TDs en math. à l'IUT de Vélizy (2ème année)
- mars 2007 ⇒ Cours en M1 de l'Observatoire de Paris «Missions spatiales dans le système Soleil-Terre»
- 2008 ⇒ Tutorat à l'Université de Cologne
- Encadrement

Grand public

- 2004-2007 ⇒ Visites guidées de l'Observatoire de Meudon
- 2003-2004 ⇒ Fêtes de la science à l'Observatoire
- 2004-2006 ⇒ Accueil des étudiants de M2 (visite au laboratoire)
- juin 2007 ⇒ journée portes ouvertes IHY

Projet

- Cours «Plasma Astrophysiques I», M2, Paris XI
- Cours «Missions spatiales dans le système Soleil-Terre», M1, OBSPM
- L'enseignement académique universitaire (contact pris avec Prof. Laurence Rezeau, l'Université Paris VI)

Contributions

- 12 articles de rang A (dont 7 premier auteur, 2 deuxième, 1 soumis)
- 2 proceedings (en premier auteur)
- 10 communications invitées lors des colloques internationaux
- 10 séminaires invités
- plus de 30 autres communications

Collaborations

[Observatoire de Paris](#) : A. Mangeney, M. Maksimovic, C. Lacombe, R. Grappin, N. Cornilleau

[Observatoire de Nice](#) : T. Passot, P. L. Sulem

[CESR](#) : C. Mazelle, I. Dandouras, E. Budnik, V. Genot, C. Jacquay

[Université de Pise, Italie](#) : F. Califano

[Université de Calabre, Italie](#) : P. Veltri, V. Carbone, L. Sorriso-Valvo

[Imperial College, UK](#) : E. Lucek, T. Horbury

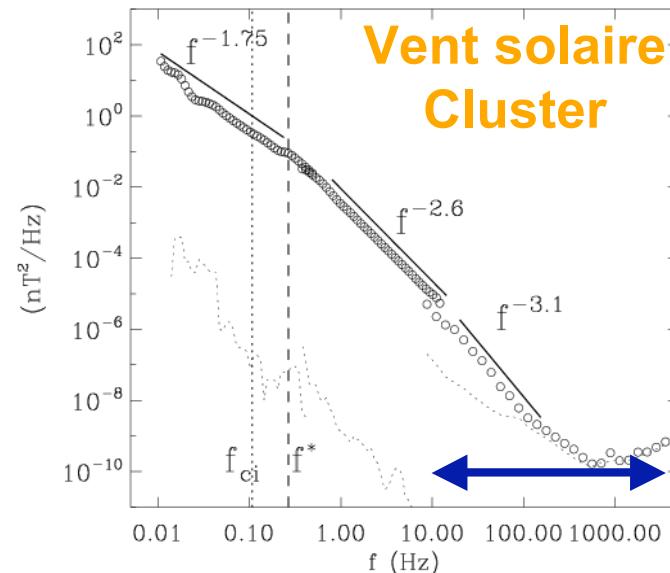
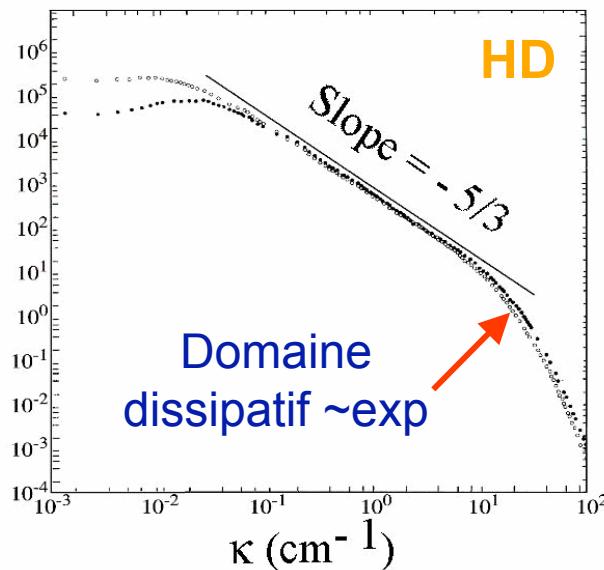
[IAP, République Tchèque](#) : P. Hellinger, P. Travnicek

[Université de St-Pétersbourg, Russie](#) : A. Samsonov, V. Semenov

[Université de Cologne, Allemagne](#) : J. Saur

Dissipation de l'énergie turbulente dans un plasma sans collisions ?

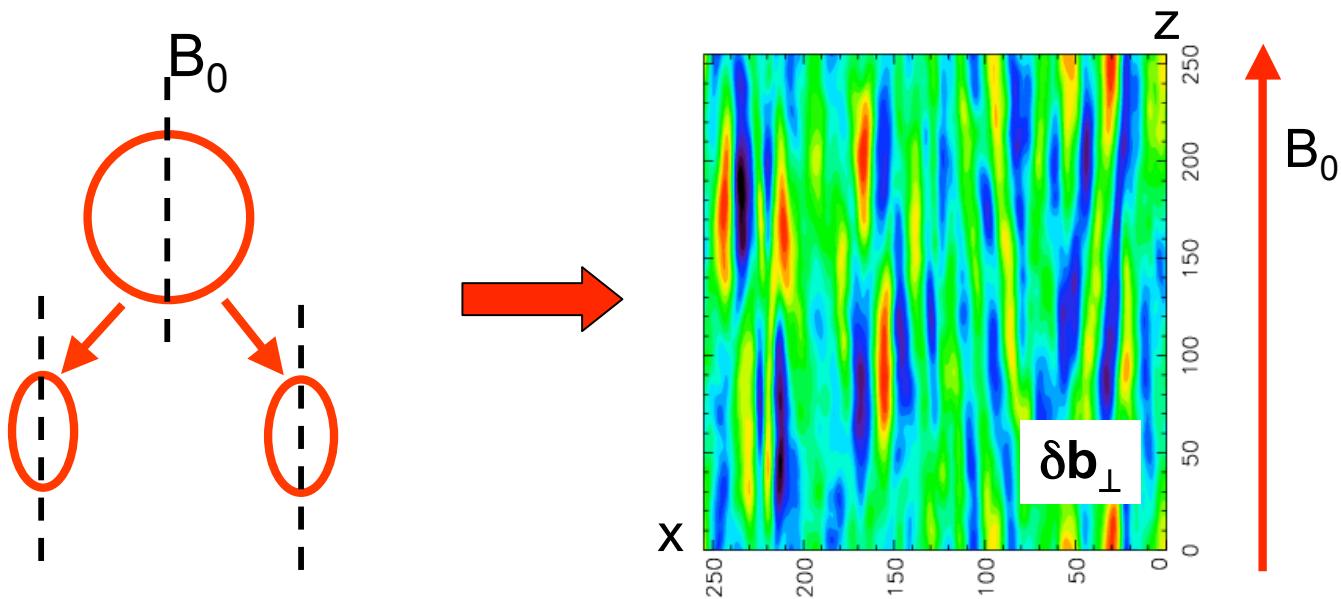
- Hydro: début du domaine dissipatif $k \sim 1/l.p.m.$
- Vent solaire : $l.p.m. \sim 1$ UA
- Pas de dissipation sur des échelles ii \Rightarrow sur des échelles ee?



- Étude des spectres sur Cluster (A. Mangeney, M. Maksimovic, LESIA)
- Analyses des δB avec 5s/c THEMIS (O. Le Contel, LPP)
- SolarOrbiter (M. Maksimovic, LESIA)
- Cross-Scale (mesures simultanées de micro à macro échelles)

Mécanisme de génération des vortex

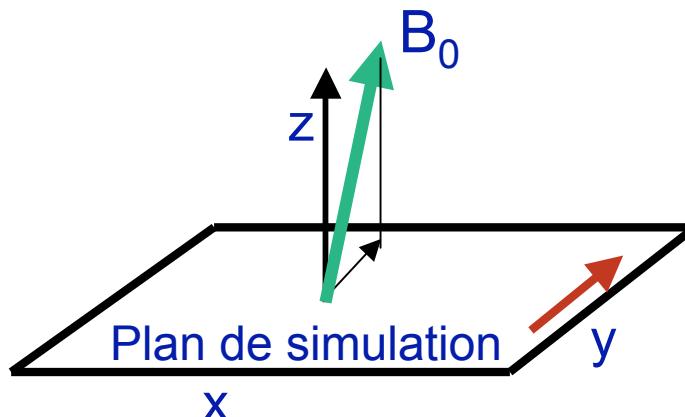
3. Développement de la turbulence dans le plasma
avec un champ magnétique fort ($L_{\parallel} \gg L_{\perp}$)



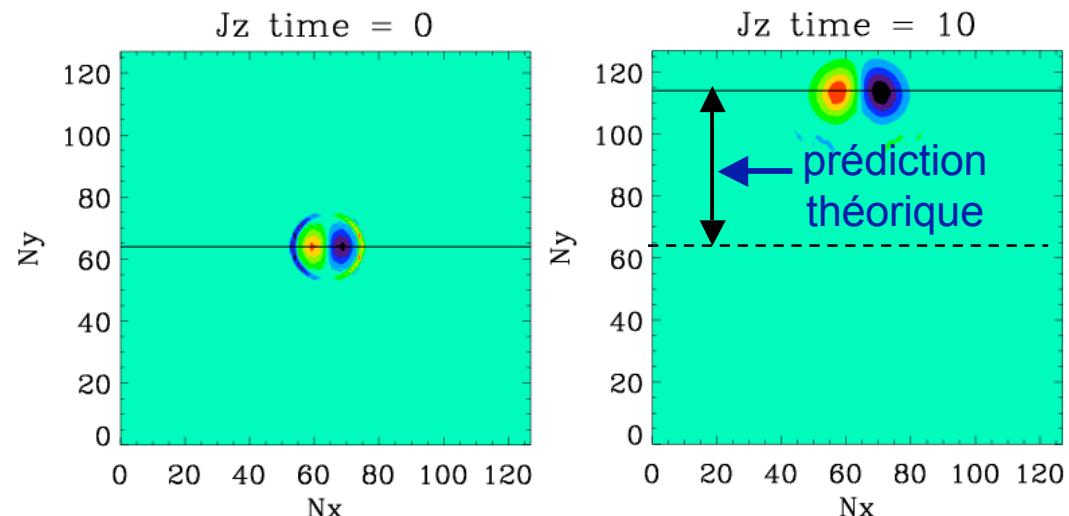
- Simulations 2D Hall-MHD, en collaboration avec F. Califano, Université de Pise
- Simulations 3D Hall-MHD sont prévues en collaboration avec S. Servio & P. Veltri, Université de Calabre

Stabilité des vortex d'Alfvén simulations 2D MHD compressible

- Collaboration avec R. Grappin [Observatoire de Paris]



y - sens de propagation du vortex



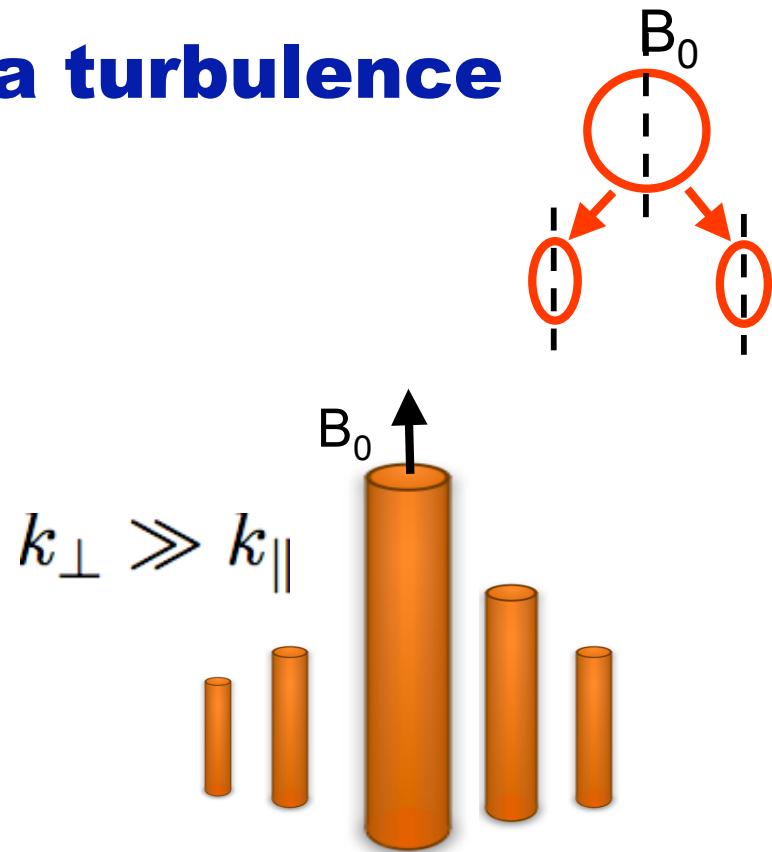
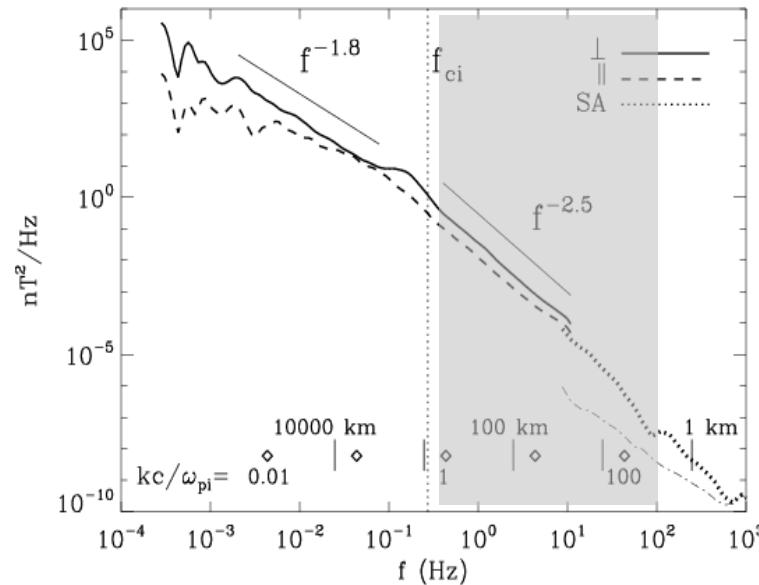
Résultats des simulations:

- Vortex survit \Rightarrow stabilité dans le plasma compressible
- Se propage avec la vitesse prédite par la théorie incompressible

[Alexandrova et Grappin, 2009, en prep.]

Anisotropie de la turbulence

Observations in situ par
STAFF-SA & FGM/Cluster

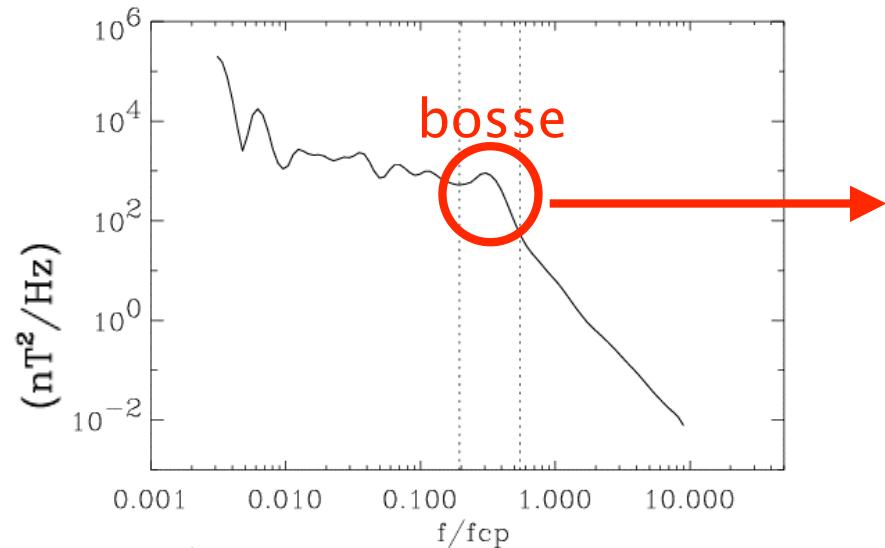


Première évidence de la nature 2D de la turbulence
sur des échelles cinétique de plasma.

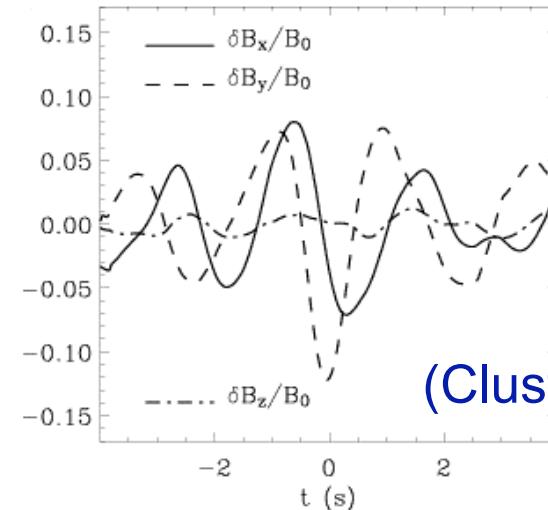
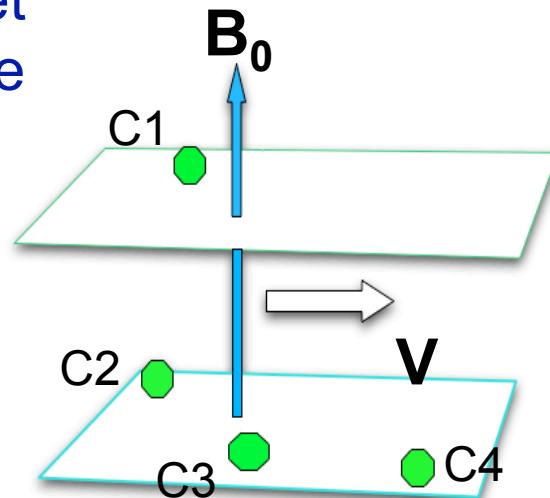
[Alexandrova et al., 2008, AnGeo; Mangeney et al., 2006, AnGeo]

Bosse spectrale : filaments magnétiques

[Alexandrova et al., 2006, JGR]

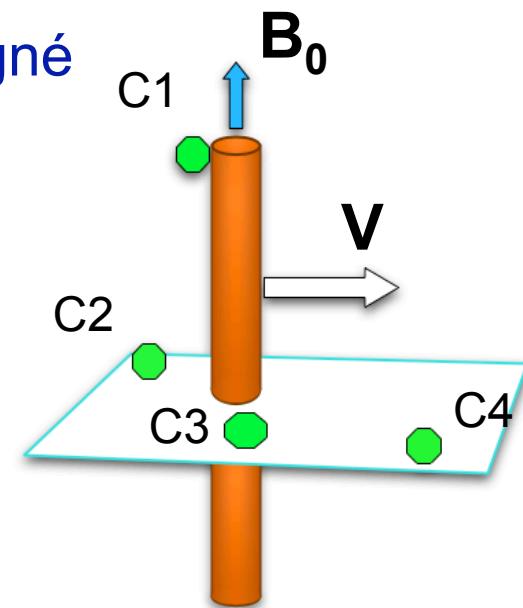


paquet
d'onde



(Cluster 4s/c)

courant aligné
avec \mathbf{B}_0



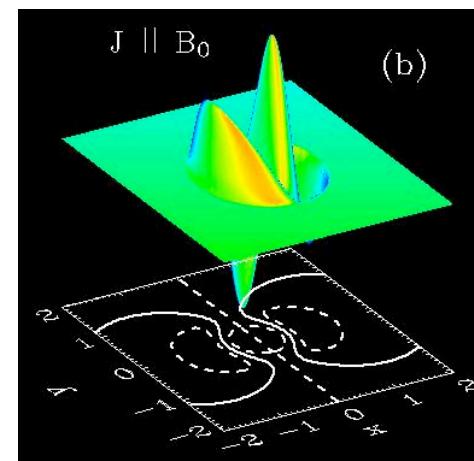
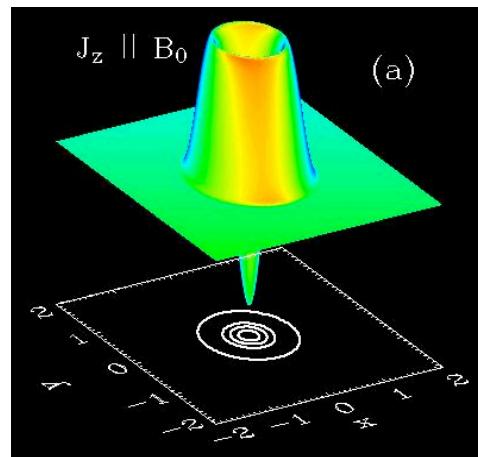
Alfvén vortices \sim 2D HD vortices

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

=

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

Vector potential, A , \sim to stream function \Rightarrow
field lines \parallel stream lines & current \parallel vorticity



**Monopole \sim force free
current, standing structure**

**Dipole \sim two inversed
currents, propagates**

[Petviashvili & Pokhotelov, 1992]

Localized solutions of 2D incompressible Navier-Stokes equation

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

ω - vorticity & Ψ - stream function

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

Particular case:

slow variations & vorticity is localized in a circle of the radius a

$$\begin{cases} \Delta \Psi + k^2 \Psi + c = 0, & r < a \\ \Delta \Psi = 0, & r \geq a \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{- Helmholtz's equation} \\ \text{- Laplace's equation} \end{array}$$

monopole

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

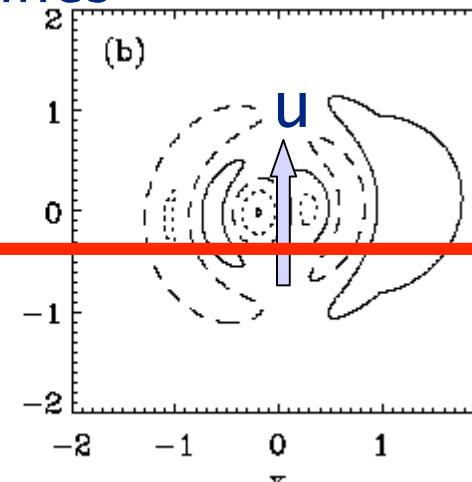
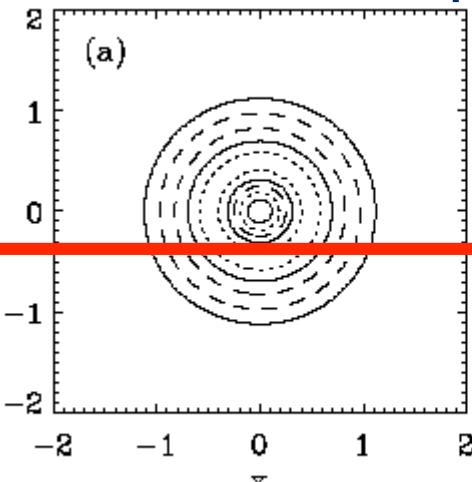
dipole

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

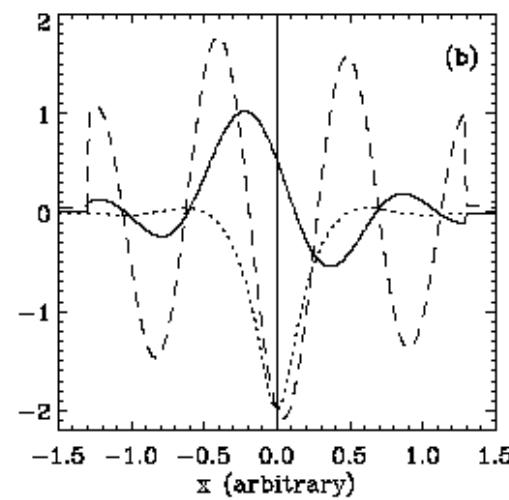
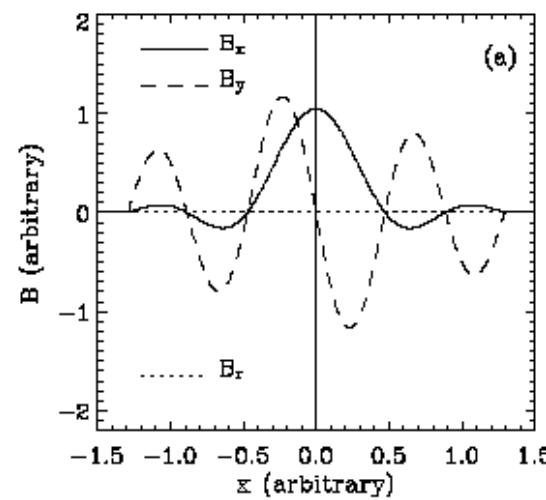
vortex-dipole

Field lines

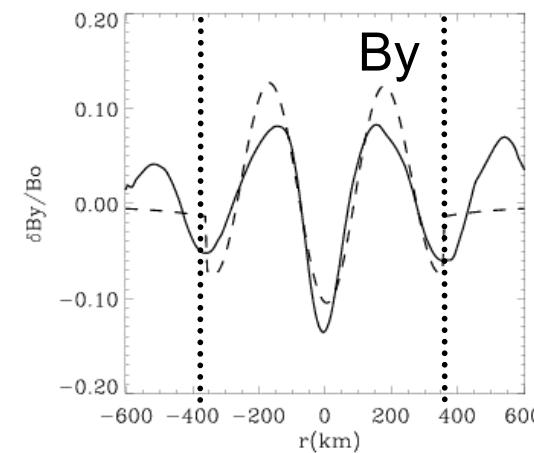
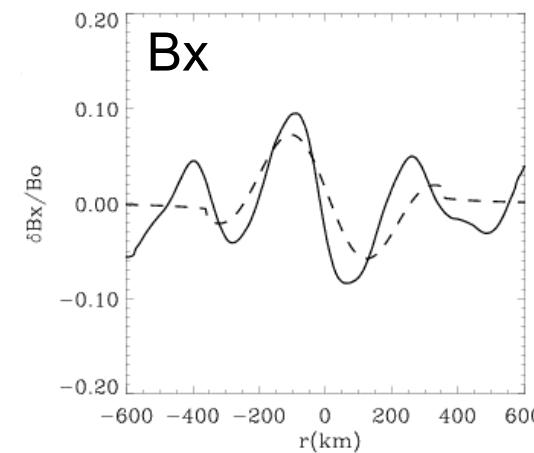
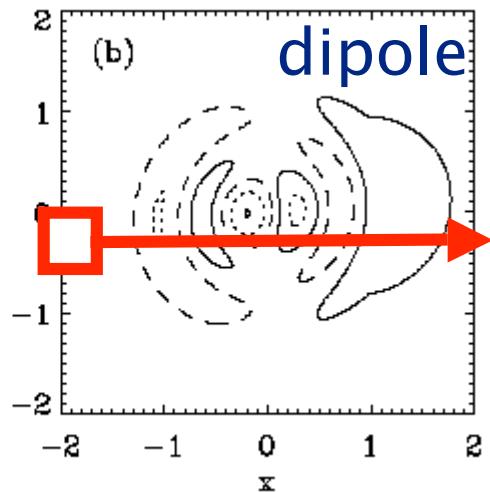
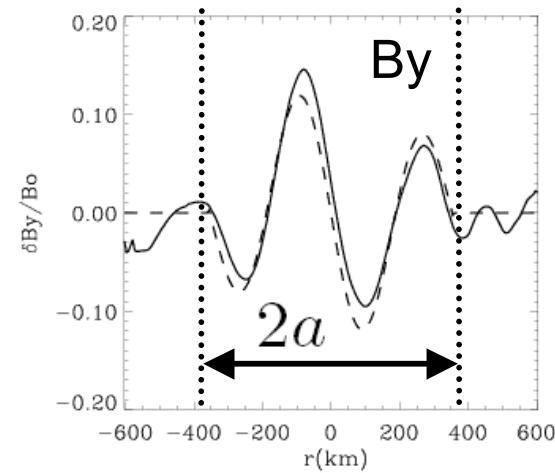
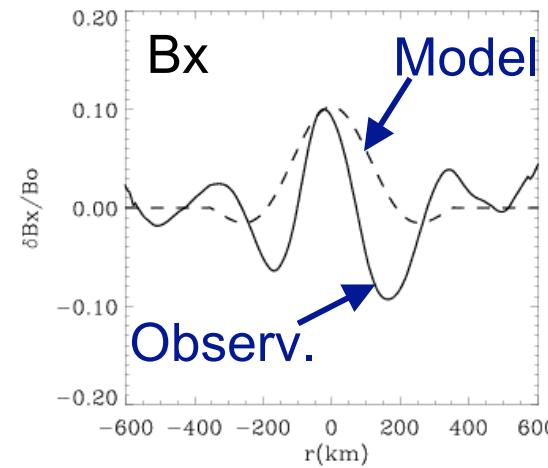
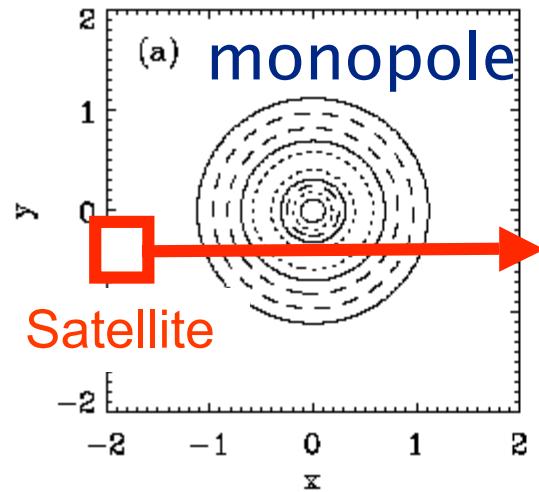
Satellite



Measured waveforms



In the Earth's magnetosheath we observe both vortex types !

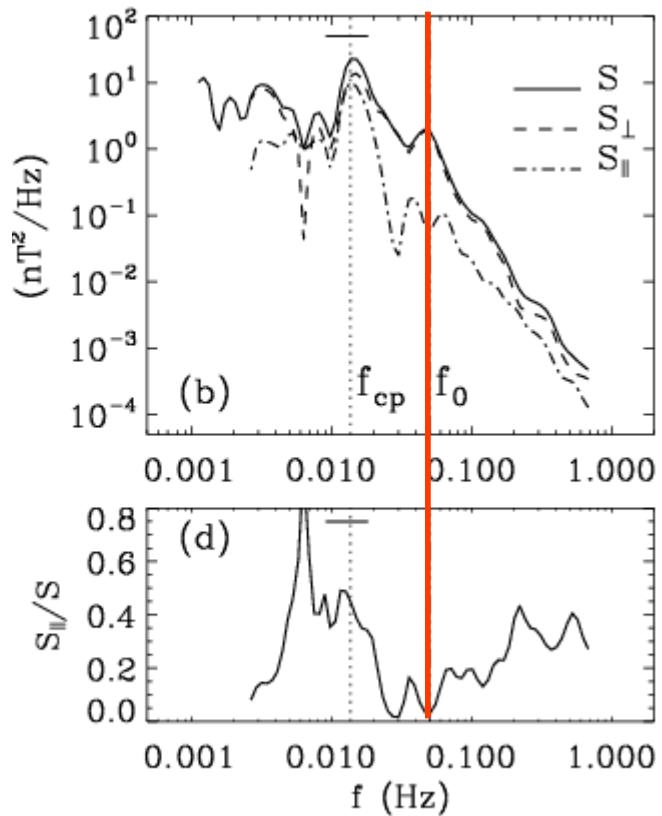


[Alexandrova et al., JGR, 2006]

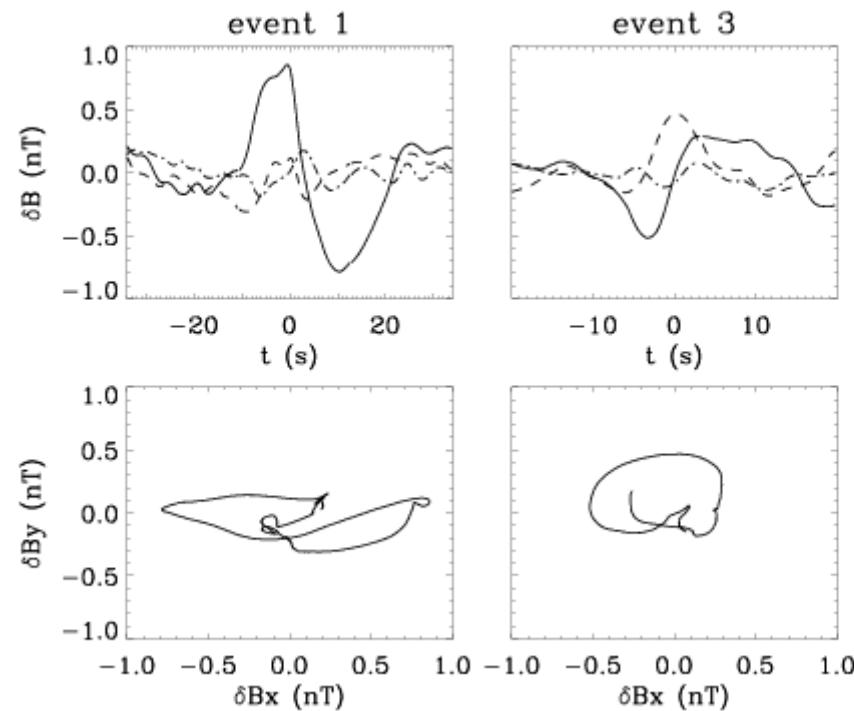
$$a \sim 10 \frac{c}{\omega_{pi}}$$

Alfvenic events in the Kronian magnetosheath

zoom around an event

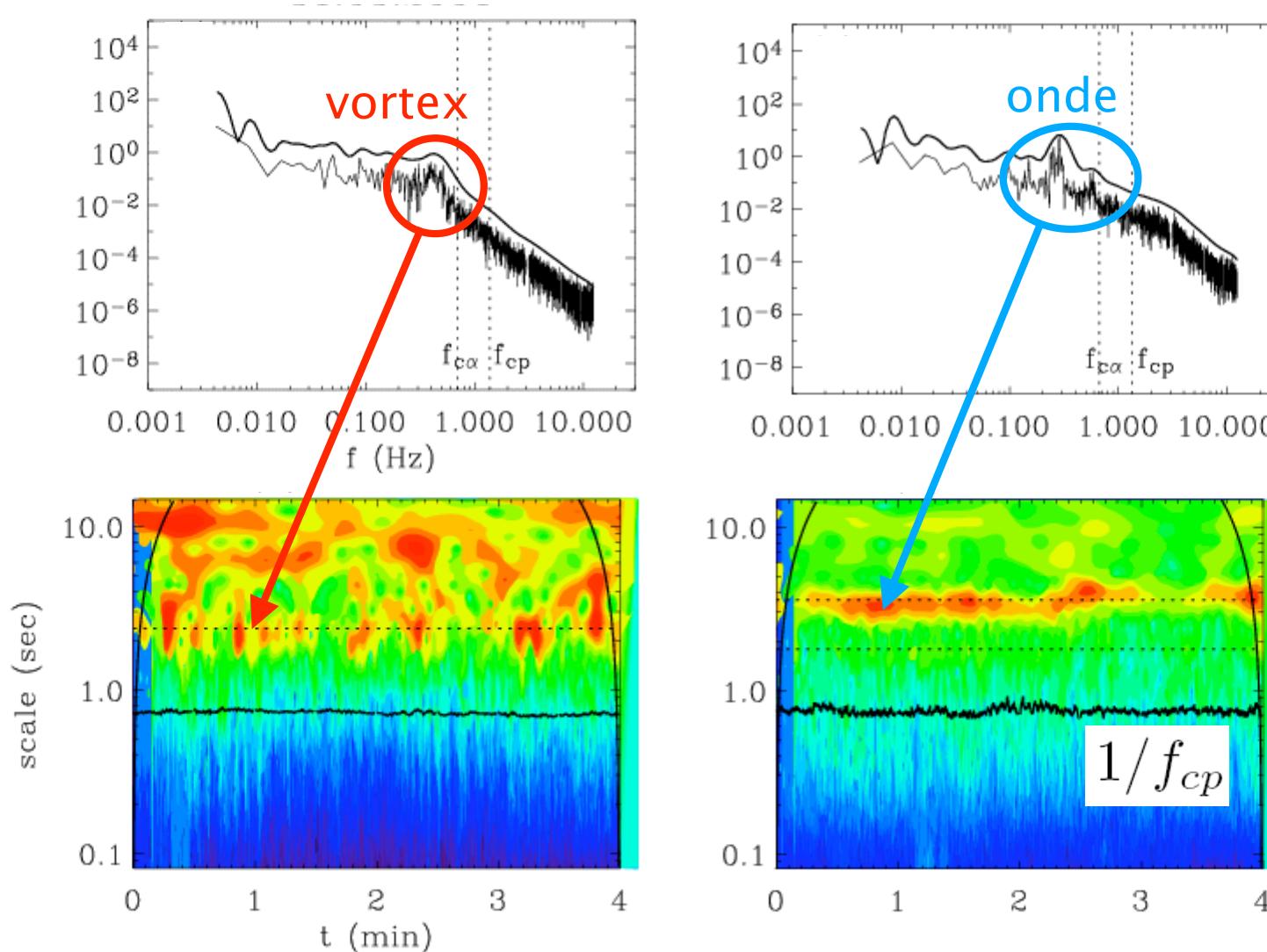


[Alexandrova & Saur, 2008, GRL]

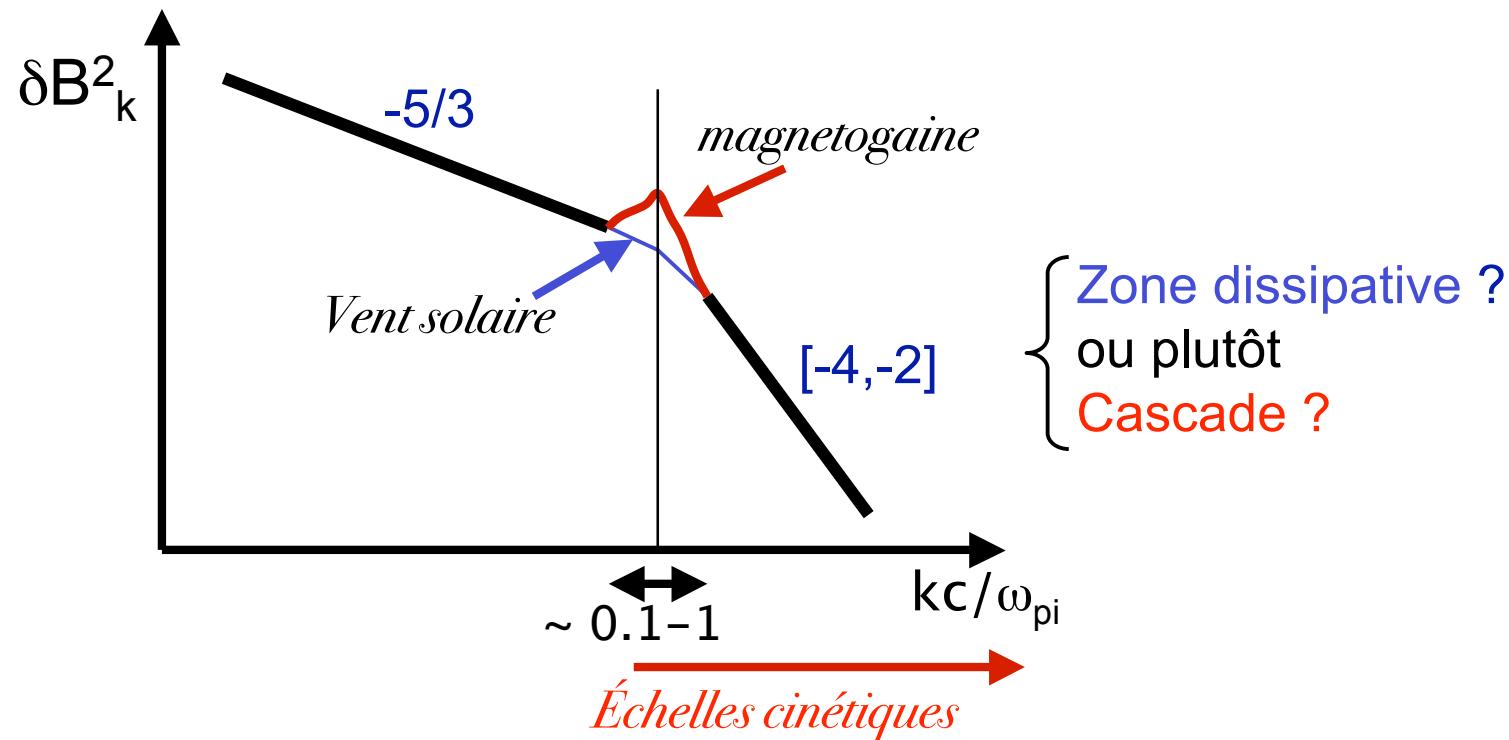


- There is a spectral knee around f_0 where S_\parallel/S goes to zero
- Coherent, time localized fluctuation

L'intérêt de la décomposition en ondelettes (comparaison avec FFT)



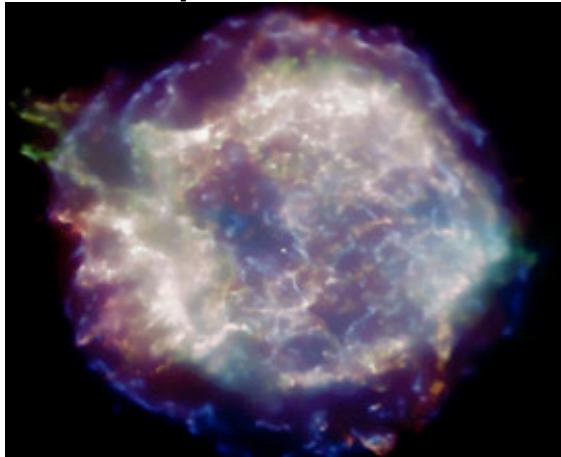
Turbulence dans un plasma astrophysique



Supernova

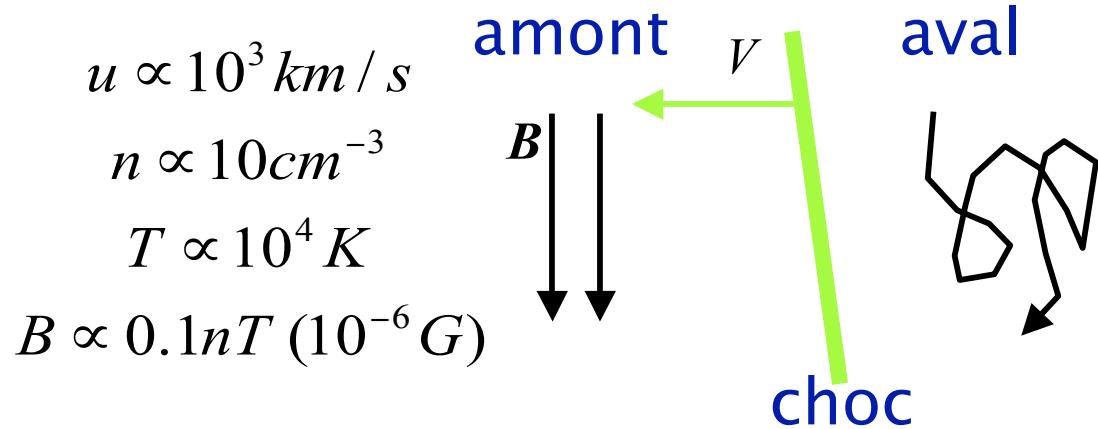
Les chocs sans collisions sont des sources de particules énergétiques (rayonnement intense X, Gamma)

Cassiopeia A



$$\begin{aligned}u &\propto 10^3 \text{ km/s} \\n &\propto 10 \text{ cm}^{-3} \\T &\propto 10^4 \text{ K} \\B &\propto 0.1 n T (10^{-6} \text{ G})\end{aligned}$$

$$M_S \approx 10-100$$



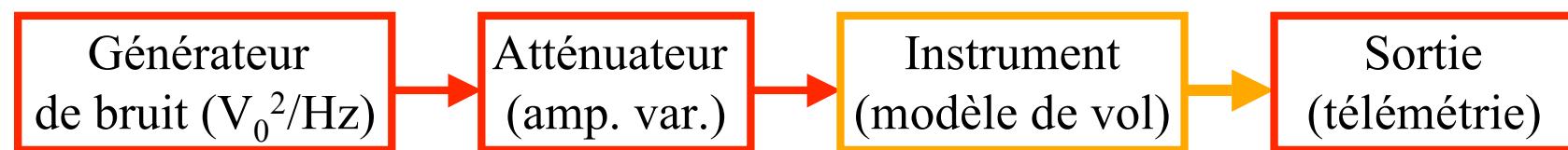
Les particules sont accélérées par un battement entre les flux amont-aval (accélération de Fermi), ou en aval – les fluctuation incohérentes

Préparation de l'expérience SORBET de BepiColombo (SO2)

Ma tâche : étalonnage de SORBET

(mesures des émissions radio 2.5kHz-10.2MHz)

Passage des valeurs de télémestrie aux valeurs physiques
(détermination de la fonction de transfert des récepteurs).



Testes dans le laboratoire pour
- différentes fréquences
- différentes températures