

---

Candidature à un emploi d'astronome adjoint

Concours CNAP 2009

Olga Alexandrova

---

Ce dossier contient :

- ◁ Curriculum Vitæ, page 2
- ◁ Liste de publication et de communication, page 4
- ◁ Activités de recherche, page 10
- ◁ Activités d'enseignement, page 20
- ◁ Service d'observation, page 22
- ◁ Projet de recherche, page 25

## Olga ALEXANDROVA

Institut für Geophysik und Meteorologie  
Universität zu Köln  
Zülpicher Str. 49a, D-50674 Köln  
Tel : +49 221 470 2556  
Fax : +49 221 470 5198

née le 6 janvier 1978  
31 ans, mariée  
nationalité russe  
alex@geo.uni-koeln.de  
www.geophysik.uni-koeln.de/oa

### Intérêts scientifiques

Turbulence dans les plasmas astrophysiques sans collisions : diagnostics in situ dans le vent solaire et l'environnement magnétisé des planètes, modélisation théorique et numérique.

### Expérience professionnelle

2007–2009	Post-doc, Université de Cologne.
2005–2007	Post-doc CNES, LESIA, Observatoire de Paris.
2002–2005	Thèse, LESIA, Observatoire de Paris.

### Thèse

J'ai effectué ma thèse au LESIA sur la "Turbulence MHD dans la magnétogaine terrestre en aval des chocs quasi-perpendiculaires". Je l'ai soutenue à l'Observatoire de Meudon le 30 novembre 2005 devant le jury composé de J. C. Cerisier, T. Passot, D. Burgess, M. Tagger, F. Mottez, A. Mangeney, M. Maksimovic.

### Formation

2002–2005	Thèse de doctorat (très honorable), Université Paris VI, France.
1999–2003	Master <i>Physique de la Terre et des planètes</i> (avec distinction), Université de St-Petersbourg, Russie.
2001–2002	DEA <i>Physique des plasmas</i> , École Polytechnique, France.
2000–2001	Programme International, École Polytechnique, France.
1995–1999	Maîtrise de Physique (avec distinction), Université de St-Petersbourg.

### Expérience d'enseignement et de communication

#### Enseignement académique

2004–2005	Vacataire à l'IUT de Vélizy, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (cours magistraux et travaux dirigés de mathématiques).
mars 2007	Cours de M1 de l'Observatoire de Paris, <i>Missions spatiales</i> , SDTP-5.
2008	Séminaire des étudiants, Université de Cologne.

### Communications grand public

2003–2004	Fête de la science à l’Observatoire.
2004–2006	Accueil des étudiants de M2 en Astrophysique pendant leur visite au LESIA.
2004–2007	Visites guidées du site de Meudon de l’Observatoire de Paris.
juin 2007	Journée portes ouvertes IHY ( <i>International Heliophysical Year</i> ).

### Stages et visites de recherche

mars 2007	visite à l’Université de Pise, Italie (Collaboration avec F. Califano).
jan. 2007	visite à l’Université de Calabre, Italie (dans le groupe de P. Veltri).
oct. 2006	visite à CESR, Toulouse (Collaboration avec l’équipe de CDPP).
2005 – 2006	chercheur invité pendant 4 mois à l’Université de Calabre, Italie (dans le cadre du réseau européen TOSTISP).
avr–juil 2002	stage de DEA <i>Turbulence magnétique près du choc terrestre</i> sous la direction d’A. Mangeney et M. Maksimovic, LESIA, Observatoire de Paris, France.
avr–juil 2001	stage d’option de l’École Polytechnique <i>Étude des ondes au voisinage de la magnétopause avec les données de satellite Cluster</i> , sous la direction de G. Belmont et L. Rezeau, CETP, IPSL, France.
1999–2000	stage de fin d’études <i>Érosion de la magnétopause</i> sous la direction de V. Semenov, Institut de Physique, Université d’État de St-Petersbourg, Russie.

### Collaborations

Université de Cologne	J. Saur
Observatoire de Paris	A. Mangeney, M. Maksimovic, C. Lacombe, R. Grappin
LPP (ex CETP)	N. Cornilleau-Wehrin, O. Le Contel
CESR, Toulouse	C. Jacquety, V. Génot, E. Budnik, B. Lavraud
Observatoire de la Côte d’Azur	T. Passot, P. L. Sulem
IAP, Prague	P. Hellinger, P. Travnicek
Université de Calabre	P. Veltri, V. Carbone, L. Sorriso-Valvo
Université de Pise	F. Califano
Imperial College, London	E. Lucek, T. Horbury

### Publications et Communications

- 12 articles dans des revues scientifiques de rang A (dont 7 en premier auteur, 2 en deuxième auteur, 1 soumis), 2 en préparation, 3 autres publications.
- 10 communications invitées lors de conférences internationales.
- 10 séminaires invités.
- Plus de 30 autres communications.

### Services à la communauté scientifique

- Rapporteur pour *Journal of Geophysical Research*
- Rapporteur pour *Astrophysical Journal*
- Rapporteur pour *Annales Geophysicae*
- Rapporteur pour *Nonlinear Processes in Geophysics*

- Rapporteur pour *CAA book (Proceedings of the 15th Cluster Workshop and the CAA School)*
- Organisateur de *Space plasmas and Astrophysics. International workshop in honor of André Mangeney*, Observatoire de Paris, sept. 11–14 2007
- Organisateur de la session *Turbulence*, 17th Cluster workshop in Uppsala 12–15 May 2009

## Langues

russe (langue maternelle), français, anglais, allemand (niveau débutant)

## Publications et Communications (février 2009)

### Thèse

[1] **O. Alexandrova**, *Turbulence MHD dans la magnétogaine terrestre en aval des chocs quasi-perpendiculaires*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2005

### Publications dans des revues avec comité de lecture

[2] L. Rezeau, F. Sahraoui, E. d’Humières, G. Belmont, T. Chust, N. Cornilleau-Wehrlin, L. Mellul, **O. Alexandrova**, E. Lucek, P. Robert, P. Decreau, P. Canu, I. Dandouras, *A case study of low-frequency waves at the magnetopause*, *Annales Geophysicae*, 19, 1463, 2001

[3] V. Semenov, **O. Alexandrova**, N. Erkaev, S. Muhlbachler, H. Biernat, *A simple model of magnetopause erosion as a consequence of pile-up process and bursty reconnection*, *Int. J. Geomag. Aeronomy*, 3, 109, 2002

[4] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, C. Lacombe, N. Cornilleau-Wehrlin, E. Lucek, P. Decreau, J. M. Bosqued, P. Travnicsek, A. N. Fazakerley, *Cluster observations of finite amplitude Alfvén waves and small scale magnetic filaments downstream of a quasi-perpendicular shock*, *J. Geophys. Res.*, 109, A05207, 2004

[5] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrlin, J. M. Bosqued, M. Andre, *Alfvén vortex filaments observed by Cluster in the magnetosheath downstream of perpendicular shock*, *J. Geophys. Res.*, 111, A12208, 2006

[6] E. M. Dubinin, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrlin, D. Fontaine, P. Travnicsek, A. Mangeney, **O. Alexandrova**, K. Sauer, M. Fraenz, I. Dandouras, E. Lucek, A. Fazakerley, A. Balogh, and M. Andre, *Coherent Whistler Emissions in the Magnetosphere. Cluster Observations*, *Annales Geophysicae*, 25, 303, 2007

[7] A. Samsonov, **O. Alexandrova**, C. Lacombe, M. Maksimovic, *Proton temperature anisotropy in the magnetosheath : comparison of MHD modeling with CLUSTER data*, *Annales Geophysicae*, 25, 1157, 2007

[8] **O. Alexandrova**, V. Carbone, P. Veltri, L. Sorriso-Valvo, *Solar wind turbulent spectra and role of Hall effect. Cluster observations.*, *Planetary and Space Science*, 55, 2224, 2007

[9] **O. Alexandrova**, V. Carbone, L. Sorriso-Valvo, P. Veltri, *Small Scale Energy Cascade of the Solar Wind Turbulence*, *The Astrophysical Journal*, Volume 674, Issue 2, 1153, 2008 (arXiv :0710.0763)

- [10] **O. Alexandrova**, *Solar wind versus magnetosheath turbulence and Alfvén vortices*, Nonlinear Processes in Geophysics, Volume 15, Issue 1, 95, 2008
- [11] **O. Alexandrova** and J. Saur, *Alfvén vortices in Saturn’s magnetosheath : Cassini observations*, Geophysical Research Letters, Volume 35, Issue 15, CiteID L15102, 2008
- [12] **O. Alexandrova**, C. Lacombe, A. Mangeney, *Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth’s magnetosheath : Cluster observations*, Annales Geophysicae, 26, 3585, 2008, (arXiv :0810.0675)

## Soumis

- [13] G. Zimbardo, A. Greco, L. Sorriso-Valvo, S. Perri, Z. Vörös, G. Aburjania, Kh. Chargazia, **O. Alexandrova**, *Magnetic turbulence in the geospace environment*, submitted to Space Science Reviews, 2008

## En préparation

- [14] **O. Alexandrova**, J. Saur, C. Lacombe, A. Mangeney, *Solar wind turbulent spectrum at electron scales*
- [15] **O. Alexandrova**, R. Grappin, A. Mangeney, *Alfvén vortex stability : numerical evidence*

## Publications dans des actes de conférence

- [16] **O. Alexandrova** and A. Mangeney, *Stationary field-aligned filament : model based on Cluster observations*, proceedings of "Problems of Geocosmos-V", 132-135, 2004
- [17] **O. Alexandrova**, A. Mangeney and M. Maksimovic, *Incompressible magnetic vortices : magnetosheath Cluster observations*, proceedings of "Problems of Geocosmos-VI", 3-6, 2006

## Communications invitées

- [1] **O. Alexandrova**, *Solar wind versus magnetosheath turbulence. Observations of Alfvén vortices*, The Sixth International Workshop on Nonlinear Waves and Turbulence in Space Plasmas, Kyushu University, Japon, 9 -13 oct. 2006
- [2] V. Carbone, **O. Alexandrova**, S. Servidio, L. Sorriso, P. Veltri *Small-scale magnetic turbulence in the solar wind*, SH12A-01, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 11–15 déc. 2006
- [3] **O. Alexandrova**, *Multiscale phenomena of the Earth magnetosheath*, Workshop on Complexity in plasma and geospace systems, Geilo, Norway, mars 4–9, 2007
- [4] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, *Discovery of Alfvén vortices in the plasma turbulence of the Earth’s magnetosheath*, AGU Joint Assembly, Acapulco, Mexico, 22–25 mai 2007
- [5] **O. Alexandrova**, *Statistical properties of plasma turbulence in presence of Alfvén vortices*, Alfvén 2007 Workshop on Space Environment Turbulence 17–21 sep. 2007, Warsaw, Poland
- [6] **O. Alexandrova**, 15th Cluster Workshop & Cluster Active Archive School, Puerto Santiago, Tenerife, Canary Islands, 9 – 15 mars 2008

[7] **O. Alexandrova**, *Observation of coherent magnetic vortices in planetary magnetosheath*, Workshop on Magnetosheath Processes, CESR, Toulouse, France, 8–10 oct. 2008

[8] **O. Alexandrova**, *Anisotropy and structures in space plasma turbulence*, Workshop on Structures and Waves in Anisotropic Turbulence, Warwick Mathematics Institute, UK, 3–7 nov. 2008

[9] **O. Alexandrova**, *Magnetosheath Turbulence*, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, dec. 2008

[10] **O. Alexandrova**, *Applicability of weak turbulence approximation to space plasma turbulence*, Workshop on Wave Turbulence, Institut Henri Poincaré, 6–10 avril 2009

## Séminaires

- [1] dec 2002      Université d'État de St-Petersbourg, Russie.
- [2] fev 2003      Observatoire de Meudon, France.
- [3] avr 2004      CESR, Toulouse, France.
- [4] dec 2005      Université de Calabre, Italie.
- [5] mai 2006      CETP, Velizy, France.
- [6] nov 2006      Observatoire de Meudon, France.
- [7] mai 2007      Institut de Géophysique, Université de Cologne, Allemagne.
- [8] oct 2007      Institut de Géophysique, Université de Cologne, Allemagne.
- [9] mars 2008      CESR, Toulouse, France.
- [10] jan 2009      Imperial College, Londres, UK.

## Conférences internationales (liste complète)

### Présentations orales

[1] V. Semenov, **O. Alexandrova**, N. Erkaev, S. Muehlbachler, H. Biernat, *A Simple model of magnetopause erosion as a consequence of magnetic pile-up and bursty reconnection*, International Conference on Problems of Geocosmos III, St-Petersburg, Russia, 22–26 mai 2000

[2] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Instabilité de filamentation de l'onde d'Alfvén pres du choc quasi-perpendiculaire*, Atelier de Travail : Aspects cinétiques du vent solaire, Saint Malo, France, 21–24 jan. 2003

[3] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, C. Lacombe, N. Cornilleau-Wehrin, J.M. Bosqued, E. Lucek, *Cluster observations of Alfvén waves and small-scale current filaments in the downstream region of a perpendicular shock*, Book of Abstracts, p. 51, STAMMS, Orléans, France, 12–16 mai 2003

[4] **O. Alexandrova**, *Alfvén wave instabilities : Cluster observations and hybrid simulations*, Summer school " Basic Processes of Turbulent plasmas ", Chalkidiki, Greece, 23–28 sept. 2003

[5] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrin, E. Lucek, J.M. Bosqued, *Structures in magnetostatic equilibrium observed by Cluster downstream of quasi-perpendicular shock*, Abstract EGU04-A-03954, 2004, EGU General Assembly, Nice, France, 25–30 avril, 2004

- [6] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Structures in magnetostatic equilibrium observed by Cluster downstream of quasi-perpendicular shock*, Book of Abstracts, p. 71, International Conference on Problems of Geocosmos V, St-Pétersbourg, Russie, 24–28 mai 2004
- [7] **O. Alexandrova**, *Stationary field-aligned filament : Cluster observations and model*, Summer school "Analysis techniques for turbulent plasmas", Calabria, Italy, 28 sept.–2 oct. 2004
- [8] **O. Alexandrova**, *Cluster observations of magnetosheath adjacent to the bow-shock*, 6th European workshop on collisionless shocks, Paris, France, 4–6 nov. 2004
- [9] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Vortex like structures at the ion inertial scale downstream of quasi-perpendicular bow-shocks*, Abstract EGU05-A-08776, EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24–29 avril 2005
- [10] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Cluster Observations of Alfvénic Vortices in the Magnetosheath*, Abstract SM52A-02, 2005, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 5–9 décembre 2005
- [11] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Turbulent spectrum in magnetosheath and Alfvénic vortices*, Abstract EGU06-A-08991, EGU General Assembly 2006, Vienna, Austria, 2–7 avril 2006
- [12] **O. Alexandrova**, V. Carbone, L. Sorriso-Valvo, S. Servidio, P. L. Veltri, *Evidence of the Hall effect on a turbulent spectrum in the fast solar wind. Cluster observations*, Dynamical Processes in Space Plasmas Israel, 7–15 mai 2006
- [13] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Turbulent spectrum and intermittency in Earth magnetosheath*, Book of Abstracts, p. 166, International Conference on Problems of Geocosmos VI, St-Pétersbourg, Russie, 23–27 mai 2006
- [14] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Magnetosheath turbulent spectrum and Alfvénic vortices*, 12th Cluster workshop Saariselka, Lapland, Finland, 13 sept. 2006
- [15] **O. Alexandrova**, *Solar wind versus magnetosheath turbulence. Observations of Alfvén vortices*, The Sixth International Workshop on Nonlinear Waves and Turbulence in Space Plasmas, Kyushu University, Japon, 9–13 oct. 2006, **invité**
- [16] V. Carbone, **O. Alexandrova**, S. Servidio, L. Sorriso, P. Veltri *Small-scale magnetic turbulence in the solar wind*, SH12A-01, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 11–15 déc. 2006, **invité**
- [17] **O. Alexandrova**, *Multiscale phenomena of the Earth magnetosheath*, Workshop on Complexity in plasma and geospace systems, Geilo, Norway, mars 4–9, 2007, **invité**
- [18] **O. Alexandrova**, R. Grappin, A. Mangeney, *Stability of an Alfvén vortex : numerical evidence*, abstract EGU2007-A-09626, EGU General Assembly 2007
- [19] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, *Discovery of Alfvén vortices in the plasma turbulence of the Earth's magnetosheath*, AGU Joint Assembly, Acapulco, Mexico, 22–25 mai 2007, **invité**
- [20] **O. Alexandrova**, *Space plasma turbulence and Alfvén vortices*, Space Plasmas and Astrophysics International workshop in honor of André Mangeney, Observatoire de Meudon, 11–14 sept. 2007
- [21] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, *Space distribution of Alfvén vortices in the magnetosheath*, STAMMS-2-14th Cluster Double Star workshop, Orleans, France, 24–28 sept. 2007
- [22] **O. Alexandrova**, *Waves and turbulence downstream of quasi-perpendicular shock*, 15th Cluster Workshop & Cluster Active Archive School, Puerto Santiago, Tenerife, Canary Islands, 9–15 March 2008, **invité**



- [23] **O. Alexandrova**, *Anisotropy of turbulent fluctuations in the Earth's magnetosheath*, Workshop on Magnetosheath Processes, CESR, Toulouse, France, 8–10 Oct. 2008
- [24] **O. Alexandrova**, *Observation of coherent magnetic vortices in planetary magnetosheath*, Workshop on Magnetosheath Processes, CESR, Toulouse, France, 8–10 Oct. 2008, **invité**
- [25] **O. Alexandrova**, *Anisotropy and structures in space plasma turbulence*, Workshop on Structures and Waves in Anisotropic Turbulence, Warwick Mathematics Institute, UK, 3–7 Nov. 2008, **invité**
- [26] **O. Alexandrova**, *Anisotropy and Dissipation in Space Plasma Turbulence : Cluster Observations in the Solar Wind and Earth's Magnetosheath*, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 15–19 Dec. 2008
- [27] **O. Alexandrova**, *Magnetosheath Turbulence*, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 15–19 Dec. 2008, **invité**
- [28] **O. Alexandrova**, *Applicability of weak turbulence approximation to space plasma turbulence*, Workshop on Wave Turbulence, Institut Henri Poincaré, 6–10 April 2009, **invité**

## Posters

- [1] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, M. Maksimovic, *Filamentation instability of post shock finite amplitude Alfvén waves*, Abstract EAE03-A-10880, 2003, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6–11 avril 2003
- [2] **O. Alexandrova**, P. Travnicek, A. Mangeney, *3D Hybrid simulations of finite amplitude Alfvén wave filamentation*, Eos Trans. AGU, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract SM52B-0582, 2003, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 8–12 déc. 2003
- [3] A. Mangeney, **O. Alexandrova**, P. Travnicek, P. Hellinger, *Hybrid simulations of dispersive Alfvén wave and its filamentation*, Abstract EGU04-A-03709, 2004, EGU General Assembly, Nice, France, 25–30 avril 2004
- [4] A. Mangeney, **O. Alexandrova**, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrin, E. Lucek, J.M. Bosqued, M. Andre, *Alfvén vortex filament-like structures observed by Cluster downstream of the bow-shock*, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract SM51C-0379, 2004, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 13–17 déc. 2004
- [5] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, R. Grappin, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrin, *Alfvén vortices : magnetosheath Cluster observations and weakly compressible MHD simulations*, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 11–15 décembre 2006
- [6] **O. Alexandrova**, E. Budnik, V. Génot, C. Lacombe, C. Jacquety, I. Dandouras, E. Lucek, *Statistical study of magnetic field fluctuations in the Earth magnetosheath*, abstract EGU2007-A-10263, EGU General Assembly 2007
- [7] **O. Alexandrova**, C. Lacombe, A. Mangeney, E. Lucek, *CLUSTER observations in the magnetosheath : anisotropies of wave vector distributions of the turbulence at proton scales*, abstract EGU2007-A-03502, EGU General Assembly 2007
- [8] **O. Alexandrova**, C. Lacombe, A. Mangeney, N. Cornilleau-Wehrin, E. Lucek, *Spectral shape and anisotropy of solar wind magnetic fluctuations at electron scales* abstract EGU2008-A-08899, EGU General Assembly 2008
- [9] **O. Alexandrova** and J. Saur, *Turbulent spectrum downstream of the Saturn's bow-shock : Cassini observations*, abstract EGU2008-A-08331, EGU General Assembly 2008



[10] **O. Alexandrova**, C. Lacombe, J. Saur, A. Mangeney, and V. Carbone, *Space plasma turbulence at ion and electron scales : observations in the solar wind and Earth magnetosheath*, abstract EGU2009-8111, EGU General Assembly 2009

## Conférences nationales

[1] **O. Alexandrova**, *Structures en équilibre magnéostatique observées en aval du choc quasi-perpendiculaire*, Atelier de Travail PNST, Autrans, France, 26–28 jan. 2004 (oral)

[2] **O. Alexandrova**, *Etude de la stabilité d'onde d'Alfvén dispersive par les simulations numériques de type Hybride*, Atelier de Travail PNST, Autrans, France, 26–28 jan. 2004 (poster)

[3] **O. Alexandrova**, A. Mangeney, N. Cornilleau-Wehrin, J.M. Bosqued, P. Hellinger, *Alfvén wave instabilities : magnetosheath Cluster observations and hybrid simulations*, SF2A, Paris, France, 14–18 juin 2004 (oral)

[4] **O. Alexandrova-Boutillier**, *Découverte des vortex d'Alfvén dans le plasma turbulent de la magnétogaine terrestre avec les mesures du multi-satellite CLUSTER*, Journées CNES Jeunes Chercheurs, Centre Spatial de Toulouse, France, 17–19 oct. 2006 (**prix meilleure présentation**)

[5] **O. Alexandrova**, et al., *Turbulence dans le vent solaire et dans la magnétogaine terrestre. Observation des vortex d'Alfvén*, Journée plasma à l'UPMC (Turbulence dans les plasmas : aspects expérimentaux), 15 fév. 2007 (oral)

[6] **O. Alexandrova**, V. Carbone, A. Mangeney, C. Lacombe, *Transfert et dissipation d'énergie turbulente dans le vent solaire*, Atelier PNST, Obernai, 25–28 Mars 2008 (oral)

[7] **O. Alexandrova**, A. Mangeney and J. Saur, *Turbulence en aval de choc sans collisions*, Atelier PNST, Obernai, 25–28 Mars 2008 (poster)

## Rapport sur les travaux de recherche

Mes travaux de recherche portent sur la turbulence des plasmas non-collisionnels du vent solaire et de l'environnement des planètes magnétisées, comme la Terre et Saturne.

Si la turbulence dans le vent solaire est assez bien décrite sur les échelles MHD, ce qui se passe sur des échelles proches des échelles caractéristiques des ions est beaucoup moins bien connu, et sujet bien des controverses. J'ai pu montrer l'existence d'une cascade d'énergie sur ces échelles, qui était souvent interprétée comme un domaine dissipatif de la turbulence dans le vent solaire. J'ai également proposé une explication phénoménologique de l'existence d'une telle cascade.

Lors de l'interaction du vent solaire avec une planète magnétisée, une magnétogaine se forme entre le choc et la magnétopause dans laquelle s'écoule le plasma du vent solaire. Pendant ma thèse j'ai mis en évidence l'universalité du spectre turbulent dans la magnétogaine terrestre en aval du front du choc. De plus, j'ai établi l'existence de vortex magnétiques d'Alfvén dans cette région turbulente. Ce sont des structures cylindriques cohérentes, alignées avec le champ magnétique moyen. Leur identification n'a été possible que grâce à la décomposition en ondelettes et à la résolution spatiale des sondes Cluster. Récemment, j'ai mis en évidence la présence de vortex dans la magnétogaine de Saturne. Cette découverte est un indice en faveur de l'universalité des vortex d'Alfvén dans le plasma en aval des chocs sans collisions.

Actuellement, je continue mes recherches sur les vortex d'Alfvén, notamment au sujet de leur stabilité dans le plasma. Je travaille aussi sur le problème de l'anisotropie des fluctuations turbulentes en présence d'un champ magnétique fort, et je cherche à identifier le domaine dissipatif de la turbulence dans le plasma sans collisions.

## 1 Introduction

Le plasma du vent solaire, comme de nombreux plasmas en astrophysique, est non-collisionnel : le libre parcours moyen des particules est beaucoup plus grand que l'échelle caractéristique des phénomènes étudiés. Pour cette raison, l'interaction entre le plasma du vent solaire et le champ magnétique des planètes est contrôlée par des effets non-collisionnels. Parmi ces effets, la turbulence électromagnétique tient une place particulière.

La turbulence est un processus non-linéaire, non reproductible localement, mais qui a des propriétés statistiques universelles. Lorsqu'on injecte de l'énergie dans un fluide, si cette énergie ne se dissipe pas sur l'échelle même de l'injection, elle se propage vers les échelles plus petites en cherchant à se dissiper : la turbulence se développe entre l'échelle d'injection et l'échelle de dissipation.

Aujourd'hui, il n'existe pas encore de théorie complète décrivant un système turbulent dans un cadre suffisamment général. Cependant, à partir d'observations, de simulations et de travaux théoriques, on connaît les propriétés universelles de la turbulence :

- invariance d'échelle, qui se traduit par des spectres d'énergie en loi de puissance,
- intermittence (ou inhomogénéité spatiale de la turbulence, liée probablement à l'apparition de structures cohérentes de forte amplitude), qui se traduit par des déviations de la gaussianité des distributions des fluctuations turbulentes.

Dans un fluide non magnétisé, si les échelles de l'injection de l'énergie dans le système et les échelles dissipatives sont assez éloignées les unes des autres, on a dans les échelles intermédiaires (*domaine inertiel*) un spectre universel en vecteur d'onde  $k$  qui est en loi de puissance  $k^{-5/3}$ , et qui ne dépend ni des mécanismes d'injection de l'énergie,

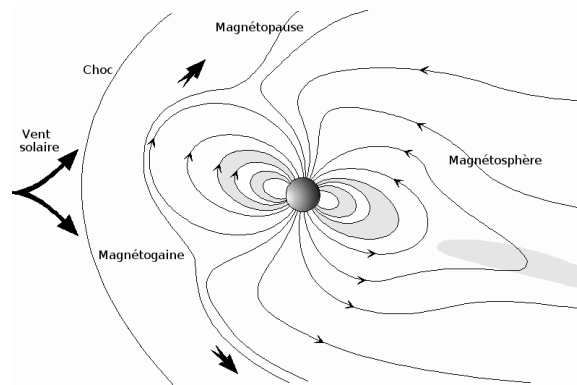


FIGURE 1 – L’interaction du vent solaire avec une planète magnétisée est la cause de la formation de la magnétosphère, avec ses couches limites comme le choc en amont, la magnétopause (la couche de courant qui protège la magnétosphère des particules du vent solaire) et la magnétogaine, la région entre le choc et la magnétopause.

ni de la dissipation. L’invariance d’échelle dans un fluide hydrodynamique est bien décrite dans le cadre phénoménologique de Kolmogorov. L’intermittence est hors de cette phénoménologie, mais on sait que dans un fluide classique elle se traduit par l’apparition de structures cohérentes sous la forme de filaments de vorticité. Leur longueur est de l’ordre de la plus grande échelle de la turbulence ( chelle de forçage) et leur section efficace est de l’ordre de l’échelle dissipative. Le domaine de la dissipation de l’énergie turbulente est décrit par un spectre, également universel, mais de forme différente (exponentielle).

La turbulence dans le plasma naturel du vent solaire est un exemple de la turbulence magnétohydrodynamique (MHD), où, à la différence avec un fluide neutre, la présence de champ magnétique rompt l’isotropie des fluctuations turbulentes [Shebalin et al., 1983]. De plus, à cause de la nature non-collisionnelle du plasma, l’échelle dissipative collisionnelle n’est pas vraiment bien définie dans le vent solaire. En revanche, il y a plusieurs échelles caractéristiques du plasma imposées par le champ magnétique et par des propriétés des ondes et des particules. Cela pose plusieurs questions : comment se passe la dissipation de l’énergie turbulente dans le milieu sans collisions ? Il est évident que l’invariance d’échelle entre l’injection de l’énergie et sa dissipation n’est pas possible dans un fluide avec plusieurs échelles caractéristiques. Mais laquelle de ces échelles joue le rôle de l’échelle dissipative ? et que se passe-t-il autour des autres échelles caractéristiques ?

Il était couramment admis que la fréquence cyclotronique des ions correspondait au début du domaine dissipatif dans le vent solaire. J’ai pu montrer que cela n’est en fait pas le cas : pendant ma visite à l’Université de Calabre, dans le groupe du professeur Veltri, j’ai pu montrer l’existence d’une cascade d’énergie compressible entre les échelles caractéristiques ioniques et électroniques [Alexandrova et al., 2007]. J’ai également proposé une explication théorique de l’existence d’une telle cascade aux petites échelles [Alexandrova et al., 2008a]. Les détails de ces travaux se trouvent dans la section 2.

La turbulence dans la magnétogaine terrestre (la région située entre le choc de la Terre et la frontière de la cavité magnétosphérique, voir Fig. 1) est un autre exemple de turbulence MHD, quoique moins étudiée. Dans la magnétogaine, le champ magnétique statique est plus fort que dans le vent solaire. Le plasma y est plus dense et plus chaud. L’étude de la turbulence dans la magnétogaine terrestre est (i) intéressante comme un exemple de la turbulence en aval du choc sans collisions et, (ii) importante du point de vue de la ”météo spatiale”.

Que se passe-t-il sur le choc et dans la magnétogaine ? La nature non-collisionnelle du choc qui rend la distribution des particules chargées fortement anisotrope entraîne la génération d'ondes monochromatiques d'Alfvén et miroir de basse fréquence (inférieure à la fréquence cyclotronique des ions,  $f_{ci}$ ) en aval du front du choc [Schwartz et al., 1996]. J'ai pu déterminer, pour la première fois et grâce aux 4 satellites de Cluster, les propriétés dispersives (vecteur d'onde et fréquence dans le référentiel du plasma) d'ondes d'Alfvén générées par le choc [Alexandrova et al., 2004], et l'accord entre ces observations et les prédictions théoriques (voir section 3.1).

Les observations dans la magnétogaine montrent que le spectre des fluctuations magnétiques ne s'arrête pas à la fréquence cyclotronique des ions mais continue bien au-delà. Il ne s'agit donc pas uniquement d'effets liés au choc, mais c'est probablement un signe de turbulence développée. Dans la suite de ma thèse je me suis intéressée à l'étude la turbulence en aval du choc de la Terre.

Dans cette étude, premièrement, j'ai pu mettre en évidence l'universalité du spectre turbulent dans la magnétogaine en aval du front du choc indépendamment de la géométrie du choc (section 3.2). Le deuxième résultat, plus important encore, est la découverte de vortex magnétiques d'Alfvén, des structures cohérentes intermittentes, dans la turbulence de la magnétogaine [Alexandrova et al., 2006b]. Un vortex d'Alfvén est une onde d'Alfvén non-linéaire, de géométrie cylindrique alignée avec le champ magnétique statique, et qui est quasi-stationnaire dans le plasma. L'identification des vortex magnétiques fut possible grâce à l'aspect multi-satellite de la mission Cluster. Les explications détaillées sur ce travail se trouvent dans la section 3.3.

Les structures cohérentes en forme des vortex sont-elles une propriété générale de la turbulence en aval des chocs sans collisions ? J'ai donné récemment un début de réponse à cette question, en mettant en évidence la présence de vortex dans la magnétogaine de Saturne [Alexandrova and Saur, 2008], voir section 4.2. Cette étude a été possible grâce aux mesures de la mission Cassini.

Si auparavant, la turbulence dans la magnétogaine était considérée comme un mélange d'ondes planes (approximation de la turbulence faible), la découverte des vortex d'Alfvén demande de revoir cette approche traditionnelle. Une revue sur la turbulence dans la magnétogaine et la comparaison avec le vent solaire se trouve dans [Alexandrova, 2008].

Récemment, j'ai montré la présence de la turbulence développée à la Kolmogorov dans les flancs de la magnétogaine. De plus, j'ai établi la nature bi-dimensionnelle de la cascade aux petites échelles [Alexandrova et al., 2008b], ce qui peut indiquer la présence de turbulence forte (voir la discussion dans la section 4.3).

La turbulence développée dans la magnétogaine peut jouer un rôle important dans les processus sur la magnétopause, la couche de courant qui protège la magnétosphère des particules du vent solaire (voir Fig. 1). Par exemple, l'apparition de la composante normale du champ magnétique dans la magnétopause rend possible la réorganisation topologique du champ, par un processus de reconnexion. Lors de la reconnexion magnétique, la magnétosphère n'est plus protégée et les particules du vent solaire peuvent y pénétrer. J'ai travaillé sur la reconnexion magnétique avec V. Semenov dans le cadre de mon diplôme de fin d'étude à l'Université de St-Petersbourg : nous avons pu expliquer les variations de la position de la magnétopause durant la phase préparatoire d'un sous-orage en utilisant la théorie de la reconnexion non-stationnaire de type Petschek [Semenov et al., 2002].

L'influence de la turbulence sur la reconnexion magnétique est importante pour beaucoup des situations en astrophysique. Cependant, les deux phénomènes la turbulence et la reconnexion ne pourraient pas exister sans la dissipation, qui reste une question

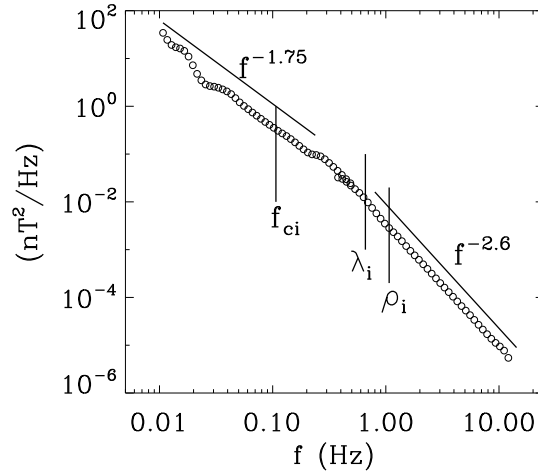


FIGURE 2 – Spectre des fluctuations magnétiques dans le vent solaire mesurées par Cluster. Les barres verticales indiquent les échelles ioniques du plasma : la fréquence de gyration des ions autour de  $\mathbf{B}_0$ ,  $f_{ci}$  ;  $\lambda_i$  indique la fréquence Doppler de l'échelle d'inertie des ions  $kc/\omega_{pi} = 1$  et  $\rho_i$  indique celle du rayon de Larmor  $k\rho_i = 1$ . On voit que la cassure du spectre, *i.e.* le passage de la loi de puissance  $f^{-1.75}$  vers  $f^{-2.6}$  se passe entre les échelles caractéristiques  $f_{ci}$  et  $\lambda_i$ .

ouverte dans le plasma sans collisions. En ce moment, pour contribuer à la compréhension de la dissipation dans un tel plasma, je cherche à identifier le domaine dissipatif de la turbulence dans le vent solaire [Alexandrova et al., 2009b].

## 2 Turbulence dans le vent solaire

Le lieu de prédilection pour l'étude de la turbulence dans les plasmas naturels est le vent solaire “libre”, loin des perturbations causées par la présence d'une planète. Le spectre des fluctuations magnétiques, observé par de nombreuses missions spatiales (ex : Helios, ACE, Wind, Ulysses), montre l'universalité de la loi de distribution en fréquence<sup>1</sup> de l'énergie  $E \sim f^{-5/3}$ , ce qui correspond au spectre  $\sim k^{-5/3}$  pour les échelles MHD<sup>2</sup> : sur ces échelles, la turbulence dans le vent solaire est similaire à la turbulence hydrodynamique de Kolmogorov.

Le spectre de Kolmogorov s'arrête près des échelles caractéristiques des ions, où apparaît une cassure spectrale (voir figure 2). Au-delà de la cassure, le spectre est encore en loi de puissance : sur la figure 2 on observe  $E \sim f^{-2.6}$ . En fait, la pente de ce spectre de hautes fréquences varie entre  $-4$  et  $-2$  [Leamon et al., 1998]. Souvent cette partie spectrale est interprétée comme étant la dissipation de la turbulence par amortissement des ondes d'Alfvén. Or, si c'était vraiment le cas, on s'attendrait plutôt à avoir un spectre exponentiel [Stawicki et al., 2001]. Le spectre en loi de puissance fait plutôt penser à un

1. Les missions spatiales fournissent une information sous forme de séries temporelles ; dans l'espace de Fourier on a accès aux spectres en fréquence mais pas aux vecteurs d'onde  $k$ . Grâce à la vitesse supersonique du vent solaire  $V$ , les fluctuations peuvent être considérées comme gelées dans le flux du vent. Donc, les variations temporelles observées par un satellite correspondent aux variations spatiales sur des échelles  $\delta r = V\delta t$  (l'hypothèse de Taylor), et le spectre en fréquence est simplement transformable en spectre en vecteurs d'onde.

2. Plus précisément, le spectre en  $-5/3$  est observé dans le domaine  $10^{-4} - 10^{-1}$  Hz, ce qui correspond aux échelles spatiales  $10^4 - 10^7$  km.

autre type de cascade et non pas à la dissipation.

Après la cassure spectrale sur les échelles ioniques, observe-t-on la dissipation de l'énergie turbulente ou une autre cascade d'énergie ? J'ai travaillé sur cette question pendant ma visite à l'Université de Calabre, dans le groupe du professeur Veltri (décembre 2005 – avril 2006). Pour cette étude, j'ai utilisé un autre avantage de Cluster par rapport à beaucoup d'autres missions, à savoir la présence d'un instrument très sensible aux hautes fréquences, l'instrument STAFF-SC (PI Nicole Cornilleau, Observatoire de Paris). Les mesures de cet instrument m'ont donné la possibilité de montrer sans ambiguïté l'augmentation de l'intermittence vers les petites échelles, dans le domaine spectral après la cassure [Alexandrova et al., 2007].

Les deux propriétés du domaine inertiel (spectre en loi de puissance et intermittence) sont réunies aussi dans le domaine des hautes fréquences au-delà de la cassure spectrale. Ces résultats indiquent donc qu'après la cassure spectrale, la cascade turbulente continue.

Mais pourquoi y a-t-il une cassure ? L'étude détaillée des fluctuations magnétiques montre que la cassure correspond à un changement de nature des fluctuations : si dans le domaine des basses fréquences, la turbulence est dominée par des fluctuations alfvéniques incompressibles, de l'autre côté de la cassure la turbulence est beaucoup plus compressible. Cela est lié à un changement de la description physique : on passe du domaine MHD au domaine Hall MHD, où l'inertie des électrons par rapport à celle des ions n'est plus négligeable. En utilisant l'approche de la turbulence dans le milieu interstellaire [von Weizsäcker, 1951]<sup>3</sup>, on a construit la première phénoménologie de la turbulence compressible basée sur les équations Hall MHD [Alexandrova et al., 2008a]. On obtient un spectre de la forme  $E \sim k^{-7/3+2\alpha}$ , où  $\alpha$  est le degré de compressibilité du plasma. Cette loi peut expliquer, sans aucun mécanisme de dissipation, les variations de la pente spectrale, entre  $-4$  et  $-2$ , observées dans le vent solaire, simplement par un différent niveau de compressibilité.

À quelles échelles la turbulence dans le vent solaire se dissipe-t-elle ? J'adresse cette question dans mon *Projet de Recherche*.

### 3 Magnétogaine terrestre

Pour étudier la magnétogaine de la Terre, j'ai utilisé surtout l'aspect multi-points de la mission Cluster. La partie principale de mon travail est basée sur l'analyse des données du champ magnétique mesurées par l'expérience FGM (*Flux Gate Magnetometer*) et STAFF-SC (*Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuations*), expérience réalisée au CETP en collaboration avec le LESIA. La combinaison des données des deux instruments [Alexandrova et al., 2004] donne la possibilité d'étudier des phénomènes sur plusieurs décades en fréquence autour de la fréquence cyclotronique des ions  $f_{ci}$ .

#### 3.1 Relaxation du plasma anisotrope en aval du choc

Au niveau du choc l'écoulement supersonique du vent solaire devient subsonique. Dans un fluide neutre collisionnel, cela se produit par la dissipation de l'énergie cinétique transformée en chaleur grâce aux collisions entre particules. Comme je l'ai déjà discuté dans l'introduction, les collisions sont très rares dans le vent solaire, et donc l'existence même d'un choc en amont de la Terre était considérée comme improbable avant les premières mesures in situ.

---

3. Plus précisément, on suppose que la densité du plasma varie avec l'échelle comme  $\rho \sim \ell^{-3\alpha}$  avec  $\alpha = 0$  pour le cas incompressible et  $|\alpha| = 1$  dans le cas de la compression isotrope.



Il est maintenant bien connu que la rotation des ions autour du champ magnétique statique “remplace” les collisions pour créer le choc en amont de la magnétosphère terrestre. Les ions qui arrivent à traverser le choc ont une vitesse dans le plan perpendiculaire au champ plus grande que le long du champ  $V_{\perp} > V_{\parallel}$ . Cette anisotropie est une source d’énergie libre, qui est libérée sous forme d’ondes de basse fréquence  $f < f_{ci}$ .

Au début de ma thèse je me suis intéressée à l’observation de ces ondes et à la vérification des théories existantes sur la relaxation du plasma anisotrope en aval du choc. Dans l’article [Alexandrova et al., 2004] je décris en détail un exemple d’observations d’ondes Alfvén monochromatiques générées par des protons et des particules alpha anisotropes. Grâce aux 4 satellites de Cluster, j’ai pu déterminer les propriétés dispersives de ces ondes, c’est-à-dire leur vecteurs d’ondes et les fréquences dans le référentiel du plasma. De plus, j’ai montré que ces ondes ont une évolution non-linéaire : elles génèrent des couches de courant par le raidissement de leur fronts d’onde.

Les tentatives de faire une étude statistique sur des ondes générées par des ions anisotropes se sont arrêtées assez vite : en dépit d’une analyse d’un grand nombre de données, aucun autre exemple d’ondes monochromatiques prédits par des théories quasi-linéaires n’a pu être trouvé. À la place, j’ai toujours trouvé un spectre continu de fluctuations. Ces observations m’ont fait me tourner vers l’étude de la turbulence.

### 3.2 Spectre turbulent dans la magnétogaine

Comme je l’ai présenté dans l’introduction, un fluide turbulent possède un spectre d’énergie universel, indépendant de la quantité d’énergie injectée dans le système, et de la façon dont on injecte cette énergie. Dans la magnétogaine, la source de la turbulence varie en fonction de la géométrie du choc : quand la normale au choc est quasi-perpendiculaire au champ magnétique interplanétaire, les ions anisotropes sont la source principale des fluctuations magnétiques en aval du choc. Quand le choc est quasi-parallèle, c’est la turbulence du vent solaire qui est à l’origine des fluctuations dans la magnétogaine. De plus, des paramètres comme l’amplitude du champ magnétique statique, la distance par rapport aux frontières de la magnétogaine, le paramètre  $\beta$  du plasma<sup>4</sup> peuvent aussi influencer le niveau des fluctuations turbulentes [Czaykowska et al., 2001].

Malgré les variations du paramètre  $\beta$  et de la géométrie du choc, j’ai réussi à obtenir une forme spectrale quasi-universelle en aval du front du choc [Alexandrova, 2005]. Ce spectre est représenté schématiquement sur la figure 3 : il possède une cassure spectrale sur  $f_{ci}$  et, au voisinage de cette cassure, on observe très souvent une bosse (représentée par la zone hachurée).

Le spectre dans le vent solaire possède aussi une cassure près de la fréquence  $f_{ci}$ , mais la pente spectrale pour  $f < f_{ci}$  est différente de celle que j’ai obtenue dans la magnétogaine en aval du choc. Cela peut être lié au fait que la turbulence des fluctuations à grande échelle près du choc n’a pas assez de temps pour se développer [Alexandrova, 2008]. Le spectre en  $\sim f^{-5/3}$  de la turbulence développée observé dans les flancs de la magnétogaine confirme cette idée [Alexandrova et al., 2008b].

Dans le domaine des hautes fréquences ( $f > f_{ci}$ ), la pente spectrale est proche de celle dans le vent solaire au dessus de la cassure (voir Fig. 2 et [Leamon et al., 1998]) et de celle observée au voisinage de la magnétopause [Sahraoui et al., 2006]. Elle peut être expliquée dans le cadre de la phénoménologie Hall MHD compressible [Alexandrova et al., 2008a], discutée dans la section 2.

4. une quantité sans dimension, représentant l’importance relative entre la pression thermique du fluide et la pression du champ magnétique :  $\beta = \frac{nkT}{B^2/2\mu_0}$

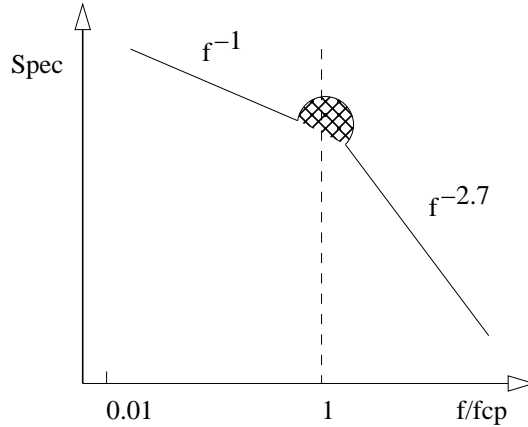


FIGURE 3 – Schéma du spectre turbulent dans la magnétogaine en aval du choc de la Terre en fonction d’une fréquence normalisée à la fréquence cyclotronique des protons  $f_{cp}$ . La zone hachurée correspond à une bosse spectrale qui contient les fréquences responsables de l’intermittence dans la turbulence.

### 3.3 Découverte des vortex d’Alfvén

Une autre différence avec le spectre dans le vent solaire, et à laquelle je me suis particulièrement intéressée, est la présence très fréquente d’une bosse dans le spectre de la magnétogaine. J’ai montré que cette bosse est responsable de l’intermittence, i.e. de l’hétérogénéité (non-gaussianité) de la turbulence [Alexandrova, 2005].

Pour comprendre la nature de l’intermittence dans la magnétogaine j’ai étudié les fluctuations magnétiques sur l’échelle de la bosse spectrale [Alexandrova et al., 2006b]. J’ai montré que l’intermittence dans la magnétogaine est due à la présence de fluctuations cohérentes (voir figure 4, à gauche). Ces fluctuations cohérentes auraient pu être interprétées de deux manières différentes : (i) soit un paquet d’onde d’Alfvén en propagation le long du champ magnétique moyen  $\mathbf{B}_0$  d’une part (figure 4a), (ii) soit une structure magnétique cohérente de géométrie cylindrique avec un axe le long de  $\mathbf{B}_0$  d’autre part (figure 4b) [Alexandrova et al., 2004, Rezeau et al., 1993]. Avec une seule sonde, on ne peut pas distinguer entre ces deux phénomènes : du point de vue de la sonde, le signal d’une structure localisée spatialement et celui d’un paquet d’onde sont similaires. J’ai pu lever cette ambiguïté en utilisant la résolution spatiale de Cluster.

J’ai pu montrer pour la première fois et sans aucune ambiguïté que des fluctuations cohérentes responsables de l’intermittence dans la magnétogaine sont en effet des structures magnétiques localisées dans le plan perpendiculaire au champ magnétique sous la forme de filaments de courant alignés suivant  $\mathbf{B}_0$ .

Quels effets ces structures cohérentes peuvent-elles avoir sur le plasma ? L’analyse des fluctuations de la densité  $\delta\rho$  pousse à penser que ces filaments sont incompressibles. De plus, j’ai observé une corrélation entre les fluctuations de vitesse  $\delta\mathbf{V}$  et celles du champ magnétique  $\delta\mathbf{B}$ , qui suggère une nature alfvénique des filaments.

Le modèle le plus pertinent qui prend en compte tous les effets observationnels des structures cohérentes, est celui du vortex d’Alfvén [Petviashvili and Pokhotelov, 1992]. En effet, les vortex d’Alfvén dans le plasma sont l’équivalent des vortex en hydrodynamique incompressible. Il s’agit d’une onde d’Alfvén non-linéaire de géométrie cylindrique (i.e. les vecteurs d’onde des fluctuations par rapport au champ magnétique moyen vérifient  $k_\perp \gg k_\parallel$ ), avec des fluctuations de vitesse alignées avec celles du champ magnétique  $\delta\mathbf{V} \parallel \delta\mathbf{B}$ , et qui est stable dans le plasma. À la différence de l’onde d’Alfvén plane, le vortex d’Alfvén possède une direction de propagation plutôt perpendiculaire

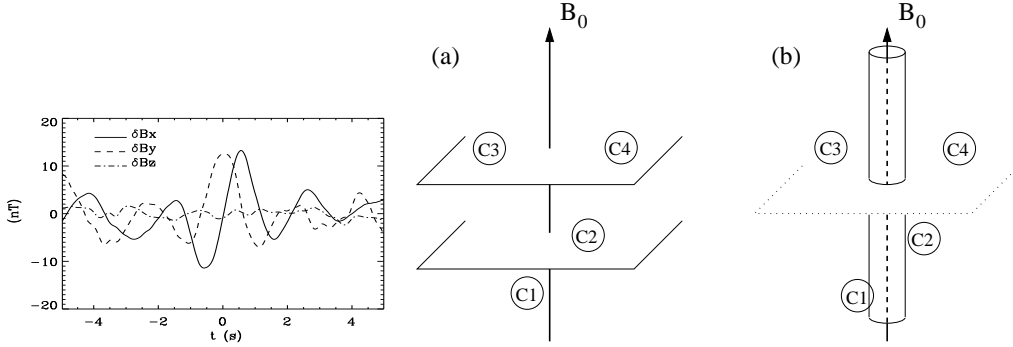


FIGURE 4 – Gauche : trois composantes des fluctuations magnétiques cohérentes mesurées pendant 10 secondes par le satellite Cluster-1 dans la magnétogaine terrestre, les composantes dans le plan perpendiculaire au champ moyen  $\mathbf{B}_0$  sont  $\delta B_x$  et  $\delta B_y$ , la composante le long du champ est  $\delta B_z$ . Droite : les deux interprétations possibles des fluctuations cohérentes (a) le front d'une onde plane qui se propage parallèlement à  $\mathbf{B}_0$  à travers les quatre satellites Cluster ; (b) une structure à géométrie cylindrique (un fil de courant infini) avec un axe le long de  $\mathbf{B}_0$  et localisé dans le plan transversal.

au champ magnétique. En utilisant les quatre satellites de Cluster j'ai pu déterminer la vitesse de propagation des filaments alfvéniques et j'ai obtenu des résultats cohérents avec ce qu'on attend pour les vortex. L'échelle caractéristique transverse des vortex observés est déterminée en combinant modèle et analyse des données des quatre satellites Cluster. Cette échelle est de l'ordre de  $10c/\omega_{pi}$ , où  $c/\omega_{pi}$  est une longueur d'inertie des ions.

Je souligne ici que l'observation des vortex d'Alfvén dans le plasma naturel n'a pas été possible avant l'ère de Cluster. L'identification non ambiguë dans un milieu turbulent comme la magnétogaine est faite ici pour la première fois.

## 4 Étude des vortex

La présence de telles structures non-linéaires dans la magnétogaine mène à plusieurs questions : d'où proviennent-elles ? Sont-elles stables dans le plasma ? Si oui, quel est leur rôle dans l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère ? Apparaissent-elles génériquement dans les plasmas astrophysiques ? etc ... Des réponses partielles sont données dans les paragraphes ci-dessous.

### 4.1 Stabilité des vortex : simulation MHD

Le vortex d'Alfvén est une solution non-linéaire des équations MHD idéale incompressible, qui est stable dans le plasma. Alors que les structures observées sont bien incompressibles, il se trouve que le plasma de la magnétogaine est quant à lui compressible. La stabilité de ces structures incompressibles dans un plasma compressible est une question naturelle.

Les observations fréquentes de vortex dans la magnétogaine semblent indiquer une certaine stabilité. Pour confirmer cela, j'ai effectué, en collaboration avec Roland Grappin, des simulations numériques en MHD compressible. Les résultats montrent que le vortex ne se propage pas comme un corps solide, mais se déforme dans son propre champ. En revanche, son front se propage avec une vitesse stable, prédite par le modèle théorique du vortex [Alexandrova et al., 2009a].

## 4.2 Un pas vers l'universalité : observation des vortex au voisinage de Saturne

Si les vortex d'Alfvén sont une propriété universelle du plasma en aval d'un choc sans collision, on doit pouvoir les observer dans les magnétogaines des autres planètes de système solaire. Cela peut être vérifié pour la magnétogaine de Saturne grâce à la mission Cassini. Au niveau de Saturne le champ magnétique et la densité du vent solaire sont plus faibles de 2 ordres de grandeur qu'au niveau de la Terre. De plus, le nombre de Mach (qui caractérise la force de l'onde de choc) y est plus important qu'au niveau de la Terre.

Malgré les changements importants des conditions dans le plasma, j'ai pu mettre en évidence la présence de signatures des vortex d'Alfvén en aval du choc de Saturne [Alexandrova and Saur, 2008]. Bien sûr, avec Cassini on n'a pas le luxe d'avoir quatre satellites pour faire une étude aussi complète que pour l'environnement terrestre. Cependant, toutes les propriétés de ces structures dans la magnétogaine de Saturne accessibles avec un seul satellite, jusqu'à leur échelle caractéristique, sont très similaires à celles des vortex terrestres.

## 4.3 Génération des vortex dans le plasma

Une autre question qui se pose est de savoir d'où viennent ces vortex d'Alfvén dans la magnétogaine. Un mécanisme possible de génération des vortex est l'instabilité de filamentation d'une onde d'Alfvén monochromatique [Champeaux et al., 1997, Laveder et al., 2002]. Cette instabilité se développe dans un plasma à  $\beta$  fini, quand le front de l'onde d'Alfvén initiale se déchire à cause de l'interaction avec une perturbation de densité. L'effondrement de l'onde d'Alfvén donne naissance à des filaments magnétiques alignés avec le champ magnétique et localisés dans le plan transversal, c'est-à-dire que le filament possède un  $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$ , comme le vortex d'Alfvén. Les observations d'une onde d'Alfvén au voisinage de la région occupée par des vortex, que j'ai décrites dans l'article [Alexandrova et al., 2004], indiquent que l'instabilité de filamentation pourrait être la source des vortex.

Pour tester le scénario de génération de vortex via l'instabilité de filamentation de l'onde d'Alfvén, j'ai effectué des études numériques. Utilisant le code Hybride bi-dimensionnel développé par Petr Hellinger (IAP, Prague, République Tchèque), j'ai montré que l'onde d'Alfvén observée dans la magnétogaine est effectivement instable dans les conditions proches des conditions réalistes. Par contre, à la place de l'instabilité transverse (génération des filaments), ce sont des instabilités longitudinales qui ont lieu. Cependant, on ne peut pas réellement conclure sur le rôle de l'instabilité de filamentation dans la génération des vortex magnétiques avant de faire des simulations tri-dimensionnelles.

Un autre mécanisme possible de génération des vortex est le développement de la turbulence forte, dans laquelle apparaissent des corrélations à longue distance. Dans un plasma avec un fort champ magnétique  $B_0$ , la cascade turbulente se développe surtout dans le plan perpendiculaire à  $B_0$  : la turbulence est essentiellement bidimensionnelle avec  $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$ , ce qu'on observe dans la magnétogaine sur des échelles ioniques [Alexandrova et al., 2008b] et électroniques [Mangeney et al., 2006].

Il est possible que lorsque  $B_0$  est très fort, *i.e.*  $B_0 \gg \delta B$ , la cascade turbulente s'arrête dans la direction parallèle à  $\mathbf{B}_0$  et des structures avec  $k_{\parallel} = 0$  apparaissent [Galtier et al., 2002, Shebalin et al., 1983]. Je discute ce point plus en détails dans mon *Projet de Recherche*.

Les résultats que j'ai obtenus dans le vent solaire et les magnétogaines de la Terre et de Saturne apportent un éclairage nouveau sur la turbulence dans le plasma sans collisions. Si auparavant la turbulence dans le plasma astrophysique était considérée comme un mélange d'ondes incohérentes sur des échelles MHD, il est maintenant évident que la turbulence continue au delà des ces échelles, vers les échelles électroniques. De plus, la cascade est loin de n'être qu'un mélange d'ondes incohérentes : au moins dans la magnétogaine, on trouve des structures cohérentes en forme des vortex d'Alfvén. Maintenant, il est important de comprendre dans quelle mesure ces vortex sont des structures génériques de la turbulence dans les plasmas, et quel rôle ils peuvent jouer dans les différents objets en astrophysique, des magnétosphères planétaires aux restes de supernovæ.

## Expérience d'enseignement et de communication

### Enseignement académique

- 2004–2005 J'ai effectué mon activité d'enseignement en tant que vacataire sous forme de cours magistraux et de travaux dirigés en mathématiques à l'IUT de Velizy attaché à l'Université de Versailles (30 h). Étant aussi responsable du module, j'ai préparé et corrigé les examens sanctionnant ce module. À la suite de ce semestre, on m'a proposé de continuer l'année suivante (2005-2006), mais la soutenance de ma thèse et des visites de longue durée à l'étranger m'ont empêchée d'accepter cette offre.
- mars 2007 Préparation et animation d'un cours "Missions spatiales dans le système Soleil-Terre" dans le cadre de l'enseignement de Master 1 de l'Observatoire de Paris, *Missions spatiales*, SDTP-5.
- mars-juin 2008 J'ai effectué le tutorat et encadré les séminaires des étudiants de Master sur la "Turbulence" à l'Université de Cologne.

### Activités d'encadrement

- J'ai co-encadré avec Milan Maksimovic le stage de Licence de Lionel Housiaux (Université Paris 6) sur la comparaison des données magnétiques de différents instruments sur la mission Cluster.
- Je co-encadre avec Joachim Saur le Diplôme de fin d'études (1 an de recherche) de Laura Pascharat, étudiante de Master à l'Institut de Géophysique à l'Université de Cologne. Le sujet du diplôme est "The analysis of Helios data to study properties of solar wind turbulence in the inner heliosphere".

### Communication grand public

- 2003–2004 Fête de la science à l'Observatoire.
- 2004–2006 Accueil des étudiants de Master 2 en Astrophysique pendant leur visite au LESIA.
- 2004–2007 Visites guidées du site de Meudon de l'Observatoire de Paris.
- juin 2007 Journée portes ouvertes IHY (*International Heliophysical Year*).

### Autres activités pédagogiques

- 1997–2000 Moniteur dans des colonies de vacances à St-Petersbourg, en Russie (encadrement des groupes de 20 à 50 jeunes, âgés de 7 à 16 ans).



## Projet d'enseignement

- J'ai pris contact avec Laurence Rezeau, professeur à l'Université Paris 6 pour un service dans cet établissement. Je propose d'enseigner en Licence des cours de physique de base, ainsi qu'en Master la physique des plasmas.
- En Master 2 "Spécialités Optique, Matière, Plasmas et Astrophysique" de Paris 11, j'ai la possibilité de participer dans le module "Plasmas Astrophysiques I : Plasmas dilués et Système Solaire".
- Profitant de mon cours déjà développé "Missions spatiales dans le système Soleil-Terre", j'ai la possibilité de participer à l'enseignement de Master 1 d'Antonella Barucci sur les missions spatiales pour les années à venir.

## SERVICES D'OBSERVATION

Durant mes années de thèse et de post-doc j'ai travaillé avec des données de différentes missions spatiales (CLUSTER, CASSINI, HELIOS, STEREO, ULYSSES). En plus de l'interprétation scientifique, j'ai effectué divers traitements des données. En particulier, j'ai participé à la cross-calibration des instruments de type ondes. Je résous actuellement le problème de bruit de l'instrument STAFF sur CLUSTER. Ces compétences me seront très utiles pour accomplir les tâches de service que je présente ici.

### 1 Tâche de service principale

#### Préparation de l'expérience SORBET de BepiColombo (AA-SO2)

La mission BepiColombo est une des pierres angulaires du programme Cosmic Vision de l'ESA. Elle permettra l'étude de la planète Mercure grâce à deux sondes mises en orbite autour de la planète. Une des deux sondes, MPO (Mercury Planetary Orbiter) développée par l'ESA, sera dédiée à l'étude de la surface et de l'intérieur de la planète. L'autre sonde, MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) développée par la JAXA (Japan Aerospace eXploration Agency), sera dédiée à l'étude du champ magnétique et de la magnétosphère. Ces 2 orbiteurs seront lancés conjointement par un Soyouz depuis le Centre Spatial Guyanais en 2014. Ils arriveront dans l'environnement de Mercure 6 ans plus tard en 2020 et se sépareront pour mener leurs missions respectives d'une durée nominale d'un an.

L'instrument SORBET (Spectroscopie des Ondes Radio et du Bruit Electrostatique Thermique) est conçu pour le consortium d'instruments PWI (Plasma Waves Instrument) à bord de BepiColombo/MMO. Le LESIA joue le rôle de PI (*Principal Investigator*) dans le développement de SORBET. Cet instrument va mesurer les émissions radio dans la gamme de fréquences de 2.5 kHz à 10.2 MHz. La partie des basses fréquences de l'instrument [2.5, 640] kHz, *Thermal Noise Receiver* (TNR) permettra des mesures de la densité et de la température du plasma. La partie des hautes fréquences [0.5, 10.2] MHz, *High Frequency Receiver* (HFR) est dédiée à la radioastronomie de Mercure : il s'agit de l'analyse des émissions radio et des processus qui y sont liés, comme les *bursts* de particules énergétiques et les aurores polaires. Par ailleurs, les mesures des émissions radio de très basses fréquences jusqu'aux hautes fréquences permettront de faire un *monitoring* des émissions solaires radio au niveau de Mercure, notamment celles de type II et III, liées au transit des chocs interplanétaires, des CMEs et des flux de particules énergétiques.

En tant que laboratoire PI de SORBET, le LESIA a la responsabilité de construire l'instrument durant 2009 et de faire l'étalonnage des récepteurs TNR et HFR avant le lancement en 2014. Cette étape est cruciale avant la production de données scientifiques. Il s'agit de passer des données brutes (en valeurs de télémétrie) à des valeurs physiques en  $V^2/Hz$ . Les valeurs de télémétrie dépendent du signal d'entrée ainsi que du gain et du bruit propre à chaque récepteur. La partie importante du travail, qui nécessitera des tests en laboratoire sur les modèles de vol des récepteurs, est d'identifier le bruit et de caractériser la réponse des récepteurs en fonction de l'amplitude du signal d'entrée, de la fréquence du signal et de la température du milieu. Cela va permettre d'identifier et corriger les erreurs systématiques et préciser la courbe d'étalonnage de l'instrument. Je m'engage à effectuer cette tâche urgente dans le cadre du service d'observation AA-SO2 du CNAP.

## 2 Tâches de service à plus long terme

### 2.1 Préparation de l'expérience RPW de Solar Orbiter (AA-SO2)

La mission Solar Orbiter aura une orbite entièrement nouvelle, s'approchant du Soleil à l'intérieur de l'orbite de Mercure (jusqu'à 0.23 Unités Astronomiques du soleil), et sortant du plan de l'écliptique, permettant ainsi d'explorer des régions inconnues de l'environnement de notre étoile. En plus d'une exploration rapprochée et 'in situ' du Soleil et de son atmosphère, la mission Solar Orbiter a l'originalité de pouvoir suivre le Soleil 'en co-rotation', un peu comme les satellites géostationnaires le font pour la Terre, afin d'observer de façon continue et très rapprochée les régions actives du soleil : tâches, etc, pendant une longue période de temps, bien plus longue que ce qui est possible depuis la Terre. Le lancement de Solar Orbiter est prévu pour le 2017. Actuellement la mission est dans la phase de *Assessment study* par ESA.

Le LESIA est le laboratoire PI d'un consortium international pour la proposition de l'expérience radio et ondes plasma, RPW, sur la mission. À part ces responsabilités de coordination, le LESIA fabriquera les récepteurs TNR et HFR. En tant que Co-Investigateur, je vais être responsable de l'étalonnage de ces récepteurs, à l'instar de ce que je ferai sur BepiColombo.

### 2.2 Développement d'outils d'analyse multi-satellites (AA-SO5)

L'étude multi-point du plasma spatial est devenu possible avec la mission CLUSTER<sup>5</sup> de l'ESA. Cette mission contient 4 sondes identiques, sur la même orbite autour de la Terre, inter-calibrées. La configuration de CLUSTER permet d'étudier des phénomènes en 3 dimensions sur des échelles entre 100 km et 10000 km (i.e. des échelles ioniques jusqu'aux échelles MHD). Après le succès de CLUSTER, on peut s'attendre à ce que de plus en plus de missions utilisent plusieurs satellites. Voici les exemples : (i) les 5 satellites de THEMIS<sup>6</sup> envoyés en 2007 ; (2) MMS<sup>7</sup>, la future mission de NASA, qui comme CLUSTER, contient 4 satellites identiques, mais avec une distance intersatellitaire beaucoup plus petite (sur les échelles électroniques) ; (3) Le projet de la mission CROSS-SCALE, comportant jusqu'à 10 satellites, permettrait d'étudier le plasma naturel en 3D sur les échelles électroniques, ioniques et MHD simultanément.

Tout au long de ma thèse et de mon post-doc, j'ai acquis une expertise dans le développement d'outils d'analyse et l'interprétation des données des 4 satellites de la mission CLUSTER. Avec l'avènement des missions multisatellitaires, mes compétences peuvent être très utiles pour la communauté française. Je m'engage à généraliser des outils informatiques d'analyse multi-satellites pour ces différentes missions et à les mettre à la disposition de la communauté française via le CDPP (Centre de Données de la Physique de Plasmas). Ce service rentre parfaitement dans les tâches principales du CDPP, qui a pour mission de préserver, rendre accessibles et mettre en valeur les données issues des expériences françaises ou à participation française dans le domaine de la Physique des Plasmas Naturels. Il assure un service ouvert à la communauté scientifique des programmes nationaux "relations Soleil-Terre" (PNST) et planétologie (PNP), et à la communauté scientifique internationale.

5. La France participe à la mission CLUSTER avec 3 instruments sur 11.

6. THEMIS : *Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms*. La France y participe avec un instrument de type *search-coil* et avec un site miroir pour la base de données provenant de tous les instruments.

7. MMS : *Magnetospheric Multi Scale*, la France y participe avec un instrument de type *search-coil*.

## Resumé

Mon service d'observation principal, sur lequel je m'engage, est la préparation de l'expérience SORBET de BepiColombo (AA-SO2). Cette tâche consiste en l'étalonnage des récepteurs lors des phases de test avant le lancement en 2014. Les données scientifiques ne peuvent pas être assurées sans ce travail urgent à réaliser avant le lancement. À plus long terme, je m'engage à la préparation de l'expérience RPW de Solar Orbiter (AA-SO2). D'autre part, je participerai au développement d'outils multi-satellites au CDPP (AA-SO5).

## Projet de recherche

### Turbulence dans les plasmas astrophysiques

La turbulence dans les plasmas sans collisions est toujours un problème ouvert en astrophysique. Mes travaux de recherche seront consacrés à l'étude de la turbulence dans de tels plasmas. L'environnement héliosphérique, le vent solaire, l'environnement spatial de la Terre et des planètes magnétisées me servent de laboratoires, dans lesquels des études systématiques peuvent être menées *in situ* grâce aux missions spatiales.

L'objectif de mon programme de recherche est de contribuer à la compréhension :

- du caractère universel et des spécificités de la turbulence dans le vent solaire et dans l'environnement magnétique des planètes du système solaire ;
- des mécanismes de transfert et de dissipation de l'énergie turbulente dans un milieu sans collisions en général.

Plus précisément, je projette de me concentrer sur l'apparition et le rôle des structures cohérentes dans la turbulence et leur influence sur le transport des particules. Ce travail se situe dans la continuation de mes travaux récents, plus particulièrement la découverte de vortex d'Alfvén dans la turbulence de la magnétogaine (la région de transition entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre). Il est important de comprendre dans quelle mesure ces vortex sont des structures génériques de la turbulence MHD, et quel rôle ils peuvent jouer dans les différents objets en astrophysique.

Les outils que j'envisage d'utiliser sont les observations *in situ*, la modélisation et les simulations numériques.

## 1 Transfert et dissipation d'énergie turbulente

Malgré les efforts considérables déployés par nombre de scientifiques, la turbulence reste mal comprise. Elle est caractérisée par des interactions non-linéaires dont une analyse dimensionnelle montre qu'elles conduisent à la formation d'un spectre en loi de puissance dont la pente (indice spectral) résulte de la manière dont l'énergie turbulente est transférée des grandes vers les petites échelles. Pour un fluide neutre, ce spectre a été prédit par Kolmogorov, et il est remarquable que les nombreuses observations dans l'atmosphère, etc., soient en excellent accord avec la prédiction de Kolmogorov [Frisch, 1995].

La turbulence dans les plasmas naturels a un effet déterminant dans beaucoup de situations en astrophysique et en géophysique. Une importante moisson de résultats expérimentaux a été réalisée dans des situations variées. Rappelons que ce qui distingue les plasmas naturels des fluides neutres, en ce qui concerne la turbulence, est :

- l'interaction entre le fluide et les champs électromagnétiques ;
- l'existence de modes propres comme les ondes d'Alfvén, les modes magnéto-sonores, les modes siffleurs etc., qui peuvent modifier les transferts d'énergie d'une échelle à l'autre, du fait par exemple de la compétition entre non-linéarité et dispersion ;
- l'inefficacité des collisions pour rétablir un équilibre thermodynamique local aux petites échelles : le libre parcours moyen collisionnel est généralement plus grand que les dimensions des systèmes étudiés (plasma "sans collisions") ; la dissipation visqueuse est remplacée par des phénomènes non-collisionnels comme les interactions ondes-particules, qui n'obéissent pas aux mêmes lois d'échelle.

Le vent solaire est un laboratoire parfait pour étudier le transfert et la dissipation de l'énergie turbulente dans les plasmas naturels [Bruno and Carbone, 2005, Alexandrova, 2008].

### 1.1 Rôle de la compressibilité dans le transfert de l'énergie

La cascade à la Kolmogorov a été largement observée dans le vent solaire (voir mon *rapport sur les travaux de recherche*). La nature alfvénique et incompressible de cette cascade est bien connue. Cette conclusion a été tirée des mesures des fluctuations du champ magnétique, notamment de l'observation que  $\delta B_{\perp} \gg \delta B_{\parallel}$ . Les observations récentes des fluctuations de vitesse dans le vent montrent cependant que le spectre de vitesse ne suit pas celui des fluctuations du champ, ce qui est surprenant pour une turbulence alfvénique. La compressibilité du plasma joue certainement un rôle crucial. J'envisage de vérifier cette hypothèse à partir des mesures des fluctuations de densité sur les missions Cluster et THEMIS dans le plan écliptique et des mesures des sonde Ulysses hors écliptique en collaboration avec K. Issautier (LESIA).

Parallèlement à cette étude observationnelle, des simulations numériques compressibles sont prévues en collaboration avec S. Servidio (University of Delaware) et V. Carbone (l'Université de Calabre).

### 1.2 Dissipation dans le plasma sans collisions

Les résultats que j'ai obtenus avec l'instrument STAFF-SC de Cluster (mesures des formes d'ondes magnétiques jusqu'à 12.5 Hz) [Alexandrova et al., 2007, 2008a] montrent que le transfert de l'énergie des grandes échelles vers les petites ne s'arrête pas sur des échelles ioniques (autour de 1 Hz), comme cela était largement admis auparavant.

Une question se pose naturellement : à quelles échelles la turbulence dans le vent solaire se dissipe-t-elle pour se transformer en mouvement "thermique" des particules ? Ceci arrive forcément quelque part, sinon une cascade turbulente ne serait pas observée. Pour répondre à cette question, les observations sur des échelles électroniques, comme l'épaisseur de peau et le rayon de Larmor, et sur les échelles électrostatiques proches de la longueur de Debye, sont cruciales pour répondre à cette question. À ma connaissance, aujourd'hui il n'y a pas d'observations de spectres dans le vent solaire sur de telles échelles.

J'envisage d'analyser des observations sur ces échelles électroniques faites avec l'instrument STAFF-SA de Cluster (instrument réalisé au LESIA, qui mesure les spectres des fluctuations magnétiques et électriques jusqu'à 4 kHz) et avec l'instrument SCM (*Search Coil Magnetometer*) sur THEMIS<sup>8</sup>. Pour l'étude de la turbulence dans le vent solaire, THEMIS a quelques avantages par rapport à Cluster : (i) THEMIS sort plus loin dans le vent solaire (et donc, il y reste plus longtemps) et (ii) les mesures des formes d'ondes sont possibles jusqu'à 4 kHz et donc, l'étude des propriétés statistiques des fluctuations turbulentes sont possibles jusqu'aux échelles électroniques.

Ce travail est prévu en collaboration avec C. Lacombe, A. Mangeney et M. Maksimovic (LESIA), O. Le Contel (PI de SCM sur THEMIS, LPP), J. Saur (Université

---

8. La mission THEMIS est la dernière mission en date pour étudier l'interaction du vent solaire avec l'environnement terrestre. THEMIS a une orbite équatoriale, et est composé de cinq satellites identiques, dont deux satellites sont éloignés l'un de l'autre de quelques rayons terrestres le long de la ligne Soleil-Terre. Cette disposition ne permet pas de faire une étude 3D comme avec Cluster, mais va permettre de déterminer les relations causales entre les phénomènes.



de Cologne) et avec mes collègues de l'Université de Calabre (V. Carbone, P. Veltri, L. Sorriso).

Une meilleure compréhension de la dissipation de l'énergie turbulente dans le plasma sans collisions apporterait un certain éclairage sur le problème de l'accélération, *i.e.* le chauffage, du vent solaire. La prochaine mission héliosphérique, Solar Orbiter (ESA-NASA, lancement prévu pour 2017), a justement pour but l'étude du chauffage du vent. Elle doit s'approcher au Soleil à une distance de 48 rayons solaires (0.23 UA). Elle fournira des mesures de très haute résolution, sur lesquelles l'influence de la turbulence sur l'accélération du vent solaire pourra être analysée. J'ai prévu d'effectuer ce travail en collaboration avec M. Maksimovic (LESIA).

## 2 Vortex d'Alfvén

Du fait de l'existence d'un grand nombre de modes propres dans les plasmas non collisionnels, il est couramment admis que, dans ces milieux, la turbulence consiste en un mélange incohérent d'ondes planes (approximation de la turbulence faible), dont l'identification a accaparé l'attention de nombreux chercheurs.

Les résultats que j'ai obtenus montrent que la turbulence, au moins dans les magnétogaines de la Terre et de Saturne, n'est pas complètement incohérente : sur des échelles spatiales proches des échelles caractéristiques des protons, on observe des structures cohérentes en forme de vortex d'Alfvén [Alexandrova et al., 2006b, Alexandrova and Saur, 2008].

C'est un résultat important qui pourrait conduire à réviser l'approche "classique" de la turbulence dans les plasmas naturels. Comme je l'ai expliqué dans mon *rapport sur les travaux de recherche*, ces vortex sont l'équivalent de ceux trouvés dans les fluides neutres, mais dans lesquels on observe localement et simultanément un courant électrique et une vorticité fluide. Ce sont des ondes d'Alfvén non-linéaires avec une géométrie qualitativement cylindrique, se propageant perpendiculairement au champ magnétique à grande échelle. C'est grâce à l'utilisation des quatre satellites de la mission Cluster que j'ai pu identifier ces vortex dans la magnétogaine en aval du choc de la Terre.

Ce résultat mène à plusieurs séries de questions :

- Comment les vortex sont-ils générés dans la magnétogaine ? Quels paramètres physiques contrôlent leur apparition ? La présence d'un choc est-elle cruciale pour la formation des vortex ? Quel est le rôle de l'instabilité de filamentation de l'onde d'Alfvén dans l'apparition des vortex ? Sont-ils générés naturellement dans la cascade turbulente ?
- Les vortex sont-ils stables dans le plasma ?
- Quel est leur rôle dans la turbulence et dans les mécanismes de transport des particules ?
- Les structures cohérentes sous forme de vortex magnétique sont-ils une propriété générale des plasmas turbulents sans collisions ?

Ci-dessous, je discute quelques-unes de ces questions.

### 2.1 Génération des vortex

#### 2.1.1 Conditions d'apparition des vortex dans la magnétogaine

Pour établir la cause de l'apparition des vortex dans la magnétogaine, il faut évidemment d'abord exploiter au maximum les données obtenues par la mission Cluster. Une étude statistique, la plus complète possible, des traversées de la magnétogaine permettra

d'établir de manière irréfutable le ou les paramètres physiques qui règlent l'apparition des vortex. Il faut comprendre si des particularités de la magnétogaine, comme la présence d'un fort champ magnétique, le choc, la géométrie de l'écoulement du plasma, l'anisotropie des ions qui existe dans la magnétogaine, etc. sont responsables de la présence des vortex. Puis il faut tester l'influence de paramètres plus généraux du plasma comme le  $\beta$  du plasma (rapport entre pression fluide et pression magnétique) et le nombre de Mach. Il faut aussi étudier l'influence de la turbulence dans le vent solaire sur l'apparition des vortex dans la magnétogaine.

Ces objectifs demandent une analyse de données de plusieurs missions spatiales simultanément : Cluster dans la magnétogaine et ACE ou/et Wind dans le vent solaire. Une telle exigence peut être satisfaite grâce aux outils développés au CDPP (*Centre de Données de la Physique des Plasmas*). En collaboration avec l'équipe du CDPP, E. Budnik, V. Génot et C. Jacquy (CESR, Toulouse), je suis en train de mettre au point un code qui permettra l'étude statistique globale des fluctuations magnétiques sur toutes les traversées de la magnétogaine par Cluster.

Ensuite, en connaissant les paramètres physiques qui contrôlent l'apparition des vortex, on va pouvoir établir un mécanisme de génération.

### 2.1.2 Instabilité de filamentation d'onde d'Alfvén

Dans ma thèse, j'ai proposé l'instabilité de filamentation d'une onde d'Alfvén d'amplitude finie [Laveder et al., 2002] comme un mécanisme possible de génération des vortex. Cette instabilité requiert une onde "mère" quasi monochromatique, qui s'effondre à cause des perturbations de densité dans le plasma en générant des filaments alignés avec la direction de propagation de l'onde "mère" initiale. Ce scénario est possible car j'ai pu observer des signatures des vortex au voisinage d'une onde d'Alfvén [Alexandrova et al., 2004]. Cependant, comme le montrent les observations, les ondes d'Alfvén monochromatiques sont rares dans la magnétogaine. En revanche, il n'est pas exclu que l'effondrement des ondes d'Alfvén par l'instabilité de filamentation se passe tellement vite qu'on n'observe pas l'onde "mère", mais seulement le résultat de l'instabilité, des vortex localisés. Cela reste à confirmer.

Les simulations numériques bi-dimensionnelles de l'évolution d'une onde d'Alfvén dispersive que j'ai effectuées pendant ma thèse [Alexandrova, 2005] ne confirment pas ce scénario. Cependant, dans les simulation 2D on n'arrive pas à résoudre simultanément le plan du vortex, et la direction de propagation de l'onde mère, qui est perpendiculaire à ce plan. Il faut donc faire des simulations tri-dimensionnelles pour établir le rôle de cette instabilité dans la génération des vortex. C'est ce que j'envisage de faire grâce au code hybride 3D en collaboration avec P. Hellinger et P. Travnicek (IAP, Prague, République Tchèque) et grâce au code Hall MHD en collaboration avec T. Passot et P. L. Sulem (Observatoire de la Côte d'Azur, Nice).

### 2.1.3 Développement de la turbulence forte

Un autre scénario de génération est envisageable : les vortex sont créés spontanément lors du développement de la turbulence forte. En fait, des structures cohérentes sont attendues dans la turbulence d'un fluide neutre près des échelles dissipatives [Frisch, 1995]. Par contre, les vortex magnétiques observés dans la magnétogaine au voisinage de la cassure du spectre se trouvent dans des échelles intermédiaires. Ces échelles intermédiaires correspondent à un changement dans la dispersion des ondes dans le plasma. Il n'est pas impossible que le passage d'un régime turbulent à un autre se passe par la création de

vortex. Pourquoi la cascade générerait-elle des structures cohérentes en forme de vortex et pas autre chose ?

Dans le plasma avec un champ magnétique fort, la turbulence se développe plutôt dans le plan perpendiculaire au champ moyen, ce qui conduit à une distribution anisotrope des vecteur d'onde,  $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$  (voir aussi section 3 de mon *rapport sur les travaux de recherche*). Les vortex d'Alfvén possèdent eux aussi des vecteurs d'onde  $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$ , mais à la différence avec des fluctuations turbulentes, ils sont stables dans le plasma, *i.e.* leur temps de vie est plus long que le temps non-linéaire de la cascade turbulente.

Pour vérifier le scénario de génération des vortex pendant le développement d'une cascade dans un champ fort, des simulations numériques Hall MHD sont envisagés en collaboration avec F. Califano (Université de Pise).

## 2.2 Généralité du phénomène

La turbulence dans les plasmas naturels a un effet déterminant dans beaucoup de situations dans l'environnement terrestre mais aussi dans d'autres systèmes en astrophysique. J'ai observé des structures cohérentes sous la forme de vortex en aval du choc de la Terre et de Saturne. Or, on trouve des chocs sans collisions dans un grand nombre de situations comme par exemple les éjections de masse coronale dans le milieu interplanétaire ou bien dans les restes de supernovæ. Dans ces derniers les chocs non-collisionnels accélèrent les particules chargées jusqu'à de très hautes énergies. Le mécanisme le plus fréquemment utilisé pour expliquer cette accélération, est l'accélération de Fermi, qui est basée sur les réflexions des particules entre deux parois magnétiques formées par le champ en amont et les fluctuations incohérentes en aval. Il faudrait apporter des modifications substantielles à ce modèle si des structures régulières comme des vortex d'Alfvén sont présentes de manière générale en aval des chocs non-collisionnels.

Pour confirmer l'universalité des vortex en aval des choc sans collision, j'envisage l'étude de la turbulence en aval du choc des éjections de masse coronale avec des données de la mission STEREO, en collaboration avec B. Lavraud (CESR, Toulouse). Un autre exemple d'un système en aval du choc est l'héliogaine, qu'on peut étudier avec Voyager.

À plus long terme, ce travail pourra être élargi avec les mesures dans les magnétosphères des autres planètes du système solaire, où les mesures *in situ* sont accessibles (Jupiter, Mars, Vénus, et Mercure — mesures par Cassini, Mars Global Surveyor (MGS), Venus Express et BepiColombo respectivement). Cette étude est intéressante pour l'étude de la turbulence en aval des chocs sans collisions dans des conditions de plasma très variées et sur des distances au Soleil différentes. Elle est prévue en collaboration avec C. Mazelle (CESR, Toulouse), J. Saur (Université de Cologne), P. Hellinger et P. Travnicek (IAP, Prague, République Tchèque).

Maintenant, supposons que les vortex magnétiques sont une propriété intrinsèque de la turbulence dans un plasma sans collisions. Dans ce cas on doit pouvoir les observer dans le vent solaire. Jusqu'à ce jour, les structures cohérentes observées dans le vent solaire ont été interprétées comme des structures uni-dimensionnelles (couches de courant et ondes de choc). Des structures bi-dimensionnelles, telles que les vortex d'Alfvén ne peuvent être identifiées proprement qu'avec au moins quatre satellites. C'est une motivation importante pour faire l'étude de la turbulence dans le vent solaire avec Cluster. Il n'y a pas beaucoup d'observations de Cluster dans le vent solaire libre, non influencé par le choc de la Terre. Cependant, un début de statistique peut être tenté. De plus, les propriétés des vortex que j'ai établies avec les mesures de Cluster dans la magnétogaine peuvent être des indices pour identifier des vortex dans le vent solaire par des missions comme Wind, STEREO et THEMIS. Cette étude va permettre d'établir l'importance

du vortex d'Alfvén dans la turbulence des plasmas en général.

### 2.3 Rôle des vortex dans le transport des particules

Les vortex sur des échelles ioniques peuvent-ils accumuler une partie de l'énergie turbulente et la transformer ensuite en chauffage des particules ?

Avec un code hybride, dans lequel les ions sont décrits comme des particules et les électrons comme un fluide, on peut étudier l'influence du vortex sur les ions. Ce travail est prévu en collaboration avec P. Hellinger.

En revanche, avec les observations actuelles, ces effets cinétiques sont difficiles à étudier. En effet, la résolution temporelle des mesures des fonctions de distribution des particules par Cluster est de 4 secondes (période de rotation du satellite). Les données du champ magnétique utilisées pour identifier les vortex d'Alfvén sont échantillonnées à 25 points par seconde. On voit que les mesures des champs et des particules ne sont pas comparables. La seule possibilité est d'utiliser les variations du potentiel du satellite comme approximation des variations de densité du plasma avec une résolution temporelle de 5 points par seconde, comme cela a été fait dans [Alexandrova et al., 2006a].

Il est important de noter que sur la future mission MMS (*Magnetospheric MultiScale mission*) les fonctions de distribution seront mesurées chaque 10 – 100 ms, avec la même précision que les formes d'ondes. Cela sera aussi le cas pour la mission Cross-Scale (sélectionnée pour *assessment study*, cosmic vision 2015-2025) mais de plus, avec cette mission on pourra étudier les phénomènes physiques sur les échelles électroniques, ioniques et magnétohydrodynamiques simultanément. Cela sera une révolution pour notre compréhension du plasma spatial en général et de la dissipation d'énergie turbulente dans un milieu sans collisions en particulier.

## 3 Planètes magnétisées

### 3.1 Relation Soleil-Terre

L'étude du système Soleil-Terre est important d'une part pour la *météo spatiale* et d'autre part pour nos connaissances sur les autres objets en astrophysique. Ce n'est que près de la Terre que l'on peut se permettre d'envoyer des missions multi-satellites comme Cluster (4 satellites), THEMIS (5 satellites) et Cross-Scale (10 satellites), qui nous permettent d'étudier en détails le plasma naturel.

Depuis le début de la vie de Cluster sur son orbite, beaucoup de questions sur les différentes régions de la magnétosphère terrestre (choc, magnétogaine, magnétopause, cornets polaires, queue de la magnétosphère) ont été résolues, mais de plus nombreuses encore se sont posées.

Avec Cluster on peut étudier en détails la structure 3D d'un phénomène (des échelles MHD jusqu'à des échelles ioniques). On n'a en revanche aucune information sur l'origine de ce phénomène.

L'étude de la causalité est devenu possible avec la mission THEMIS : par exemple, lorsqu'un satellite est dans le vent solaire, et un autre dans la magnétosphère (et les 3 autres au milieu), on peut suivre la même "boule de plasma" à partir du vent solaire, étudier son passage à travers le choc et voir son influence sur la magnétosphère. Nous avons commencé à étudier un exemple de telle observation avec THEMIS au sein d'une équipe conduite par C. Jacquey (CESR, Toulouse).

La future mission Cross-Scale sera composée de 4 satellites sur des échelles MHD, 4 sur des échelles ioniques et 4 sur des échelles électroniques. Cette constellation de

satellites est unique pour étudier les phénomènes multi-échelles comme le choc de la Terre, la reconnexion des lignes de champ magnétiques et la turbulence. J'adapterai pour Cross-Scale les outils multi-satellites que j'ai développés pour analyser les données de Cluster.

### 3.2 Planètes externes

Si, dans le cas de la Terre, la plupart de la dynamique de la magnétosphère est définie par l'interaction du vent solaire avec l'environnement terrestre, au niveau de l'orbite de Jupiter et Saturne le champ magnétique dans le vent solaire est beaucoup plus faible et donc son impact doit être moins important.

En fait, à la différence avec la Terre, il y a une source de perturbation à l'intérieur des magnétosphères de Saturne et Jupiter : le satellite Io dans la magnétosphère de Jupiter et Encelade près de Saturne. Ils injectent en permanence de la matière en créant des tores de plasma à l'intérieur de leur magnétosphère.

Les questions suivantes se posent : comment le tore de plasma dans la magnétosphère interne (où le champ magnétique est dipolaire) influence-t-il le champ d'une planète ? Y a-t-il génération de la turbulence, qui pourrait affecter ensuite les régions polaires et ses aurores ?

Pour répondre à ces questions, l'étude systématique de la magnétosphère est nécessaire. Malheureusement, Galileo, la seule mission en orbite autour de Jupiter, ne dispose pas d'une résolution temporelle nécessaire pour ce genre d'étude. En revanche, avec Cassini, il est possible de faire cette étude pour la magnétosphère de Saturne. Cette étude est prévue en collaboration avec J. Saur (Université de Cologne).

Dans le futur, j'espère pouvoir étudier la turbulence dans la magnétosphère de Jupiter, la plus grande de notre système solaire, grâce aux mesures de la mission Laplace (sélectionnée pour *assessment study*, cosmic vision 2015–2025) en collaboration avec l'équipe de J. Saur.

Ce programme de recherche se fera également, en plus de mes collaboration internationales et nationales déjà mentionnées, en collaboration étroite avec les différents chercheurs du LESIA : (i) M. Maksimovic, A. Mangeney, C. Lacombe et K. Issautier pour l'analyse et l'interprétation des données des missions en cours et futures ; (ii) F. Pantellini, C. Briand et A. Mangeney pour les simulations numériques et les études théoriques.

## Références

- O. Alexandrova. *MHD turbulence in Earth magnetosheath downstream of quasi-perpendicular bow-shock*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, Novembre 2005.
- O. Alexandrova. Solar wind vs magnetosheath turbulence and Alfvén vortices. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15 :95–108, February 2008.
- O. Alexandrova and J. Saur. Alfvén vortices in Saturn’s magnetosheath : Cassini observations. *Geophysical Research Letters*, 35 :15102–+, August 2008. doi : 10.1029/2008GL034411.
- O. Alexandrova, A. Mangeney, M. Maksimovic, C. Lacombe, N. Cornilleau-Wehrlin, E. A. Lucek, P. M. E. Décréau, J.-M. Bosqued, P. Travnicek, and A. N. Fazakerley. Cluster observations of finite amplitude Alfvén waves and small-scale magnetic filaments downstream of a quasi-perpendicular shock. *J. Geophys. Res.*, 109 :A05207, May 2004. doi : 10.1029/2003JA010056.
- O. Alexandrova, A. Mangeney, and M. Maksimovic. Incompressible magnetic vortices : magnetosheath cluster observations. In A. Kovtun, M. Kubyshkina, V. Semenov, V. Sergeev, V. Shashkanov, and T. Yanovskaya, editors, *Problems of Geocosmos*, volume 6, pages 3–6. St. Petersburg State University, May 2006a.
- O. Alexandrova, A. Mangeney, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrlin, J.-M. Bosqued, and M. André. Alfvén vortex filaments observed in magnetosheath downstream of a quasi-perpendicular bow shock. *J. Geophys. Res.*, 111 :12208, December 2006b. doi : 10.1029/2006JA011934.
- O. Alexandrova, V. Carbone, P. Veltri, and L. Sorriso-Valvo. Solar wind Cluster observations : Turbulent spectrum and role of Hall effect. *Planetary and Space Science*, 55 : 2224–2227, December 2007. doi : 10.1016/j.pss.2007.05.022.
- O. Alexandrova, V. Carbone, P. Veltri, and L. Sorriso-Valvo. Small-Scale Energy Cascade of the Solar Wind Turbulence. *The Astrophysical Journal*, 674 :1153–1157, February 2008a. doi : 10.1086/524056.
- O. Alexandrova, C. Lacombe, and A. Mangeney. Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth’s magnetosheath : Cluster observations. *Annales Geophysicae*, 26 :3585–3596, November 2008b.
- O. Alexandrova, R. Grappin, and A. Mangeney. Alfvén vortex stability : numerical evidence. *in preparation*, 2009a.
- O. Alexandrova, J. Saur, A. Mangeney, and C. Lacombe. Solar wind turbulent spectrum at electron scales. *in preparation*, 2009b.
- R. Bruno and V. Carbone. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. *Living Reviews in Solar Physics*, 2 :4–+, September 2005.
- S. Champeaux, T. Passot, and P. L. Sulem. Alfvén-wave filamentation. *Journal of Plasma Physics*, 58 :665–690, December 1997.
- A. Czaykowska, T. M. Bauer, R. A. Treumann, and W. Baumjohann. Magnetic field fluctuations across the Earth’s bow shock. *Annales Geophysicae*, 19 :275–287, March 2001.



- U. Frisch. *Turbulence. The legacy of A.N. Kolmogorov*. Cambridge : Cambridge University Press, 1995.
- S. Galtier, S. V. Nazarenko, A. C. Newell, and A. Pouquet. Anisotropic Turbulence of Shear-Alfvén Waves. *The Astrophysical Journal*, 564 :L49–L52, January 2002. doi : 10.1086/338791.
- D. Laveder, T. Passot, and P. L. Sulem. Transverse dynamics of dispersive Alfvén waves. I. Direct numerical evidence of filamentation. *Physics of Plasmas*, 9 :293–304, January 2002.
- R. J. Leamon, C. W. Smith, N. F. Ness, W. H. Matthaeus, and H. K. Wong. Observational constraints on the dynamics of the interplanetary magnetic field dissipation range. *J. Geophys. Res.*, 103(12) :4775, March 1998.
- A. Mangeney, C. Lacombe, M. Maksimovic, A. A. Samsonov, N. Cornilleau-Wehrlin, C. C. Harvey, J.-M. Bosqued, and P. Trávníček. Cluster observations in the magnetosheath - Part 1 : Anisotropies of the wave vector distribution of the turbulence at electron scales. *Annales Geophysicae*, 24 :3507–3521, December 2006.
- V. I. Petviashvili and O. A. Pokhotelov. *Solitary Waves in Plasmas and in the Atmosphere*. Gordon & Breach Science Pub, February 1992. ISBN 2881247873.
- L. Rezeau, A. Roux, and C. T. Russell. Characterization of small-scale structures at the magnetopause from ISEE measurements. *J. Geophys. Res.*, 98 :179–186, January 1993.
- F. Sahraoui, G. Belmont, L. Rezeau, N. Cornilleau-Wehrlin, J. L. Pinçon, and A. Balogh. Anisotropic Turbulent Spectra in the Terrestrial Magnetosheath as Seen by the Cluster Spacecraft. *Phys. Rev. Lett.*, 96 :075002, 2006.
- S. J. Schwartz, D. Burgess, and J. J. Moses. Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath : present status. *Annales Geophysicae*, 14 :1134–1150, November 1996.
- V. Semenov, O. Alexandrova, N. Erkaev, S. Muhlbachler, and H. Biernat. A simple model of magnetopause erosion as a consequence of pile-up process and bursty reconnection. *Int. J. Geomagn. i Aeron.*, 3(2) :109–116, December 2002.
- J. V. Shebalin, W. H. Matthaeus, and D. Montgomery. Anisotropy in MHD turbulence due to a mean magnetic field. *Journal of Plasma Physics*, 29 :525–547, June 1983.
- O. Stawicki, S. P. Gary, and H. Li. Solar wind magnetic fluctuation spectra : Dispersion versus damping. *J. Geophys. Res.*, 106 :8273–8282, May 2001. doi : 10.1029/2000JA000446.
- C. F. von Weizsäcker. The Evolution of Galaxies and Stars. *The Astrophysical Journal*, 114 :165–+, September 1951. doi : 10.1086/145462.